

Ângelo Breda

**AVALIAÇÃO DE MELHORIAS PARA UM SISTEMA
DE PREVISÃO HIDROLÓGICA HORÁRIA**

Curitiba
2008

Ângelo Breda

AVALIAÇÃO DE MELHORIAS PARA UM SISTEMA DE PREVISÃO HIDROLÓGICA HORÁRIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor Tecnológico da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial na obtenção do grau de mestre.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Gonçalves

Curitiba
2008

Epígrafe

*“Em tudo na vida a perfeição é finalmente atingida,
não quando nada mais existe para acrescentar,
mas quando não há mais nada para retirar.”*

Antoine de Saint Exupéry

Agradecimentos

A decisão de cursar a graduação de engenharia ambiental não foi coisa planejada, que viesse de um longo tempo sendo visada pela minha pessoa. Contudo, se não fosse essa pequena sugestão de meu pai, provavelmente todo este trabalho, da capa à última página, não estaria sendo lido por você agora. Quando saiu o resultado de aprovado na UFPR, senti o quanto uma família pode alegrar-se com um sucesso relativamente pequeno de um filho/irmão, pois o orgulho era tamanho que parecia não justificar o meu empenho, que dirá moderado, no ano de preparação que acabara de se extinguir.

Ao longo da graduação muitas pessoas surgiram na minha vida e afetaram diretamente o meu modo de ser, de ver, e de julgar as coisas que acontecem no cotidiano de nossas vidas. Aprendi com o Evandro, o Jonas e o Cabral, que era preciso se empenhar com muito esforço nas disciplinas do curso, e na vida, para conseguir uma nota 10, pois o 7 era apenas, suficiente, mediano. Com o Rafael, Feijó, Nilo, Tomás, Marcelo e Furlan, aprendi a aproveitar os momentos bons da vida: viagens, festas, churrascos, intervalos entre aulas, ônibus de volta pra casa... A Ellen, Marianne e a Priscila me mostraram como é bom começar um dia com um simples beijo no rosto, além é claro, de que se deve usar sempre de palavras macias e não ambíguas no diálogo com mulheres. E há mais dois amigos da graduação, o Konrad e o “Reks”, que gostaria de agradecer por me ensinarem a respeitar as diferenças entre os homens, e por mostrarem como a vida está ligada a um Ser superior. E tem também o Helder, a Nayane, o Otávio, a Andressa, e vários outros alunos da ambiental de outros anos que estarão sempre na minha memória.

Entretanto tudo o que aprendi, tanto nos conhecimentos acadêmicos quanto em experiência de vida, ao longo da graduação de engenharia ambiental não se deve somente aos meus amigos. Gostaria de agradecer imensamente a todos os professores que me ensinaram não somente o conteúdo de suas disciplinas, mas também a correr atrás de materiais para pesquisa e trabalhos práticos. A confeccionar documentos e apresentações acadêmicas focados na fácil transmissão do conhecimento. A verificar e contestar as fontes de toda informação que chega até nós. E principalmente por mostrarem sua dedicação à área acadêmica, em um país que não dá o devido valor ao professor. Tenho certeza que esta lição influenciou na minha motivação em cursar o mestrado tão seqüente à conclusão da graduação.

Estendo esses agradecimentos aos professores do curso de mestrado, que foram ainda mais presentes na minha formação, pois esses puderam me dar muito mais atenção às minhas

indagações, e inúmeras sugestões de aprimoramentos de meus trabalhos, dado que raras vezes havia mais de dez alunos em turma.

Bem, mas é claro que minha vida não se passou somente na Universidade. Aliás, tenho certeza que muito do que somos está ligado a de onde viemos e como fomos criados. Inúmeras vezes meu pai repetiu a mesma sentença: “Quando eu tinha a tua idade, eu não tinha essa mamata que você tem agora”. E embora isso me entrasse por um ouvido e saísse pelo outro, pude presenciar diretamente no trabalho dele a dureza de uma vida devota a garantir a “mamata” de seus filhos. E mais, com a esperança de que eu meus irmãos não venham a dizer essa mesma frase a nossos filhos. E assim aprendi a não parar meu trabalho frente a qualquer inconveniente, sempre batalhando para que todo dia desse um bom “lucro”. Minha mãe também foi muito guerreira, mas a sua capacidade de dar a volta por cima depois de tantos tombos na vida é impressionante. Dona de casa, confeitadeira, vendedora, esteticista, e principalmente, mãe. Essa facilidade que ela tem em recomeçar tudo do zero foi um exemplo muito importante pra mim, pois o tema deste trabalho só foi definido a nove meses atrás, depois de três outros projetos que por diversos motivos não vingaram. E em cada um uma nova pesquisa foi iniciada e, infelizmente, depois deixada de lado, para quem sabe serem desengavetadas em pesquisas futuras. Aos meus irmãos talvez eu tenha mais que pedir desculpas que agradecer, pois foram vítimas do meu stress, em que tantas vezes fui grosseiro até para pedir um favor, enquanto que seus pedidos eram constantemente recusados.

E se a convivência em família é algo essencial para a vida de um sujeito, o que se dirá de quem tem 13 tios por parte de pai e mais 7 por parte de mãe, implicando em dezenas e dezenas de primos. Tudo bem que não tenho um contato direto com todos, mas há uma parte especial, a parte surfista da família. Sem a companhia presente dessa turma na maioria dos meus finais de semana e feriados, muitas risadas se teriam perdido, e muitas viagens a praias magníficas não estariam entre minhas melhores lembranças. Se o sentido da vida é a busca pela felicidade, então sou muito grato a esse pessoal, meus primos: Giovanni, Heitor, Fagner, Luis Guilherme, “Wando”, Cainã, sem esquecer dos que estão um pouco mais longe, lá nos pampas (tchê!): Paulo, Murilo e Lucas.

Nesse quesito de amigos realmente não posso me queixar, pois ainda tenho de agradecer aos amigos da graduação de psicologia, às moças da turma de inglês e a turma do chimarrão que está lá na padaria do meu pai todo final de dia. E ainda tem a turma que cursou as disciplinas do mestrado comigo. Obrigado a todos pela força, preocupações e palavras de tranquilidade nos momentos de angústia e ansiedade.

Outro pessoal que tenho de agradecer são os funcionários do SIMEPAR e do LEMMA. Desde o pessoal de infra-estrutura, que garantem o bom funcionamento das estações telemétricas, passando pela turma da informática que vivem “quebrando galhos” quando dá algum problema no computador ou na impressora, ou então consertavam os *scripts* para consulta de dados ou para automatização de tarefas (que pareciam que não iam funcionar nunca!), chegando ao pessoal da pesquisa que contribuíram enormemente com idéias e discussões acerca de boa parte dos métodos e resultados apresentados neste trabalho. Em especial gostaria de agradecer ao meu orientador, professor José Eduardo, ou simplesmente Zé. Obrigado pelas várias dicas de referências, por aceitar tantas trocas de projeto, pelos conselhos sobre a composição desta monografia, pela oportunidade da bolsa de estudos do SIMEPAR e pela amizade.

Tenho de agradecer também ao nosso Pai. Eu poderia escrever várias páginas sobre minhas dúvidas a respeito da existência ou não de Deus, alegando hora a impressionante perfeição da natureza, e hora a tamanha imperfeição dos homens. Mas todo mundo sabe que essa é a típica discussão sem fim. Eu gostaria de agradecer é ao Sujeito pra quem eu peço ajuda nos momentos difíceis, mas que esqueço de agradecer nos momentos de tranquilidade. Mas que mesmo assim parece sempre me fazer entender porque as coisas caminharam de um jeito estranho pra que tudo desse certo no final, e de quebra aprendesse, ou reaprendesse, uma lição de moral.

É isso!

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Símbolos	x
Resumo	xiv
Abstract	xv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Estrutura da dissertação	4
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Modelagem hidrológica	5
2.1.1 Histórico	6
2.1.2 Principais modelos em uso	8
2.1.3 Classificação dos modelos hidrológicos	9
2.1.4 Seleção	13
2.2 Modelo conceitual chuva-vazão	14
2.2.1 Etapas de modelagem	15
2.3 Modelo Sacramento – Soil Moisture Accounting	16
2.3.1 Embasamento teórico do SAC–SMA	18
2.4 Modelo 3R	30
2.4.1 Fase Bacia	32
2.4.2 Fase Canal	36
2.4.3 Modelo conceitual completo	38
2.5 Métodos de calibração automática	39
2.5.1 Método Simplex Downhill	41
2.5.2 Método Shuffled Complex Evolution – University of Arizona	43
3 Métodos Utilizados	47
3.1 Rede telemétrica de monitoramento e dados hidro-meteorológicos	47
3.1.1 Identificação e preenchimento de falhas	50
3.1.2 Propriedades médias da bacia	60
3.2 Área de estudo	63
3.2.1 Caracterização hidro-meterológica	65

3.2.2	Caracterização dos tipos de solos	71
3.2.3	Caracterização do relevo	74
3.2.4	Caracterização por sub-bacia	75
3.3	Funções objetivo e métodos de calibração automática	81
3.3.1	Algoritmo do método <i>Simplex Downhill</i>	82
3.3.2	Algoritmo do método Shuffled Complex Evolution	84
3.4	Previsão climatológica de vazão e índices de avaliação dos resultados	89
4	Resultados	94
4.1	Avaliação dos métodos de calibração	94
4.1.1	Calibração de série sintética do modelo 3R	95
4.1.2	Calibração de série sintética do modelo Sacramento	100
4.1.3	Calibração de série observada para o modelo 3R	106
4.1.4	Calibração de série observada para o modelo de Sacramento	111
4.1.5	Escolha da rotina de calibração automática	116
4.2	Avaliação dos sistemas de previsão propostos	117
4.2.1	Resultados do sistema de referência	117
4.2.2	Resultados dos sistemas propostos	120
4.3	Discussão dos resultados dos sistemas de previsão	129
5	Conclusões	136
5.1	Propostas para trabalhos futuros	137
	Referências	139

Lista de Figuras

Figura 2.1:	Classificação dos métodos matemáticos em hidrologia.....	11
Figura 2.2:	Ilustração dos componentes hidrológicos do modelo Sacramento	21
Figura 2.3:	Apresentação esquemática do modelo Sacramento	29
Figura 2.4:	Modelagem semidistribuída de uma bacia hidrográfica	32
Figura 2.5:	Apresentação esquemática do modelo 3R	33
Figura 2.6:	Passos do método <i>Downhill Simplex</i>	42
Figura 2.7:	Ilustração do método <i>Shuffled Complex Evolution</i>	44
Figura 2.8:	Ilustração dos passos de evolução aplicados a um complexo.....	45
Figura 3.1:	Mapa das sub-bacias da área de estudo, hidrografia principal e localização dos postos telemétricos.....	49
Figura 3.2:	Série de vazão com falhas não detectáveis por rotinas computacionais.....	54
Figura 3.3:	Série de vazão afetada por variação da carga da bateria do posto telemétrico e série após filtro de 12 horas	55
Figura 3.4:	Comparação de períodos, de uma série de vazão, interpolados linearmente e por <i>spline</i> cúbica	59
Figura 3.5:	Estações telemétricas utilizadas para o cálculo da precipitação média nas sub-bacias por r^{-2}	61
Figura 3.6:	Polígonos de Thiessen para a região de estudo.....	62
Figura 3.7:	Localização da área de estudo.....	63
Figura 3.8:	Esquema do fluxo hídrico entre as sub-bacias.....	65
Figura 3.9:	Valores de precipitação mensal pelo método de Thiessen (linha cinza claro), por inverso da distância ao quadrado (linha cinza escuro), e evapotranspiração potencial pelo método de Penman (linha preta tracejada), das nove sub-bacias	70
Figura 3.10:	Mapa das classes de solo da área de estudo, segundo classificação da EMBRAPA	72
Figura 3.11:	Mapa hipsométrico (faixas de altitude) da área de estudo	76
Figura 3.12:	Esquema da execução do sistema de previsão hidrológica.....	90
Figura 4.1:	Trecho da série sintética e simulação com os parâmetros calibrados para o modelo 3R em sub-bacia de cabeceira.....	97
Figura 4.2:	Trecho da série sintética e simulação com os parâmetros calibrados para o modelo 3R em sub-bacia interna.....	99
Figura 4.3:	Trecho da série sintética e simulação com os parâmetros calibrados para o modelo de Sacramento em sub-bacia de cabeceira.....	102
Figura 4.4:	Trecho da série sintética e simulação com os parâmetros calibrados para o modelo de Sacramento em sub-bacia interna.....	105
Figura 4.5:	Trecho da série de vazão observada em B1 e resultados das simulação com os parâmetros calibrados para o 3R.....	107
Figura 4.6:	Trecho da série de vazão observada em B8 e resultados das simulação com os parâmetros calibrados para o 3R.....	109
Figura 4.7:	Trecho da série de vazão observada em B1 e resultados das simulações com os parâmetros calibrados para o Sacramento.....	112
Figura 4.8:	Trecho da série de vazão observada em B8 e resultados das simulações com os parâmetros calibrados para o Sacramento.....	115
Figura 4.9:	Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – modelo 3R, parâmetros de referência.....	118

Figura 4.10:	Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – modelo 3R, parâmetros de referência, previsão sem chuva.	120
Figura 4.11:	Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – modelo 3R, parâmetros calibrados por $f1$	122
Figura 4.12:	Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – modelo 3R, parâmetros calibrados por $f1$, previsão sem chuva.	123
Figura 4.13:	Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – modelo 3R, parâmetros calibrados por $f2$	124
Figura 4.14:	Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – modelo 3R, parâmetros calibrados por $f2$, previsão sem chuva.	125
Figura 4.15:	Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – modelo Sacramento, parâmetros calibrados por $f1$	126
Figura 4.16:	Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – modelo Sacramento, parâmetros calibrados por $f1$, previsão sem chuva.	127
Figura 4.17:	Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – modelo Sacramento, parâmetros calibrados por $f2$	128
Figura 4.18:	Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – modelo Sacramento, parâmetros calibrados por $f2$, previsão sem chuva.	129
Figura 4.19:	Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – sistema 3R- $f1$ com precipitação na previsão.	132
Figura 4.20:	Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – sistema 3R- $f1$, previsão com chuva observada.	133
Figura 4.21:	Precipitação média horária e vazões da exutória e de montante durante a cheia de 2005 em União da Vitória.	134

Lista de Tabelas

Tabela 2.1:	Descrição dos parâmetros da fase bacia do modelo Sacramento.....	30
Tabela 2.2:	Descrição dos parâmetros da fase bacia do modelo 3R.....	36
Tabela 2.3:	Pontos fictícios para um conjunto inicial da rotina <i>Simplex</i>	42
Tabela 3.1:	Limites máximos e mínimos para os dados de temperatura, pressão, radiação, umidade e velocidade do vento.....	51
Tabela 3.2:	Limite de valor máximo do dado de precipitação das estações hidrológicas ...	52
Tabela 3.3:	Limites climatológicos de vazão nos postos das exutórias das sub-bacias.....	56
Tabela 3.4:	Lista do nome das sub-bacias e suas respectivas áreas de drenagem	64
Tabela 3.5:	Índices estatísticos da série de vazão horária, entre 1998 e 2006, e características climatológicas, das nove sub-bacias.....	67
Tabela 3.6:	Limites dos parâmetros do modelo de Sacramento	87
Tabela 3.7:	Limites dos parâmetros do modelo 3R e da fase canal.....	88
Tabela 4.1:	Parâmetros do 3R por calibração da série sintética para bacia de cabeceira. ...	96
Tabela 4.2:	Avaliação estatística para calibrações sobre série sintética do 3R em bacia de cabeceira.	97
Tabela 4.3:	Parâmetros do 3R por calibração da série sintética para bacia interna.	98
Tabela 4.4:	Avaliação estatística para calibrações sobre série sintética do 3R em bacia interna.	99
Tabela 4.5:	Parâmetros do Sacramento por calibração da série sintética para bacia de cabeceira.	101
Tabela 4.6:	Avaliação estatística para calibrações sobre série sintética do Sacramento em bacia de cabeceira.	102
Tabela 4.7:	Parâmetros do Sacramento por calibração da série sintética para bacia interna.	104
Tabela 4.8:	Avaliação estatística para calibrações sobre série sintética do Sacramento em bacia interna.	105
Tabela 4.9:	Parâmetros do 3R para calibração da sub-bacia B1.....	106
Tabela 4.10:	Avaliação estatística para calibrações do 3R sobre série observada em B1. ...	108
Tabela 4.11:	Parâmetros do 3R para calibração da sub-bacia B8.....	109
Tabela 4.12:	Avaliação estatística para calibrações do 3R sobre série observada em B8. ...	110
Tabela 4.13:	Parâmetros do Sacramento para calibração da sub-bacia B1.....	111
Tabela 4.14:	Avaliação estatística para calibrações do Sacramento sobre série observada em B1.....	113
Tabela 4.15:	Parâmetros do Sacramento para calibração da sub-bacia B8.....	114
Tabela 4.16:	Avaliação estatística para calibrações do Sacramento sobre série observada em B8.....	115

Lista de Símbolos

Parâmetros do modelo de Sacramento (fase bacia)

<i>UZTWM</i>	Capacidade máxima do armazenamento superior de água de tensão superficial	(mm)
<i>UZFWM</i>	Capacidade máxima do armazenamento superior de água livre	(mm)
<i>LZTWM</i>	Capacidade máxima do armazenamento inferior de água de tensão superficial	(mm)
<i>LZFPM</i>	Capacidade máxima do armazenamento inferior primário de água livre	(mm)
<i>LZFSM</i>	Capacidade máxima do armazenamento inferior suplementar de água livre	(mm)
<i>UZK</i>	Coefficiente de depleção lateral da zona superior de água livre	(dia ⁻¹)
<i>LZPK</i>	Coefficiente de depleção lateral da zona inferior primária de água livre	(dia ⁻¹)
<i>LZSK</i>	Coefficiente de depleção lateral da zona inferior suplementar de água livre	(dia ⁻¹)
<i>PCTIM</i>	Fração de área constantemente impermeável na bacia	(km ² /km ²)
<i>ADIMP</i>	Área impermeável adicional	(km ² /km ²)
<i>PFREE</i>	Fração da água percolada da zona superior que vai direto para a zona de água livre inferior	(mm/mm)
<i>ZPERC</i>	Taxa máxima de percolação	(adim.)
<i>REXP</i>	Expoente da equação de percolação	(adim.)
<i>RSERV</i>	Fração da água livre da zona inferior que não é transferível para a zona de água de tensão superficial	(mm/mm)
<i>RIVA</i>	Fração de área coberta por mata ciliar na bacia	(km ² /km ²)
<i>SIDE</i>	Fração do escoamento de base que compõe a perda de base	(adim.)

Parâmetros do modelo 3R (fase bacia)

X_1^0	Capacidade máxima do armazenamento superior do solo	(mm)
X_2^0	Capacidade máxima do armazenamento inferior do solo	(mm)
C_1	Taxa de drenagem lateral do reservatório superior	(hora ⁻¹)
C_2	Taxa de drenagem lateral do reservatório inferior	(hora ⁻¹)
C_3	Máxima percolação possível, dado como múltiplo da demanda de percolação mínima ($C_2 X_2$)	(adim.)
m_1	Expoente da equação do escoamento superficial	(adim.)
m_2	Expoente da equação da percolação	(adim.)
m_3	Expoente da equação da evapotranspiração ocorrida no armazenamento inferior	(adim.)
ε	Porção do escoamento de base que compõe a perda de base	(adim.)

Demais variáveis dos modelos hidrológicos

β	Parâmetro do modelo de propagação em canal	(adim.)
η	Parâmetro do modelo de propagação em canal	(adim.)
<i>EVTP</i>	Evapotranspiração potencial	(mm)
<i>EVT_{sup}</i>	Volume da demanda de evapotranspiração para a camada superior do solo	(mm)
<i>EVT_{inf}</i>	Volume da demanda de evapotranspiração para a camada inferior do solo	(mm)
X_1	Volume de água na camada superior do solo no modelo 3R	(mm)
X_2	Volume de água na camada inferior do solo no modelo 3R	(mm)

<i>PREC</i>	Precipitação média na bacia	(mm)
<i>E.SUPERF</i>	Escoamento superficial	(mm)
<i>E.SUBSUP</i>	Escoamento subsuperficial	(mm)
<i>PERCOL</i>	Percolação	(mm)
<i>E.SUBTER</i>	Escoamento subterrâneo	(mm)
<i>E.SUB_{efetivo}</i>	Escoamento subterrâneo que contribui para a fase canal do modelo	(mm)
<i>E.BACIA</i>	Escoamento da fase bacia	(mm)
<i>S_i</i>	Armazenamento do i-ésimo reservatório de propagação	(mm)
<i>A_{inc}</i>	Área incremental da sub-bacia	(km ²)
<i>A_{tot}</i>	Área total de contribuição para a vazão da sub-bacia	(km ²)
<i>Q_{mont}</i>	Vazão contribuinte de montante	(mm)
<i>Q_{mod}</i>	Vazão modelada	(mm)

Método de verificação de consistência da vazão

<i>dif</i>	Diferença entre os valores de vazão de dois dados consecutivos	(m ³ /s)
<i>vref</i>	Último dado consistente anterior ao dado em verificação	(m ³ /s)
<i>nd</i>	Quantidade de dados entre o dado em verificação e <i>vref</i>	(unid.)
<i>vp</i>	Variação de vazão permitida para <i>nd</i> dados à frente de <i>vref</i>	(m ³ /s)

Cálculo de propriedades média da bacia

<i>TPRUV</i>	Conjunto de dados utilizados no cálculo da evapotranspiração potencial: Temperatura (°C), Pressão atmosférica (mbar), Radiação solar incidente (W/m ²), Umidade relativa do ar (%), Velocidade do vento (m/s).	
<i>r⁻²</i>	Média ponderada pelo inverso da distância ao quadrado	
<i>Q_m</i>	Vazão anual média	(mm)
<i>P_m</i>	Precipitação anual média	(mm)

Cálculo das funções objetivo

<i>f1</i>	Função objetivo 1	(adim.)
<i>f2</i>	Função objetivo 2	(adim.)
<i>μ_{RES}</i>	Média do resíduo entre vazão observada e modelada	(m ³ /s)
<i>μ_{Qobs}</i>	Média da vazão observada	(m ³ /s)
<i>σ_{RES}</i>	Desvio-padrão do resíduo	(m ³ /s)
<i>σ_{Qobs}</i>	Desvio-padrão da vazão observada	(m ³ /s)
<i>Q_{mod}</i>	Vazão modelada em um determinado instante	(m ³ /s)
<i>Q_{obs}</i>	Vazão observada em um determinado instante	(m ³ /s)

Variáveis do *Downhill Simplex*

<i>it_{MAX}</i>	Número máximo de iterações no Simplex
<i>ILO</i>	Posição do melhor ponto no Simplex
<i>IHI</i>	Posição do pior ponto no Simplex
<i>INHI</i>	Posição do segundo pior ponto no Simplex
<i>pILO</i>	Melhor ponto do Simplex
<i>pIHI</i>	Pior ponto do Simplex
<i>pINHI</i>	Segundo pior ponto do Simplex
<i>psum</i>	Ponto no centróide do Simplex

pr	Ponto de reflexão do Simplex
pe	Ponto de extensão do Simplex
pc	Ponto de contração do Simplex
FO_{ILO}	Valor da função objetivo do melhor ponto
FO_{IHI}	Valor da função objetivo do pior ponto
FO_{INHI}	Valor da função objetivo para o segundo pior ponto do Simplex
FO_{pr}	Valor da função objetivo para o ponto de reflexão
FO_{pe}	Valor da função objetivo para o ponto de extensão
FO_{pc}	Valor da função objetivo para o ponto de contração
F_{TOL}	Tolerância da diferença ponderada entre FO_{IHI} e FO_{ILO} que indica convergência
R_{TOL}	Diferença ponderada entre FO_{IHI} e FO_{ILO}

Variáveis do Shuffled Complex Evolution

$dpcrit$	Porcentagem do desvio-padrão em relação a média que garante a convergência
K_{STOP}	Número máximo de ciclos de embaralhamento
p	Número de complexos
m	Número de pontos em cada complexo
n	Dimensão do ponto (nº de parâmetros do modelo)
s	Tamanho da população total
Ω	Espaço de busca (intervalo entre os limites dos parâmetros)
x_i	i-ésimo ponto $\{1 \leq i \leq s\}$
f_i	Valor da função objetivo para do i-ésimo ponto
D	Matriz ordenada de x_i, f_i
A^i	i-ésimo complexo $\{1 \leq i \leq p\}$
q	Número de pontos no sub-complexo
α	Número de evoluções no sub-complexo
β	Número de execuções de evolução do complexo
ρ_i	Probabilidade de seleção do i-ésimo ponto do complexo
u_i	i-ésimo ponto do sub-complexo $\{1 \leq i \leq q\}$
v_i	Valor da função objetivo para u_i
B	matriz ordenada de u_i, v_i
g	Ponto do centróide do sub-complexo em evolução
c	Ponto de contração
fc	Valor da função objetivo do ponto de contração
r	Ponto de reflexão
fr	Valor da função objetivo do ponto de reflexão
z	Ponto de mutação
fz	Valor da função objetivo do ponto de mutação
L	Vetor das posições dos pontos escolhidos do complexo para montar um sub-complexo

Avaliação estatística de desempenho

EMA	Erro médio absoluto	(m ³ /s)
EM^+	Erro médio positivo	(m ³ /s)
EM^-	Erro médio negativo	(m ³ /s)
REM_Q	Raiz do erro médio quadrático	(m ³ /s)
Q_{PREV}	Vazão prevista	(m ³ /s)
Q_{OBS}	Vazão observada	(m ³ /s)

r	Coeficiente de correlação linear de Pearson	(adim.)
e	Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe	(adim.)
NF	Número de vezes que a função objetivo foi calculada	(unid.)

Resumo

O município de União da Vitória - PR, sofre eventualmente com enchentes devido ao transbordo do rio Iguaçu. Alguns estudos sobre a região mostram que a represa da UHE Foz do Areia não pode operar na cota máxima de 742 m, sem a utilização de um bom sistema de previsão de vazões. Um sistema de previsão é composto basicamente de um processo de aquisição de dados hidrológicos (*e.g.* nível do rio e precipitação), seguido de verificação de consistência e substituição de dados espúrios. Estes dados são fornecidos como entrada de um modelo hidrológico, que simula a vazão na seção de interesse para um período futuro. Existem vários tipos de modelos hidrológicos que podem ser utilizados para esta tarefa. Contudo para este trabalho foi realizada uma comparação entre dois modelos do tipo conceitual chuva-vazão, o modelo Sacramento e o modelo 3R. Este tipo de modelo normalmente conta com um conjunto de parâmetros que devem ser ajustados a cada bacia hidrológica. Para facilitar esta tarefa foram testadas duas rotinas de otimização automática dos parâmetros, o método *Downhill Simplex* e o *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA). Estas rotinas buscam minimizar o valor de uma função objetivo, a qual pode interferir na qualidade dos parâmetros resultantes das rotinas. Neste trabalho foram analisados os resultados para duas funções objetivo distintas. Para verificar a consistência dos dados hidrológicos, foram desenvolvidos procedimentos baseados em verificação de limites climatológicos para os dados monitorados de chuva, vazão e dados meteorológicos envolvidos na estimação da evapotranspiração potencial. Além disso, foi desenvolvido um método de verificação automática com base na intensidade de variação, para os dados de vazão, sendo que ainda foi necessário uma verificação visual das séries temporais para eliminação satisfatória dos dados espúrios. A substituição destes dados foi feita através da média ponderada, dos dados de postos vizinhos, pelo inverso da distância ao quadrado, para os dados de precipitação e evapotranspiração potencial. Para os dados de vazão foram utilizadas interpolações lineares e *spline* cúbica. Os resultados apontaram que, no geral, ambas as rotinas de calibração automática obtêm conjuntos de parâmetros satisfatórios, porém o *Simplex* converge com uma quantidade reduzida de iterações, em comparação ao SCE-UA. Todavia, para o modelo de Sacramento, que conta com muitos parâmetros, melhores resultados foram obtidos pelo SCE-UA. Quanto aos sistemas de previsão propostos, não foi observado melhorias relevantes na previsão de cheias para o rio Iguaçu em União da Vitória. Isso provém, principalmente, da ausência de previsão de chuva média na bacia para o período de previsão. Outro fator limitante é a dificuldade de estimar corretamente a chuva média na bacia, a qual pode ser afetada por vários fatores, entre eles a densidade de estações pluviométricas.

Palavras-chave: União da Vitória, previsão de vazão, modelo hidrológico, otimização de parâmetros, qualidade de dados hidrológicos.

Abstract

The city of União da Vitória (State of Paraná, Brazil) is eventually struck by floods of Iguaçu river. Some studies show that the dam of the hydroelectric power station Foz do Areia can't be fulfilled without a good hydrological forecast system, because it influences at the river level in the city. A hydrologic forecast system is basically constituted by a process of data acquisition (*e. g.* water level and rainfall), followed by an automatic analysis of consistence and bad data replacement. This dataset is given as an input for a hydrologic model which simulates the river flow in the river section of interest to a future time. In this work a comparison between two conceptual rainfall-runoff models was realized, the Sacramento model and the 3R model. This kind of model usually has a group of parameters which is needed to be adjusted for the watershed characteristics. To make this task easy, two automatic optimization routines have been tested for calibration, the *Downhill Simplex's* method and the *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA). These routines try to minimize an objective function which can interfere at the quality of the optimized parameters. In this work, the results of two different functions have been analyzed. The consistence analysis of hydrologic monitored data was developed based on verification of climatologic limits. Besides, was developed a method for an automatic verification based on intensity variations of the river flow data, but was needed a visual verification of the temporal series for a satisfactory elimination of bad data. The replacement of bad data has been done by distance weighted average, for rainfall and potencial evapotranspiration data, and by linear and cubic spline interpolation for river flow data. The tests with optimization routines showed that both resulted on satisfactory groups of parameters, but the Simplex converged with less iterations than SCE-UA. However, better results were achieved by the SCE-UA, applying the Sacramento model, which has many parameters. As for the proposed forecast systems, any relevant improvement was observed for the flood forecast of the Iguaçu river at União da Vitória. This is originated, mainly, because the lack of mean rainfall in the forecast period. Other limiting factor is the hardness of correct mean rainfall estimation, which can be affected by many factors, among them the spatial density of rainfall gauges.

Keywords: União da Vitória, river flow forecast, hydrologic model, parameters optimization, quality of hydrologic data

1 Introdução

Os problemas gerados por uma inundação dependem fundamentalmente da forma e do grau de ocupação das áreas ribeirinhas e da frequência de ocorrências das cheias. Estas cheias podem ser naturais ou provocadas pela intervenção humana, sendo que as enchentes naturais em uma bacia hidrográfica ocorrem independentemente da intervenção humana. Entretanto os efeitos das cheias naturais podem ser atenuados ou ampliados em consequência da atuação antrópica, tais como a construção de barragens ou impermeabilização da superfície da bacia (CPRM, 2004).

Ao longo da história as populações procuraram se fixar às margens dos cursos d'água para facilitar o uso deste recurso que é fundamental à existência humana. Entretanto com o desenvolvimento acelerado das cidades, observado principalmente no século XX, as várzeas inundáveis foram ocupadas desordenadamente. Assim quando ocorre uma inundação, a ocupação inadequada das planícies pode ter como consequência grandes prejuízos materiais e perdas humanas consideráveis.

A convivência com as enchentes é possível a partir da implementação de medidas para controle da inundação que podem ser do tipo estrutural ou não estrutural. Essas medidas têm por objetivo minimizar as consequências das cheias e não controlar totalmente as inundações que é fisicamente e economicamente inviável em grande parte das situações (CPRM, 2004). As medidas estruturais são intervenções de engenharia que procuram reduzir o risco de ocorrência de enchentes. Podem ser medidas que atuam diretamente sobre o rio, tais como: diques, reservatórios, bacias de amortecimento, canais de desvio, etc. ou podem ser implementadas na bacia hidrográfica procurando alterar as relações entre as precipitações e as vazões como, por exemplo, a modificação da cobertura do solo para controle da erosão, além de retardar e diminuir os picos de hidrogramas de cheia. Já as medidas não estruturais têm por objetivo reduzir prejuízos através da melhor convivência da população com as cheias. De uma maneira geral essas medidas podem ser separadas nos seguintes grupos: edificações à prova de enchentes, seguro de enchente, previsão e alerta de inundação e zoneamento de áreas inundáveis (Cunha, 2004). A combinação destas medidas possibilita a redução dos efeitos das cheias e melhora o planejamento da ocupação da planície de inundação.

Como dito, no campo das medidas não estruturais encontra-se a adoção de um sistema de alerta de enchentes. Em tese um sistema deste tipo utiliza de ferramentas de modelagem hidro-meteorológicas, ajustadas e aplicadas à região onde se pretende alertar a população de

prováveis cheias num futuro próximo. Assim é possível tomar medidas emergenciais para a retirada de pessoas e mobilização de socorro nas áreas sob risco de enchente.

No estado do Paraná, uma região que é afetada por enchentes intensas é o município de União da Vitória, localizado a aproximadamente 200 km de Curitiba, na divisa com o estado de Santa Catarina. Este município ocupa uma grande faixa da região ribeirinha do rio Iguaçu, de modo que grandes aumentos no nível deste rio acarretam na inundação de uma extensa área do município. Além do próprio regime hidrológico da região, a construção da barragem da usina hidrelétrica de Foz do Areia, a 106 km a jusante de União da Vitória, interfere no nível do rio neste município. Devido ao efeito de remanso ocasionado pelo lago da barragem, as enchentes naturais podem ser agravadas.

Mine (1998) fez uma compilação de estudos sobre esta interferência do lago sobre o nível do rio Iguaçu. Em projeto, o reservatório operaria à cota máxima de 744 m, porém, a real operação neste nível afetaria consideravelmente o nível do rio Iguaçu em União da Vitória. Os pareceres mais recentes concluíram que o reservatório deve ser operado à cota de 742 m, para não ocasionar em aumentos significativos do nível do rio em União da Vitória, para cheias com tempo de recorrência menor que 100 anos. Em casos de grandes cheias, como a ocorrida em 1983, o reservatório pode ser rebaixado até à cota de 741,5 m, pois neste nível já não há interferências significativas para cheias de grande tempo de recorrência. Entretanto em um estudo de 1993, que utilizou uma série de monitoramento mais longa, indicou que as cheias ocorridas em 1983 e 1992, que provocaram grandes prejuízos ao município, deveriam ter tempos de retorno por volta de 300 anos, ao invés dos 1600 anos apontados nos estudos anteriores.

Entre as recomendações destes estudos está que, dada a capacidade do vertedouro da barragem, a barragem poderia ser operada à cota 742 m, desde que houvesse um bom sistema de previsão de afluentes. Mine (1998) abordou este tema em seu estudo, onde um modelo semi-conceitual para previsões de afluentes foi implementado para minizar o conflito entre geração de energia e controle de cheias. Seus resultados foram considerados muito bons, apontando que, para um horizonte de previsão de até 48 horas à frente, é possível realizar uma operação segura para a cota de 742 m. A autora sugere que a operação a cotas maiores também é possível se houver uma extensão no período de previsão, em conjunto com um método de previsão de precipitação na bacia hidrográfica.

Contudo a operação adequada do lago da UHE de Foz do Areia serve apenas para não agravar os efeitos de enchentes naturais, tendo sido recomendado a implementação de um sistema de previsão de vazão que fosse capaz de informar a população de União da Vitória

sobre os níveis previstos para várias horas futuras (Tucci, 1993, citado em Mine, 1998). Com vistas a minimizar os efeitos destas cheias a Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL), em parceria com o Instituto Tecnológico Simepar (SIMEPAR), vem desenvolvendo um sistema de previsão hidrológica a curto prazo para toda a bacia do rio Iguaçu, de modo que num futuro próximo os resultados obtidos por este sistema sejam utilizados como uma ferramenta de grande valor na detecção de eventos de cheias extremas.

Este sistema, denominado de Sistema de Previsão e Simulação Hidrológica do Iguaçu (SISPSHI), encontra-se em estágio operacional pelo SIMEPAR, entretanto o seu uso como ferramenta de alerta de enchentes ainda é restrito, pois tal sistema ainda não se encontra totalmente livre de certas inconsistências, tal como a utilização de dados espúrios do monitoramento de propriedades hidro-meteorológicas, ou devido a utilização de parâmetros dos modelos hidrológicos não condizentes com as características da bacia hidrográfica. Por isto as informações geradas atualmente pelo SISPSHI carecem sempre de uma avaliação, por parte de um agente com experiência em ciências hidrológicas.

Neste sentido, a motivação principal deste trabalho é obter um sistema cada vez melhor, que possa futuramente ser empregado com grande confiança na tomada de decisões sobre prováveis ocorrências de cheias intensas na região de União da Vitória.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é propor um sistema semelhante ao SISPSHI, operando até o município de União da Vitória, para a avaliação de resultados da previsão hidrológica, e detecção de mudanças na configuração do mesmo, que melhorem o desempenho do sistema existente.

Secundariamente podem-se listar os seguintes objetivos:

- Agrupar neste documento diversas informações sobre a área de estudo;
- Fixar um procedimento eficaz de identificação e preenchimento de falhas dos dados hidrológicos;
- Avaliar rotinas de calibração automática de modelos hidrológicos do tipo conceitual chuva-vazão;
- Analisar o desempenho do sistema para quatro novas configurações do sistema de previsão hidrológica, sendo estas configurações dadas pelas combinações entre dois

tipos de modelos hidrológicos e dois tipos de função objetivo no processo de calibração dos parâmetros;

- Sugerir alterações que visem melhorar o sistema atual, ou que devem ser consideradas em trabalhos futuros que também objetivem a melhoria do sistema de previsão hidrológico vigente.

1.2 Estrutura da dissertação

Este trabalho de dissertação está estruturado em cinco capítulos.

Neste primeiro capítulo, foi descrito uma introdução quanto à necessidade de utilizar sistemas de previsão hidrológica no alerta de enchentes, sendo posteriormente expostos os objetivos deste trabalho.

No segundo capítulo é feita uma descrição de alguns conceitos e elementos empregados neste trabalho, os quais são necessários para uma maior compreensão dos métodos utilizados neste trabalho. Em suma este capítulo apresenta alguns conceitos dos estudos em hidrologia, a descrição dos modelos hidrológicos utilizados, e a descrição dos métodos de calibração automática empregados no ajuste dos parâmetros destes modelos.

No terceiro capítulo são apresentados todos os métodos utilizados para alcançar os objetivos expostos na seção anterior. No terceiro capítulo encontra-se a descrição da rede telemétrica da qual se obteve os dados utilizados na etapa de modelagem hidrológica, os procedimentos de identificação e preenchimento de falhas, descrição detalhada da área de estudo, apresentação dos algoritmos das rotinas de calibração automática, e a descrição do modo de avaliação dos resultados.

O quarto capítulo consiste na apresentação e análise dos resultados, onde são avaliados, primeiramente, os métodos de calibração automática, buscando conhecer os pontos fortes e fracos de cada uma das rotinas propostas. Na sequência deste capítulo é realizada a análise dos resultados de cada uma das configurações propostas para o sistema de previsão hidrológica, sendo que tais resultados são sempre comparados aos obtidos pelo sistema que mais se assemelha ao atual sistema de previsão hidrológica em operação.

Finalizando o trabalho são apresentadas as conclusões sobre os resultados da pesquisa realizada no trabalho, e também a avaliação do cumprimento dos objetivos propostos neste capítulo. O capítulo final encerra-se com uma seção onde poderão ser propostas modificações no atual sistema de previsão hidrológica, prosseguindo com propostas de trabalhos futuros correlacionados à melhoria de sistemas deste tipo.

2 Revisão Bibliográfica

Expostas as motivações e objetivos deste trabalho, dá-se seqüência apresentando uma compilação geral sobre diversos conceitos envolvidos com a utilização de modelos hidrológicos, assim como o emprego destes para a previsão de vazões.

Cunha (2004) trabalhou em um sistema semelhante ao SISPSHI, porém aplicado à operação de reservatórios, na região do vale do rio Paraíba, entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Em seu trabalho há uma grande compilação sobre a evolução dos modelos hidrológicos, e também sobre suas utilizações em sistemas de previsão hidrológica. Sendo assim, boa parte deste capítulo estará baseada em seu trabalho, assim como suas citações bibliográficas. Uma outra etapa deste capítulo é a descrição do modelo em atual uso no SISPSHI, o modelo 3R, sendo que este foi alvo do tema de estudo de Krauskopf Neto (2005), de modo que também se utilizou deste estudo como base na descrição do modelo 3R.

Na seqüência se disserta sobre os métodos de calibração automática, pois este assunto também será bastante discutido neste trabalho, uma vez que uma boa calibração dos modelos hidrológicos também se configura como uma estratégia para melhoria de seus resultados.

2.1 Modelagem hidrológica

O emprego de modelos hidrológicos é de grande utilidade para gestores e planejadores de recursos hídricos, os quais fazem uso das estimativas de vazões futuras para diversos fins, entre eles a operação de reservatórios e prevenção das conseqüências de eventos extremos. Estes usos são importantes para que autoridades adotem esta ferramenta na tomada das decisões que visam o bem-estar da sociedade e conservação do meio ambiente (Burnash, 1995).

Basicamente, um modelo hidrológico utiliza-se de equações matemáticas, obtidas seja analiticamente ou empiricamente, que buscam representar diversos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, como escoamentos superficiais, subterrâneos e, em alguns casos, a evapotranspiração ocorrida. No modelo Sacramento, por exemplo, o escoamento superficial é computado como toda água excedente à capacidade de infiltração no solo, enquanto que o escoamento subterrâneo é contabilizado por uma simples equação linear, onde a água no solo é drenada a uma taxa (fração do volume) constante. A evapotranspiração ocorrida é função da

umidade relativa do solo e do dado de evapotranspiração potencial fornecido ao modelo. Todavia, a complexidade de tais processos é um ponto que dificulta a modelagem, sendo necessário simplificar muitos dos processos envolvidos no fluxo da água em uma bacia. Deste modo não há um modelo hidrológico padrão, sendo que a escolha de um determinado modelo se deve às suas características e ao uso que se fará dele, conforme será discutido mais a frente.

Esta simplificação dos modelos implica em mais um inconveniente, a generalização de parâmetros (constantes) nas equações. Normalmente as características dos processos hidrológicos variam de uma bacia para outra devido ao tipo de solo, inclinação do terreno e outros fatores, sendo que ainda é possível que em uma mesma bacia ocorram regiões com características diferentes entre si. Deste modo, é preciso realizar um ajuste dos valores dos parâmetros para cada bacia hidrológica. Este ajuste pode ser efetuado através da escolha por tentativa e erro ou então através do emprego de métodos de calibração automática, as quais vêm sendo desenvolvidas ao longo das últimas décadas (Duan, Sooroshian e Gupta, 1992).

2.1.1 Histórico

Tucci (1998) discorre sobre a evolução dos modelos hidrológicos considerando a existência de três etapas principais: até 1940, de 1940 até metade da década de 1960 e deste marco em diante. Na primeira etapa, a hidrologia consistia-se basicamente de estudos descritivos do ciclo hidrológico, raramente abordando a quantificação dos processos envolvidos, de modo que a modelagem de tais processos, quando modelados, era feita por métodos bastante simples. Posteriormente, com o avanço econômico pós segunda guerra mundial, os recursos hídricos disponíveis começaram a ser utilizados em grandes obras de engenharia e surgiu a necessidade de se quantificar estes recursos. Nesta etapa, houve um grande esforço de pesquisa voltado ao desenvolvimento de modelos e teorias matemáticas que estimassem os volumes de água envolvidos em cada processo do ciclo hidrológico.

A maioria dos modelos estudados buscava apenas representar componentes isolados do ciclo hidrológico, como o escoamento superficial, escoamento no canal, infiltração, evaporação, etc. Exemplos deste tipo de modelos são listados em Cunha (2004), dando destaque ao método racional, desenvolvido por Mulvaney em 1950, e ao Método do Hidrograma Unitário, desenvolvido por Sherman em 1932.

Posteriormente com o aumento da capacidade dos computadores e da acessibilidade a estes, é que se tornou possível integrar os modelos utilizados para representar cada componente do ciclo hidrológico. Assim, tornara-se possível a simulação do comportamento

de uma bacia hidrográfica como um todo. Em 1966, Linsley e Crawford (1966), citados em Thimotti (2003), apresentaram o modelo conceitual concentrado Stanford (*Stanford Watershed Model* – SWM), o qual foi provavelmente a primeira tentativa de integrar todos os processos do ciclo hidrológico. Simultaneamente, um grande número de modelos de menor abrangência foram apresentados, como por exemplo, o sistema HEC – 1 (*Hydrologic Engineering Center*, 1968), onde diversos modelos foram agrupados. Surgiram também modelos semidistribuídos, capazes de levar em consideração a variabilidade espacial dos processos hidrológicos, como o modelo Tank, desenvolvido por Sugawara em 1967 (Singh, 1995). Exemplos destes tipos de modelos também são listados em Cunha (2004).

O sucesso obtido pelo modelo de Stanford na previsão de vazão incentivou o desenvolvimento de diversos outros modelos conceituais concentrados durante os anos de 1970 e 1980, incluindo o modelo Sacramento, empregado atualmente pelo serviço meteorológico norte americano (*National Weather Service*, NWS), em simulações hidrológicas com vista à alertas de enchentes.

Atualmente há um grande conjunto de produtos tecnológicos que podem ser utilizados pelos modelos hidrológicos, tais como imagens de sensoriamento remoto e monitoramento por radar meteorológico. Ambos podem ser utilizados para melhorar estimativas de precipitação média na bacia, enquanto que o sensoriamento por satélite pode melhorar a caracterização do uso e ocupação do solo e fornecer modelos digitais de relevo mais detalhados. Sendo assim, um desafio da hidrologia atual é acoplar essas informações dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) aos processos representados nos modelos hidrológicos.

Embora haja uma maior diversidade de métodos para aquisição de dados hidrológicos, a implementação e uso destas tecnologias apresenta um custo elevado, de modo que países subdesenvolvidos ainda apresentam levantamentos precários das variáveis hidro-meteorológicas. No Brasil um dos grandes problemas encontrados na modelagem hidrológica reside no fato de não se dispor de dados hidrológicos em quantidade e qualidade adequadas, sendo estes insuficientes para descrever as principais características das bacias hidrográficas. Este problema normalmente dificulta o ajuste de modelos hidrológicos às características da bacia, uma vez que a calibração dos parâmetros é diretamente afetada pela consistência das séries dos dados hidrológicos (Cunha, 2004).

2.1.2 Principais modelos em uso

Diversos modelos se encontram em uso por todo o mundo. Como estes são utilizados para diferentes propósitos, suas estruturas variam significativamente em relação à modelagem de cada processo do ciclo hidrológico.

Nos Estados Unidos, o HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*), um sistema que abrange um grande número de processos, é considerado o modelo mais utilizado pelo setor privado, principalmente em projeto de sistemas de drenagem, quantificação dos efeitos decorrentes de mudança do uso do solo, etc. A NWS emprega o modelo Sacramento em seu sistema de previsão hidrológica, sendo que o Sacramento é considerado um dos principais modelos quando se trata de previsão de vazões e, por isso, foi escolhido para ser utilizado neste trabalho. O HSPF (*Hydrologic Simulation Program-Fortran*) e seus aplicativos de modelagem da qualidade da água são extensamente utilizados pela agência de proteção ambiental (EPA – *Environmental Protection Agency*). Quanto ao planejamento de recursos hídricos, um modelo bastante utilizado é o MMS (*Modular Modeling System*), especialmente aqueles executados sobre a supervisão do *U.S. Bureau of Reclamation* (Cunha, 2004).

No Canadá os modelos mais populares para simulação hidrológica são WATFLOOD e UBC (*University of British Columbia*) Watershed Model. Na Austrália, os modelos RORB (*Runoff Routing*) e WBN (*Waterbody Network*) são comumente utilizados na previsão de vazão, projetos de drenagem e avaliação de mudanças no uso do solo. Os modelos TOPMODEL e SHE (*Système Hydrologique Européen*) são utilizados na maioria dos países europeus, enquanto que no Japão são o ARNO, LCS e TOPKAPI (*TOPographic Kinematic APproximation and Integration*), e na China o modelo Xinanjiang (Singh, 1995).

No Brasil destaque-se o IPH II (Instituto de Pesquisas Hidráulicas), descrito por Tucci e Campana (1993) citado em Cunha (2004), e Tucci (1998), o qual é amplamente utilizado no ambiente acadêmico e institucional. Este modelo é aplicado em bacias que não necessitam de propagação no leito do rio ou que este efeito não seja importante no processo, uma vez que simula somente o escoamento na superfície da bacia. Em operação contínua encontram-se também os modelos utilizados pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) para otimização da operação dos reservatórios para geração elétrica, podendo-se destacar os modelos NEWAVE, NEWDESP e DECOMP (ONS, 2000, citado em Cunha, 2004).

2.1.3 Classificação dos modelos hidrológicos

Nas últimas quatro décadas um considerável número de pesquisas tem levado ao desenvolvimento de diversos modelos matemáticos, os quais apresentam características diferentes entre si. Tucci (1998) apresenta seis categorias de classificação para os modelos hidrológicos:

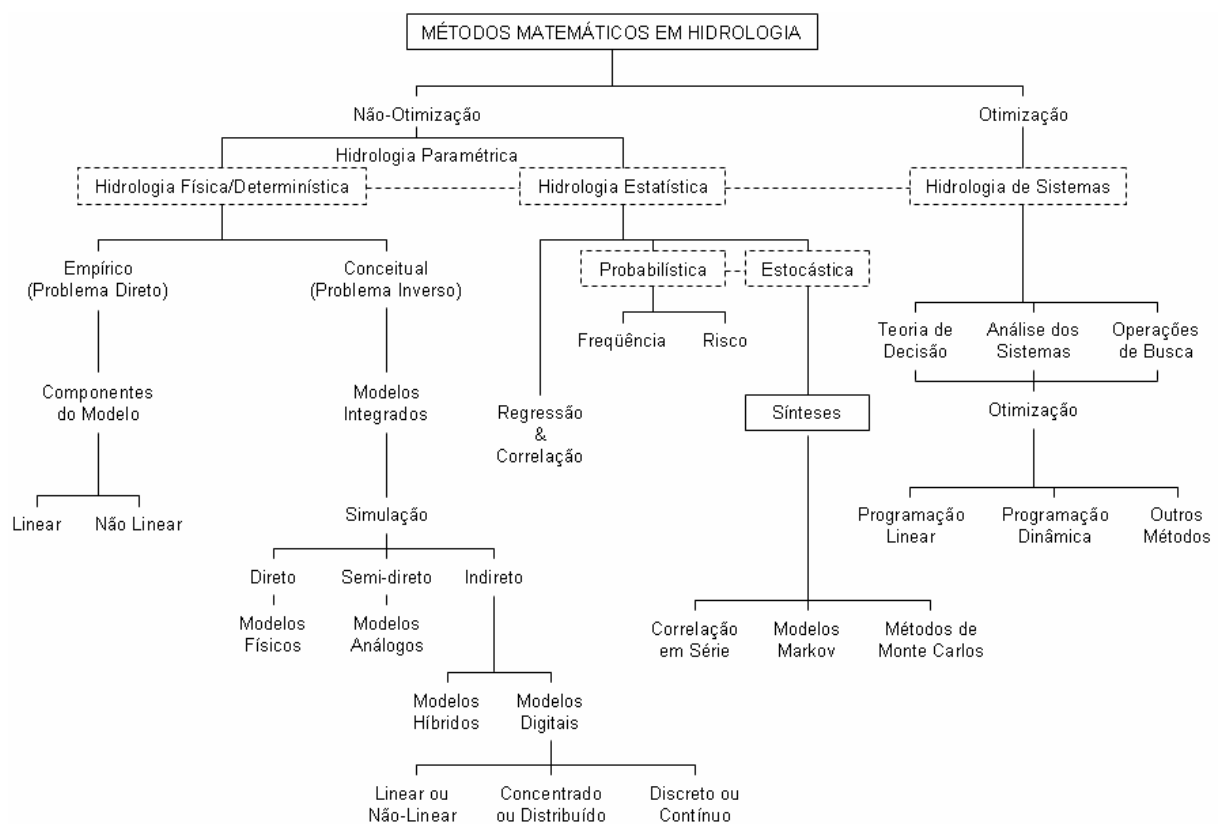
- a) Estocástico, determinístico ou híbrido: Refere-se ao tipo de variável utilizada pelo modelo. O modelo é dito estocástico quando pelo menos uma variável envolvida tem comportamento aleatório e é descrita no modelo por meio de uma distribuição de probabilidade. O modelo determinístico é aquele para o qual um determinado valor de entrada sempre produzirá o mesmo valor de saída, considerando o mesmo estado inicial do sistema, ainda que suas variáveis de entrada sejam aleatórias. Neste caso, os conceitos probabilísticos das variáveis são negligenciados. O modelo híbrido combina componentes determinísticos e estocásticos;
- b) Conceituais ou empíricos: Os modelos conceituais baseiam-se na representação dos processos físicos que envolvem o fenômeno estudado. Estes são subdivididos em semiconceituais e fisicamente fundamentados. O primeiro relaciona as características físicas do processo mantendo razoável empirismo na definição dos parâmetros e o segundo se aproxima bastante da física do sistema. Um modelo empírico é definido basicamente por uma equação matemática. A característica principal deste tipo de modelo consiste em estabelecer uma relação estável entre variáveis de entrada e saída, sem considerar neste processo quais leis físicas que governam o processo natural de transformação da chuva em vazão e, por isso, são também denominados de modelos “caixa-preta”;
- c) Concentrados ou distribuídos: Um modelo é dito concentrado quando seus parâmetros e variáveis variam somente em função do tempo, ou seja, não é levada em conta a variabilidade espacial na área considerada. Neste caso, os dados de entrada e saída são representativos de toda a sub-bacia modelada. São exemplos deste tipo de modelo: Fórmula racional, Modelo do Hidrograma Unitário, Modelo reservatório linear simples, Modelo Clark, Modelo NASH (*Storm response models of Nash*), Modelo de Armazenamento, Modelo de Tanque, Modelo HEC, Modelo Stanford e Modelo de Sacramento (Bae e Georgakakos, 1992, citado em Cunha, 2004). Os modelos distribuídos possuem a capacidade de representar a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica. Neste caso, as variáveis e parâmetros do

modelo dependem do tempo e do espaço. Os modelos distribuídos aplicam a lei da conservação de massa por célula da malha e utilizam como dado de entrada uma grande quantidade de informações que definem as características espaciais da bacia hidrográfica. Estes modelos fornecem como dado de saída o volume de escoamento em qualquer ponto do canal. Como exemplo deste tipo de modelo citam-se: Modelo da onda cinemática, Modelo de Fluxo saturado e não-saturado, Modelo hidrológico europeu – SHE. O modelo semi-distribuído representa uma bacia hidrográfica como um conjunto de sub-bacias. Como exemplo deste tipo de modelo pode-se citar os modelos Sacramento e TOPMODEL;

- d) Lineares e não lineares: Considerando a teoria estatística, um modelo é linear, se uma variável de saída, y , encontra-se associada à variável de entrada, x , por meio de uma equação linear do tipo $y = a + bx$. Como exemplo deste tipo de modelo pode-se citar os modelos de regressão. Segundo a teoria de sistemas, um sistema é dito linear quando o princípio da superposição é respeitado, ou seja, se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são variáveis de saída do modelo produzidas pelas entradas $x_1(t)$ e $x_2(t)$, respectivamente, a resposta a uma entrada $x_1(t) + x_2(t)$ será $y_1(t) + y_2(t)$. Desta forma, nem sempre os modelos classificados pela teoria estatística como lineares respeitam o princípio da superposição;
- e) Estacionários e não-estacionários: Os modelos são ditos estacionários quando os parâmetros permanecem constantes ao longo da simulação e não estacionários quando estes são atualizados. A atualização dos parâmetros se torna viável quando os fenômenos representados mudam de comportamento segundo certos intervalos de tempo definidos ou em modelos para a previsão de curto prazo;
- f) Contínuo ou discreto: Um modelo hidrológico é dito discreto (por evento) quando objetiva modelar períodos isolados da série, normalmente buscando representar eventos de cheia ou recessão. Os modelos contínuos buscam representar longos períodos da série, muitas vezes contemplando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes. Em decorrência disto, estes modelos apresentam estrutura mais detalhada, desenvolvida para simular com maior exatidão todas as fases do ciclo hidrológico. Mesmo os modelos contínuos no tempo apresentam discretização temporal, denominada passo de cálculo, pois muitas vezes os fenômenos do ciclo hidrológico são representados por equações diferenciais que não possuem solução analítica. A escolha do intervalo de tempo do modelo depende basicamente do fenômeno

estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados (Rennó e Soares, 2003, citado em Cunha, 2004).

Fleming (1975) apresenta uma classificação mais geral dos métodos matemáticos em hidrologia, conforme apresentado no esquema da Figura 2.1. Em comparação à classificação de Tucci (1998), nota-se uma diferença quanto à existência de hierarquia para a classificação, e a subdivisão dos métodos matemáticos entre dois grandes grupos, os métodos não-otimização e os métodos de otimização.



Adaptação: Fleming (1975)

Figura 2.1: Classificação dos métodos matemáticos em hidrologia

Os métodos de não-otimização são geralmente associados com a estimativa de dados hidrológicos e são usados para quantificar os processos físicos. Eles são necessários, em parte por causa da incapacidade de medição direta e existência de dados hidrológicos e meteorológicos, para definir os processos hidrológicos. O modelo *Stanford* é um exemplo desta abordagem. Já os métodos de otimização consideram o elemento da seleção. Eles utilizam dados sobre características físicas obtidas tanto por medição e métodos de estimativa não-otimização e associa isto com os objetivos para chegar a um plano viável. Alguns modelos de otimização relacionam estimativa física de recursos hídricos para necessidades

físicas para chegar a uma decisão sobre o planejamento destes recursos. Dentro desta categoria pode-se citar o *Trent Economic Model* (Fleming, 1975).

Os métodos incluídos em não-otimização podem ser subdivididos conforme a Figura 2.1 em hidrologia física e estatística. Aqui há uma forte sobreposição, mas essencialmente a classe física considera métodos que quantificam os processos considerados nos termos físicos, conceituais, empíricos e analíticos. A hidrologia estatística, portanto, por esta linha de pensamento inclui os métodos de regressão, correlação, e teoria de probabilidade. O termo *hidrologia paramétrica (parametric hydrology)* foi proposto pelo Comitê sobre Hidrologia de Água Superficial da Sociedade Americana de Engenheiros Civis, e pode ser visto como uma incorporação de ambas subdivisões acima (Fleming, 1975).

Uma forte interação entre métodos físicos e estatísticos, retratado pelas linhas pontilhadas na Figura 2.1, existe principalmente porque os processos envolvidos no ciclo hidrológico são em parte causais e em parte aleatórios. Por isso, alguns modelos físicos contêm funções aleatórias para relacionar processos e alguns modelos estatísticos contêm funções causais ou determinísticas como parte de suas estruturas. Esta interação também inclui a subsequente análise da informação ganha pelos diferentes modelos. Por exemplo, um modelo determinístico utilizando princípios conceituais do ciclo hidrológico pode ser usado na produção de um registro de vazão em uma estação de monitoramento. Este registro pode então ser pós-processado por métodos estatísticos para produzir uma curva de frequência de cheias no local. Por outro lado, um método estatístico envolvendo a geração de dados de chuva por modelos estocásticos, poderia produzir dados que seriam direcionados ao uso como informação de entrada para um modelo. Técnicas como estas ajudam a construir um retrato do regime hidrológico da área de contribuição, e os engenheiros e tomadores de decisão podem, portanto, ter uma informação mais compreensiva que leve a uma decisão mais significativa (Fleming, 1975).

Dentro da classificação de modelos estocásticos existem subdivisões dos métodos para tratar as séries temporais. Os modelos estocásticos consistem, basicamente, em uma equação de recorrência, que utilizam informações passadas da série temporal na estimativa para comportamentos futuros da série (Mine, 1984). Esta equação de recorrência é que define o tipo de modelo estocástico, podendo ser um modelo médias-móveis de ordem q , $MA(q)$, auto-regressivo de ordem p , $AR(p)$, ou a combinação destes dois métodos em um modelo auto-regressivo médias-móveis, $ARMA(p,q)$. Modelos *ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average)*, também denominado Box-Jenkins, são uma alternativa para modelar séries temporais não-estacionárias. Esses modelos são baseados no princípio da parcimônia, ou seja,

procuram representar uma série temporal utilizando um número mínimo de parâmetros (Mine, 1984; Maidment, 1992; Valença, 2005). Há ainda vários outros tipos de modelos estocásticos como o GAR (*Gamma autoregressive*) (Maidment, 1992), e de regressão logística (Valença, 2005). Contudo mais recentemente os modelos ditos de Redes Neurais vêm se destacando, pois podem utilizar vários componentes estocásticos, além de um sistema de tomada de decisões sobre qual o melhor método a usar para uma determinada situação. Um bom exemplo da elaboração e aplicação de redes neurais pode ser encontrado em Machado (2005).

De modo geral estes métodos estocásticos podem ser subdivididos em modelos univariados e modelos multivariados. Os modelos univariados baseiam-se na análise de uma única série temporal, enquanto que os modelos multivariados utilizam mais de uma série temporal nos prognósticos de vazão ou precipitação ou outro componente hidrológico (Valença, 2005).

2.1.4 Seleção

Segundo Tucci (1998), a escolha do modelo hidrológico a ser aplicado deve ser realizada tendo em vista os seguintes aspectos:

- a) Objetivos do estudo: este critério visa definir o grau de detalhamento que se pretende atingir, o qual reflete no grau de detalhamento do modelo a ser aplicado. Modelos para previsão em tempo real, por exemplo, exigem previsões executadas com rapidez e alta acurácia entre a série prevista e a observada. Por outro lado, modelos para extensão de séries de vazão devem procurar representar as características estatísticas da série produzida;
- b) Características físicas e climáticas da área de estudo: neste caso, deve-se analisar a variabilidade espacial e temporal das características da bacia, sendo que o modelo aplicado deve ser capaz de reproduzir estas características, mesmo que de maneira simplificada;
- c) Disponibilidade de dados: alguns modelos exigem uma grande quantidade de dados monitorados para estimativa de seus parâmetros, sendo que a indisponibilidade destes dados impossibilita sua utilização. Por outro lado, existem modelos que exigem um pequeno número de parâmetros a serem calibrados, e podem ser utilizados em áreas com falta de dados;

- d) Familiaridade com o modelo: o conhecimento do usuário a respeito do modelo utilizado e dos parâmetros a serem estimados tende a reduzir as incertezas na aplicação deste.

Com base nestas informações, a opção por modelos conceituais chuva-vazão pode ser considerada uma boa escolha, uma vez que o objetivo é a simulação em curto prazo (horas ou poucos dias) da vazão de um rio, dispondo-se apenas de dados hidro-meteorológicos e dada a necessidade de uma representação fiel dos resultados em relação aos dados observados. O SISPSHI emprega o modelo 3R, que é um modelo conceitual chuva-vazão, e por isto, a escolha de um segundo modelo deste tipo, para atender ao mesmo objetivo, facilita a comparação entre os resultados, de modo que eventuais diferenças nas séries simuladas podem estar correlacionadas à diferença na representação de algum processo hidrológico.

2.2 Modelo conceitual chuva-vazão

Modelos conceituais chuva-vazão têm sido desenvolvidos para representar, de maneira realista, os sub-processos e relações envolvidas no processo chuva-vazão. Embora esses modelos variem significativamente quanto ao grau de complexidade, precisão e quantidade de parâmetros utilizados, eles possuem características essencialmente comuns, as quais serão apresentadas nesta subseção.

A estrutura dos modelos conceituais busca representar os mecanismos físicos que governam uma bacia hidrográfica (infiltração, interceptação, percolação, evaporação, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo). Normalmente estes são representados em duas fases distintas: uma primeira, denominada “fase bacia”, em que o balanço hídrico é realizado ao nível do solo e o escoamento superficial resultante é calculado; e uma segunda, denominada “fase canal”, em que essa vazão é propagada ao longo dos cursos d'água, até a seção de controle da bacia hidrográfica.

A fase bacia é o ponto mais importante na diferenciação dos diversos modelos hidrológicos existentes. Ela expressa o balanço hídrico da bacia hidrográfica, definindo a parcela do volume de água precipitada que será evaporada, absorvida pelo solo, ficará retida na superfície (interceptação ou armazenamento superficial) ou será destinada ao escoamento superficial. Neste tipo de modelo também é comum tratar separadamente o volume de escoamentos superficial e subterrâneo, por apresentarem processos físicos bastante distintos.

Outra importante razão para a separação dos escoamentos é tornar possível a estimativa do volume de água nas diversas camadas do solo, possibilitando estimar com maior precisão a contribuição do fluxo de base durante períodos secos e úmidos.

Após realizar o balanço hídrico na fase bacia, a vazão correspondente à soma dos componentes de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo é propagada até a seção de controle da bacia hidrográfica, através da fase canal do modelo. Os modelos de propagação se baseiam na equação de continuidade e da quantidade de movimento e podem ser classificados como (Tucci, 1998):

- a) Armazenamento: consideram a atenuação e o deslocamento, produzidos pelo armazenamento na calha do rio, desprezando os efeitos da equação de quantidade de movimento;
- b) Onda cinemática: utilizam a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento na sua formulação, desprezando, no entanto, os termos de pressão e de inércia;
- c) Difusão: este modelo não despreza os efeitos de pressão da equação de quantidade de movimento, permitindo avaliar o efeito de jusante sobre o escoamento proveniente de montante;
- d) Hidrodinâmico: estes modelos, além da equação da continuidade, consideram todos os termos da equação de quantidade de movimento. É importante quando ocorrem grandes variações temporais e espaciais da velocidade no sistema.

Ao contrário da fase bacia, a fase de propagação não diferencia significativamente os modelos hidrológicos conceituais que, tipicamente, adotam procedimentos mais simples, baseados em modelos de armazenamento ou de onda cinemática.

2.2.1 Etapas de modelagem

As etapas principais para a implementação de um modelo hidrológico integrante de um sistema de previsão de vazões são:

- a) Divisão em sub-bacias: de acordo com as características físicas e hidrológicas da área, disponibilidade de estações telemétricas e localização das obras hidráulicas; criação da base de dados históricos com análise de consistência e seleção de séries simultâneas de chuva e vazão, para a calibração do modelo hidrológico. Quando existem reservatórios

e/ou obras hidráulicas há a necessidade de dados operativos para determinação da vazão nos pontos de controle;

- b) Organização da estrutura do modelo: a modelagem chuva-vazão é aplicada para cada sub-bacia e modelos de propagação de cheias são aplicados para os segmentos que conectam as sub-bacias. Quando a área apresenta reservatórios ou estruturas hidráulicas de controle, há a necessidade de se quantificar a vazão através do balanço hídrico.
- c) Calibração: os parâmetros do modelo são ajustados de modo que a série de vazão simulada aproxime-se à série observada. A busca do melhor conjunto de parâmetros pode se dar de duas maneiras: manual e automática. Na primeira o operador do modelo escolhe um conjunto inicial de parâmetros e altera seus valores conforme um critério subjetivo, ou de análise estatística. Na segunda opção emprega-se uma rotina de busca automática do melhor conjunto de parâmetros, através da minimização de uma determinada função, como o erro médio quadrático, por exemplo;
- d) Verificação: após a seleção do conjunto de parâmetros, deve-se testá-los em um período distinto do utilizado na calibração, para garantir que o conjunto selecionado esteja realmente de acordo com o esperado pelo operador do modelo. Novamente esta comparação pode dar-se de modo subjetivo, por análise visual de gráfico vazão observada *versus* vazão modelada, por exemplo, ou por análise de índices estatísticos, como uma tolerância do erro médio.

O processo de calibração dos parâmetros do modelo é muito importante, principalmente em modelos conceituais chuva-vazão, devido justamente à grande quantidade de parâmetros que estes apresentam. Entretanto, como parte do objetivo deste trabalho é avaliar rotinas de calibração automática, uma maior discussão acerca deste assunto será feita em seções posteriores.

Posto então uma análise geral de modelos chuva-vazão conceituais, dar-se-á seqüência a este trabalho descrevendo o modelo Sacramento e o modelo 3R, utilizados neste trabalho.

2.3 Modelo Sacramento – Soil Moisture Accounting

O modelo Sacramento – *Soil Moisture Accounting* (SAC-SMA), ou simplesmente Sacramento, é um dos modelos conceituais chuva-vazão mais utilizados no mundo para a

simulação de vazão em curta escala de tempo (Cunha, 2004). Este modelo, na verdade, consiste somente da fase bacia, ficando por conta do operador a escolha de um método de propagação. Sua base teórica envolve vários processos hidrológicos, além de apresentar uma certa hierarquia destes processos, e disto implica o grande número de parâmetros necessários por este modelo.

O advento do SAC-SMA ocorreu pela necessidade, por parte do Serviço Meteorológico Americano (NWS), em prover alertas públicos sobre condições hidrológicas adversas nos Estados Unidos. Sua primeira versão foi desenvolvida por Robert J. C. Burnash e colaboradores, em 1973, sendo posteriormente modificado por outros estudiosos para fins diversos (Cunha, 2004). A versão do Sacramento, utilizada neste trabalho, encontra-se disponível na página *web* do NWS (NWS, 2007), com o código fonte em linguagem fortran 77.

O modelo de Sacramento foi desenvolvido com o objetivo de estimar de forma efetiva a vazão na exutória da bacia hidrográfica, utilizando como dados de entrada a precipitação e a evapotranspiração média na bacia. Estes dados, em conjunto com parâmetros que descrevem as características físicas da bacia, são processados através de equações matemáticas que representam os processos do ciclo hidrológico e que geram o escoamento fluvial resultante.

Durante o desenvolvimento do modelo os autores consideraram alguns aspectos importantes quando se trata de um modelo hidrológico a ser utilizado operacionalmente. Primeiramente, buscou-se desenvolver um modelo conceitual, ou seja, que levasse em consideração as características físicas dos fenômenos modelados. Os autores acreditavam que desta forma as alterações nos parâmetros do modelo devido a alterações nas características morfológicas das bacias poderiam ser realizadas de maneira racional. Esta característica foi confirmada durante a operacionalização do sistema de previsão, quando grandes queimadas alteraram drasticamente as características de escoamento na bacia e, mesmo assim, foi possível modelar as alterações resultantes antes que os eventos hidrológicos ocorressem (Burnash, 1995).

Por ser um modelo conceitual, seu uso apropriado requer total entendimento dos mecanismos básicos do ciclo hidrológico. A falta deste entendimento pode levar ao uso inadequado dos componentes do sistema para representar fenômenos para os quais eles não foram criados, compensando erros decorrentes da baixa qualidade dos dados ou da estimativa inadequada dos parâmetros do modelo.

Outra preocupação dos autores durante o desenvolvimento foi que a grande complexidade envolvida na descrição detalhada de todos os processos físicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, limitaria a aplicação da metodologia em um sistema de previsão

operacional para grandes áreas. No esforço de simplificar o modelo, os autores se concentraram nos processos que claramente interferem na geração do escoamento fluvial, tornando possível implementar o modelo sem a necessidade de uma grande quantidade de dados e cálculos.

Outra característica importante é que, por se tratar de um modelo matemático e determinístico, a sua operacionalização em um sistema de previsão de vazão requer a existência de uma rede de coleta de dados hidrológicos em tempo real. Isso se deve ao fato do volume de escoamento superficial resultante de um evento de precipitação não ser função apenas do volume precipitado, mas do estado inicial de umidade da bacia hidrográfica. Este é determinado através das variáveis de estado do modelo, as quais são atualizadas para cada intervalo de tempo, dando um parecer a respeito do estado atual de umidade da bacia e do seu histórico. A atualização é realizada através de dados observados de chuva, evapotranspiração potencial, e da vazão proveniente de montante caso se trate de uma sub-bacia interna. Deve-se observar que a qualidade dos dados monitorados é de grande importância no processo de modelagem da bacia.

2.3.1 Embasamento teórico do SAC-SMA

Com base em Burnash e Ferral (1996), é apresentada a estruturação do modelo conforme os conceitos hidrológicos empregados. Os autores dividem esta etapa em: (i) definição de água de tensão superficial e água livre; (ii) armazenamentos em zona superior e inferior; (iii) distribuição da umidade e escoamento subsuperficial; (iv) percolação; (v) escoamento de base e drenagem subterrânea; (vi) escoamento direto e superficial; (vii) evapotranspiração. Todos os parâmetros deste modelo, assim como suas unidades, estão listados na Tabela 2.1.

O modo mais simples de visualizar os componentes básicos do modelo Sacramento é começar não pela vazão, mas pela manta de solo. Se fosse examinado um bloco da manta de solo, o qual tivesse sido cuidadosamente isolado em um container, poder-se-ia observar importantes características depois que o bloco de solo passasse por ciclos sucessivos de secagem e umedecimento. Se a vegetação do solo pudesse secar naturalmente, terminar-se-ia com um certo peso de material dentro deste container. Este material conteria uma pequena quantidade de umidade residual. Deste modo, se poderia dizer que é praticamente impossível remover a umidade restante sob qualquer condição atmosférica, e que portanto, é satisfatória a suposição de que há uma pequena parcela natural de umidade residual em qualquer ambiente

em particular. Este nível representa o limite mínimo de umidade, onde a água presente no solo está tão próxima das partículas de solo que ela geralmente se torna indisponível para o uso por plantas ou para evaporação na atmosfera. Em termos de estimativa da umidade do solo, esta umidade pode ser considerada como permanente no solo e, por causa disto, não precisa ser incluída na estimativa daqueles componentes que variam com o tempo.

Se o bloco de solo fosse lentamente umedecido, se observaria uma capacidade substancial de absorção sem vazamento do bloco. Este volume é geralmente da ordem de 15% da magnitude do peso, embora isto varie dependendo do tipo de solo. Este volume adicional representa a umidade que é atraída pelo déficit de umidade das partículas de solo de maneira tão forte que ela só pode ser removida por evaporação ou evapotranspiração. No modelo Sacramento, assim como na maioria das análises de solo, este volume é identificado como água de tensão superficial. Entretanto, uma vez que a demanda de água por tensão superficial tenha sido satisfeita, ainda se encontraria dentro do bloco de solo, muitos vazios nos espaços entre as partículas de solo, os quais podem estar temporariamente preenchidos por água que eventualmente seria drenada para fora do bloco. Este volume de água, que não está ligado à superfície das partículas de solo, mas preencheria o bloco de solo, é identificada como água livre. Estes componentes, água de tensão superficial e água livre, são os blocos de construção básicos do modelo Sacramento.

Burnash e Ferral (1996) comentam que o problema então é representá-los de um modo computacional efetivo, que permitisse que as características de percolação e drenagem servissem como importantes controles dos processos de escoamento superficial. Para alcançar este objetivo, se faz necessário dividir a manta de solo e, conseqüentemente, a água de tensão superficial e a água livre em zonas superior e inferior. Todavia, um número infinito de zonas poderia ser estabelecido, sendo que o objetivo de qualquer parametrização em modelos hidrológicos é usar somente o necessário para descrever efetivamente o sistema físico.

Supondo-se que a coluna de solo representa uma simples bacia hidrográfica, então a zona superior de água de tensão superficial está restrita ao volume de água que pode ser adicionado ao solo seco sem que ocorra vazamento para a superfície ou pelas bordas da bacia. No modelo de Sacramento este volume é definido pelo parâmetro *UZTWM*. Esta água que vaza do solo é aquela que, juntamente com a fração do escoamento superficial que ocorre devido à chuva em áreas da bacia permanentemente impermeáveis, é drenada diretamente para os canais dos corpos hídricos da bacia. A área que se encontra permanentemente impermeabilizada é representada pelo parâmetro *PCTIM* do modelo.

Outro componente da umidade na camada superior da manta de solo, é aquele que pode mover-se lateralmente através do solo, provendo o escoamento sub-superficial, ou então verticalmente para os níveis mais profundos do solo como o umedecimento pela frente de umedecimento. O volume de água utilizado para este fim é uma porção da água livre e é identificado pela sua posição física como zona superior de água livre, representado pelo parâmetro *UZFWM*.

Mais profundamente na manta de solo, os dois componentes de água também devem ser considerados. A água da tensão superficial na zona inferior é aquele volume remanescente de água de tensão superficial que deve ser necessariamente preenchida para satisfazer os requerimentos de umidade baseado na força de atração molecular entre solos secos e umidade, mas não incluindo qualquer água livre nos espaços entre as moléculas de solo. Tal volume é representado pelo parâmetro *LZTWM*.

A água livre da zona inferior, a qual ocupa os espaços vazios do solo abaixo da zona superior de água livre, é considerada para o abastecimento dos reservatórios dos quais é gerado o escoamento de base. Supõe-se que a drenagem da zona inferior de água livre ocorra seguindo a lei de Darcy, ou seja, o volume de água drenada é igual a condutividade hidráulica vezes a força que causa o movimento da água. No modelo de Sacramento, a constante de condutividade é multiplicada pelo volume de água livre residual como uma representação desta lei. Entretanto esta suposição, infelizmente, não permite a variedade das recessões do escoamento de base que são observados na natureza (Burnash e Ferral, 1996). Contudo, considerando a existência de dois tipos de zona inferior de água livre – um tipo primário que drena lentamente, provendo escoamento de base por longos períodos de tempo, e um segundo tipo que suplementa o escoamento de base após um período de precipitação relativamente recente – então é possível combinar as duas regiões inferiores de água livre, primária e suplementar, cada uma drenando independentemente da outra de acordo com a lei de Darcy, de tal maneira que seja possível uma variação das variedades das condições do escoamento de base encontrado na natureza.

O problema agora é como utilizar estes armazenamentos para definir a distribuição de umidade e os processos de escoamento superficial, que acompanham tempestades de magnitudes diferentes, ocorrendo em uma determinada bacia hidrográfica. A transferência destes conceitos para uma bacia hidrográfica e o desenvolvimento da lógica periférica necessária para a simulação dos processos de percolação e escoamento superficial, partindo destes conceitos, estão ilustrados na Figura 2.2.

Quando se observa a chuva sobre uma bacia, deve-se necessariamente considerar duas áreas básicas da bacia: (i) a porção permeável da manta de solo; (ii) a porção impermeável da manta de solo coberta pelos canais, superfícies de lagos, pântanos e outros materiais impermeáveis diretamente ligados à rede de canais hídricos. A área permeável produz escoamento superficial quando a taxa de precipitação é suficientemente alta, enquanto que a área impermeável produz um escoamento direto, não importando o volume de água precipitada.

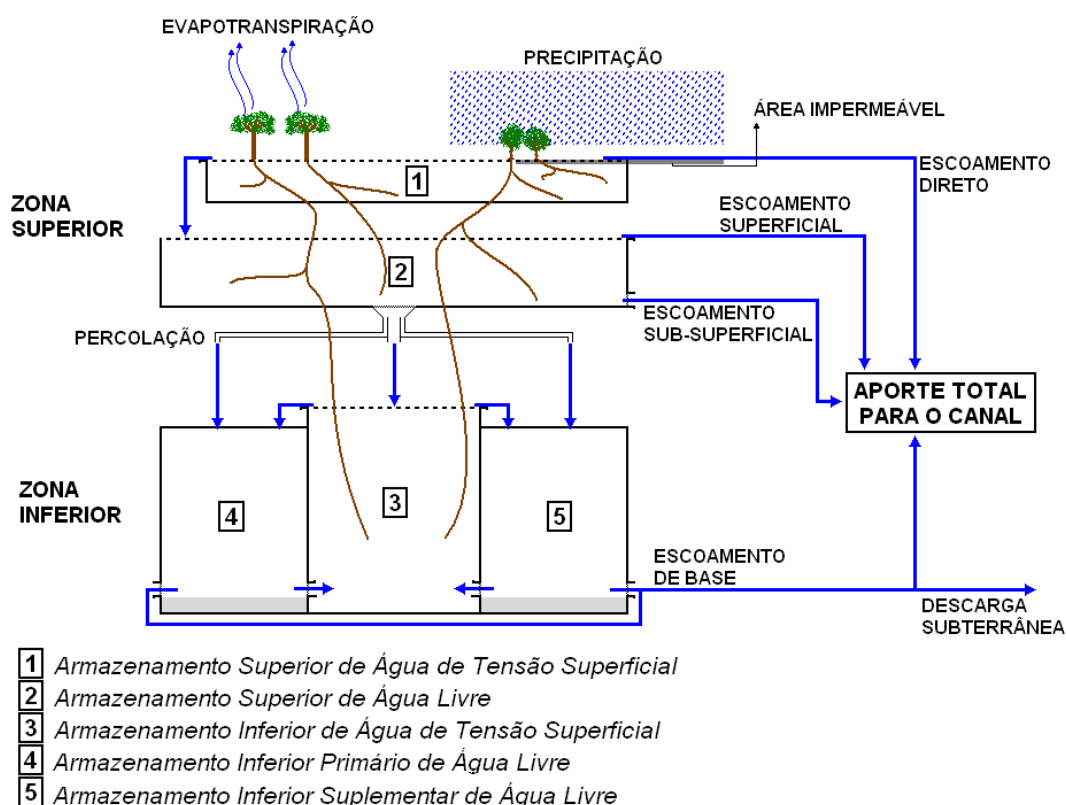


Figura 2.2: Ilustração dos componentes hidrológicos do modelo Sacramento

Na porção permeável da bacia, o modelo representa o armazenamento inicial de umidade no solo identificado como zona superior de tensão superficial, como um volume que deve ser totalmente preenchido antes da umidade se tornar disponível para entrar em outros armazenamentos. A zona superior de tensão superficial representa o volume de precipitação que seria necessário, sob condições de solo seco, para satisfazer as necessidades de interceptação e para fornecer umidade suficiente à manta superior de solo para que a percolação para zonas profundas, e em algumas vezes a drenagem lateral, possa começar a ocorrer. Esta condição é consistente com as conclusões de Bodman e Coleman (1994), citado em Burnash e Ferral (1996), de que é necessário que a umidade, na porção rasa do solo,

aumente até um valor mínimo da frente de molhamento, para que haja o umedecimento das zonas secas mais profundas e também movimentação lateral. Quando a zona superior de água de tensão superficial é preenchida, o excesso de umidade acima da capacidade desta zona é temporariamente acumulado na zona superior de água livre. Esta água livre é aquela presente nos poros do solo, mas que não está retida nas partículas, e pode mover-se devido à força da gravidade. Apesar da água livre estar presente durante o enchimento da zona superior de água de tensão superficial, não é necessário considerá-la, pois ela é rapidamente transformada em água de tensão superficial da zona superior, antes que a necessidade de água dessa zona seja satisfeita. Uma vez que a zona superior de água de tensão superficial esteja satisfeita, a água presente na zona superior de água livre estará disponível para descer a porções mais profundas da manta de solo ou para mover-se lateralmente através do solo em resposta as forças gravitacionais e de diferença de pressão. Assim, o armazenamento da zona superior de água livre fornece o recurso hídrico para a percolação para zonas inferiores e para o escoamento sub-superficial. Este escoamento sub-superficial provém da movimentação lateral da água que é adicionado ao componente de vazão da bacia hidrográfica.

A zona superior de água livre tem então duas funções, o potencial horizontal de gerar escoamento sub-superficial e, mais significativamente, um potencial vertical que varia conforme a quantidade de água disponível na zona superior. O escoamento sub-superficial é proporcional à quantidade de água livre disponível na zona superior, após contabilizada a percolação:

$$\text{Escoamento sub-superficial} = UZK \times UZFWC, \quad \text{mm dia}^{-1} \quad (2.1)$$

onde UZK é o coeficiente de depleção lateral do armazenamento da zona superior de água livre e, $UZFWC$ é a volume (coluna d'água) presente neste armazenamento.

A taxa de drenagem vertical, ou percolação para solos profundos, é computada antes da estimativa do escoamento sub-superficial. Ela é controlada pelo conteúdo da zona superior de água livre e pela deficiência de umidade das zonas inferiores. O caminho preferencial da água livre superior é considerado o movimento descendente de percolação. O fluxo horizontal em forma de escoamento sub-superficial ocorre somente quando a taxa de precipitação excede a taxa de movimentação descendente que pode ocorrer da zona superior de água livre. Quando a taxa de precipitação excede a taxa de percolação e a capacidade máxima de drenagem por escoamento sub-superficial, a zona superior de água livre é preenchida completamente e o excesso de precipitação irá resultar em escoamento superficial. Sob este sistema, o escoamento superficial é extremamente dependente da taxa de volume, com a taxa de

escoamento superficial sendo determinada pela aplicação da taxa de precipitação e pelo grau de aridez das zonas inferiores. A fim de descrever o conceito completo de percolação, é necessário primeiramente completar a visualização das zonas inferiores.

O volume da zona inferior de água de tensão superficial é pela água presa aos solos da zona inferior após molhamento e drenagem que está geralmente disponível para evapotranspiração. Os dois armazenamentos das zonas inferiores de água livre, primário e suplementar, representam aqueles volumes que estão disponíveis para drenagem como escoamento de base ou descarga subterrânea que não aparece no canal. Estes armazenamentos de água livre se enchem simultaneamente pela água percolada e drenam independentemente a taxas diferentes, gerando uma variedade de recessões da água subterrânea.

Os mecanismos da percolação neste sistema foram designados para corresponder a características observadas do movimento da umidade através da manta de solo, incluindo a formação e transmissão de características da frente de molhamento, como relatado por Green *et al.* (1970) e Hanks *et al.* (1969), citados em Burnash e Ferral (1996). Os mecanismos da transferência da zona superior de água livre para a zona inferior são baseados na estimativa da demanda de percolação da zona inferior. Quando a zona inferior esta totalmente saturada, então a percolação para a zona inferior deve ser limitada à água que drena para fora desta zona. Esta limitação da taxa de drenagem é calculada como a soma dos produtos dos armazenamentos das duas zonas inferiores de água livre por suas respectivas taxas de drenagem. Esta taxa de limitação da taxa de drenagem vinda da combinação da saturação dos armazenamentos da zona inferior é definida como *PBASE*:

$$PBASE = LZFSM \times LZSK + LZFPM \times LZPK, \quad \text{mm dia}^{-1} \quad (2.2)$$

onde *LZFSM* é o armazenamento máximo da zona inferior de água livre suplementar, que é a capacidade máxima de armazenamento para drenagem rápida por escoamento de base, e *LZSK* é o coeficiente de depleção deste armazenamento suplementar. *LZFPM* é o armazenamento máximo da zona inferior de água livre primária, que é a capacidade máxima de armazenamento para drenagem lenta por escoamento de base, e *LZPK* é o coeficiente de depleção deste armazenamento primário.

Após os períodos secos, entretanto, podem ocorrer taxas de percolação muito maiores. Supondo-se que exista um limite superior de percolação, então ele pode ser definido como sendo igual a:

$$\text{Capacidade máxima de percolação} = PBASE \times (1 + ZPERC), \quad \text{mm dia}^{-1} \quad (2.3)$$

onde $ZPERC$ provê o múltiplo necessário para aumentar a percolação potencial do valor mínimo, $PBASE$, para o valor máximo, $PBASE \times (1 + ZPERC)$. Se forem seguidos os moldes estabelecidos pelos inúmeros experimentos de percolação, a percolação máxima ocorre quando a zona superior está saturada e a zona inferior está seca, assim a percolação máxima demandada pela zona inferior (mm dia^{-1}) pode ser posta como:

$$\text{Máxima percolação demandada pela zona inferior} = PBASE \left(1 + ZPERC \left(\frac{\text{Deficiência da zona inferior}}{\text{Capacidade da zona inferior}} \right) \right), \quad (2.4)$$

sob esta condição, a deficiência e a capacidade são idênticas. Novamente, seguindo os resultados dos experimentos de infiltração, verificou-se que a mudança na demanda de percolação da zona inferior está exponencialmente relacionada com a proporção (*deficiência da zona inferior / capacidade da zona inferior*). Deste modo, chega-se a equação da demanda de percolação (mm dia^{-1}) com a variação da umidade no solo:

$$\text{Percolação demandada} = PBASE \left(1 + ZPERC \left(\frac{\sum \text{Deficiências da zona inferior}}{\sum \text{Capacidades da zona inferior}} \right)^{REXP} \right), \quad (2.5)$$

onde $REXP$ é o expoente que assegura a variação exponencial da percolação demandada. O somatório das capacidades da zona inferior é simplesmente a soma dos três armazenamentos máximos da zona inferior, o de água de tensão superficial, mais o de água livre primário e suplementar. O somatório das deficiências seria o somatório das capacidades máximas, menos o volume atual dos três reservatórios juntos.

A percolação atual deve, entretanto, também ser controlada pelo suprimento de água disponível para percolação na zona superior de água livre. Consequentemente, a demanda efetiva deve ser modificada por uma função do suprimento disponível de modo que defina a percolação atual da seguinte maneira:

$$\text{Percolação} = \text{Percolação demandada} \times \left(\frac{UZFWC}{UZFWM} \right). \quad \text{mm dia}^{-1} \quad (2.6)$$

Os somatórios das capacidades das zonas inferiores e seus conteúdos incluem tanto a água de tensão superficial como a água livre. Assim, a percolação é definida como uma relação entre as características de drenagem e as condições de umidade do solo. Num evento em que o processo de molhamento venha a ser descontínuo, uma perda da umidade da zona superior de água de tensão superficial através de evapotranspiração e pela água drenada da zona superior de água livre, poderia requerer um volume inicial a ser repostado antes de retornar

ao processo de percolação. Este rápido re-preenchimento corresponde ao aumento temporário na infiltração observada durante experimentos de infiltração descontínua.

O volume que percolou para a zona inferior é dividido entre os três armazenamentos de umidade do solo. O primeiro destes, zona inferior de água de tensão superficial, representa o volume de umidade nos solos inferiores que é reivindicado pelas partículas de solo secas quando a umidade de uma frente de molhamento atinge sua profundidade. As deficiências de água da tensão superficial estão associadas com a força de sucção, assim eles tendem a absorver toda a água percolada até que estas deficiências sejam satisfeitas. Entretanto, variações nas condições do solo e quantidade de chuva sobre uma bacia de drenagem causam variações da condição média. O efeito destas variações é aproximado no modelo pelo desvio de uma fração da água percolada para os armazenamentos da zona inferior de água livre antes que as deficiências da zona inferior de água de tensão superficial estejam completamente satisfeitas. Uma constante, P_{FREE} , é utilizada para expressar a separação fracional. Examinando a Figura 2.2 percebe-se que a água que percola da zona superior de água livre para a zona inferior pode ir totalmente para a água de tensão superficial ou alguma fração da água percolada pode se tornar disponível para os armazenamentos primário e suplementar. Em qualquer momento em que o armazenamento da zona inferior de água de tensão superficial esteja preenchido, a percolação continua sendo dividida entre os dois armazenamentos de água livre da zona inferior. A todo o momento, a água que se torna disponível para os armazenamentos primário e suplementar é distribuída entre eles em resposta a suas deficiências relativas e suas capacidades relativas. As zonas inferiores de água livre representam aqueles volumes que produzem fluxo lateral geralmente considerado como sendo escoamento de base.

O uso de três componentes de água livre, um na zona superior e dois na zona inferior, permite a geração de uma larga variedade de recessões e é geralmente consistente com as características da vazão observada. O escoamento de base é o resultado da combinação das drenagens lineares dos reservatórios de armazenamento das duas zonas inferiores de água livre, de tal forma que o escoamento de base seja igual a:

$$\text{Escoamento de base} = V1 \times FD1 + V2 \times FD2, \quad \text{mm dia}^{-1} \quad (2.7)$$

onde $V1$ e $V2$ são os volumes dos armazenamentos de água livre da zona inferior primária e suplementar respectivamente, enquanto que as variáveis $FD1$ e $FD2$ representam os fatores de drenagem para cada reservatório.

A aproximação do escoamento de base oriundo de dois armazenamentos de água livre da zona inferior, com funções de saída fixas, permite a integração das recessões observadas e o cálculo dos volumes de água livre com os quais estão associados. As características do escoamento de base primário são estimadas conforme:

$$K_p = (QP_t / QP_0)^{1/t}, \quad \text{dia}^{-1} \quad (2.8)$$

$$LZPK = 1 - K_p, \quad \text{dia}^{-1} \quad (2.9)$$

$$LZFPM = QP_{max} / LZPK, \quad \text{mm} \quad (2.10)$$

onde K_p é o coeficiente de recessão do escoamento de base primário na unidade de tempo utilizada, horas no caso deste trabalho; t é o número de passos de tempo; QP_0 é a descarga quando a recessão está ocorrendo à taxa primária; QP_t é a descarga após t passos de tempo; e QP_{max} é o valor máximo do escoamento de base primário que pode ser inferido da análise da hidrógrafa.

A análise dos outros volumes de água livre é similar. Entretanto é necessariamente um tanto mais complexa, porque recessões observadas a altas taxas de descarga podem incluir componentes da vazão de dois ou três dos armazenamentos de água livre.

Se as condições naturais dos limites de uma bacia permitissem que toda a umidade aplicada deixasse a bacia, somente pela seção de medição ou através de evapotranspiração, então estas divisões da umidade do solo seriam adequadas para descrever a disposição da água líquida aplicada na superfície do solo (Burnash e Ferral, 1996). Entretanto, a drenagem sub-superficial transpassa a seção de medição em muitas bacias. Tentando aproximar este efeito em uma bacia em particular, é suposto que aqueles solos drenados por aquíferos que não deságuam no canal fluvial interno da bacia têm as mesmas características básicas de drenagem que aqueles solos que drenam para o canal fluvial. Assim, os volumes dos armazenamentos da zona inferior de água livre que fornecem tais fluxos sub-superficiais podem ser expressos como uma fração dos volumes aparentes do armazenamento da zona inferior de água livre integrados na vazão do canal fluvial das hidrógrafas. O parâmetro *SIDE* representa esta fração no modelo. Estes volumes devem existir na bacia em adição aos volumes que serão observados através da hidrógrafa de vazão superficial.

O escoamento para os canais da bacia é o resultado da precipitação processada através de um algoritmo representando a camada de solo mais elevada e solos inferiores. Este algoritmo produz o escoamento para canal de cinco formas básicas. São estes:

- Escoamento direto de áreas permanentemente impermeabilizadas e escoamento direto de áreas temporariamente impermeabilizadas;
- Escoamento superficial que ocorre quando o armazenamento da zona superior de água livre é completado e a intensidade da precipitação excede a taxa de percolação e de escoamento sub-superficial;
- Escoamento sub-superficial resultante da drenagem lateral do armazenamento da zona superior de água livre;
- Escoamento de base primário.

A primeira e a segunda forma de escoamento em superfície fluem com características semelhantes, enquanto que o fluxo de cada uma dos demais componentes apresentam características diferentes, o que pode ser avaliado a partir de análise da hidrógrafa.

Deve-se notar que a área impermeável da bacia não é uma área constante neste modelo, pois tem sido observado em muitas bacias que, coincidentemente com o preenchimento dos armazenamentos de água de tensão superficial, uma fração crescente da bacia pode assumir características de área impermeável. Esta fração, a área impermeabilizada adicional, representada pelo parâmetro *ADIMP* no modelo, fornece uma boa representatividade do preenchimento de pequenos reservatórios, pântanos e áreas temporariamente infiltráveis que apresentam características de impermeabilidade quando a manta de solo fica encharcada.

A evaporação da área coberta por água ou por vegetação ciliar é computada à taxa potencial, ou seja, supõe que o solo sob mata ciliar esteja sempre encharcado. A porção da área coberta por esta vegetação é dada pelo parâmetro *RIVA*, no Sacramento. Sobre outras porções da manta de solo a evapotranspiração efetiva varia tanto com a demanda de evapotranspiração quanto com o volume e distribuição do armazenamento de água de tensão superficial.

Na camada superior do solo, a evapotranspiração é definida como a parcela da evapotranspiração potencial proporcional ao volume de água da tensão superficial armazenado nesta camada, conforme a equação (2.11). No caso do armazenamento de água de tensão ser insuficiente para atender à demanda de evapotranspiração, ocorre fluxo do reservatório de água livre para o de água de tensão superficial para atender à demanda. Outra forma de interpretar este comportamento seria a de que a camada superior de solo é responsável por atender à demanda de evapotranspiração, com a prioridade de atendimento sendo do reservatório de água de tensão superficial:

$$EVT_{sup} = EVTP \frac{UZTWC}{UZTWM}, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.11)$$

onde EVT_{sup} é volume de demanda de evapotranspiração para a camada superior de solo, e $EVTP$ é a evapotranspiração potencial, que deve ser fornecida ao modelo.

Na camada inferior do solo a evapotranspiração efetiva é definida como a parcela da evapotranspiração potencial deduzida da evapotranspiração da camada superior do solo e proporcional à relação entre o volume armazenado no reservatório de água de tensão superficial da camada inferior e a capacidade total dos reservatórios de água de tensão superficial do modelo. Esta relação é representada pela equação (2.12). O déficit no atendimento desta demanda gera fluxos dos reservatórios de água livre para o de água de tensão superficial, para atendimento do déficit. Estes fluxos são proporcionais aos volumes armazenados:

$$EVT_{inf} = (EVTP - EVT_{sup}) \frac{LZTWC}{UZTWM + LZTWM}, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.12)$$

onde EVT_{inf} é volume de demanda de evapotranspiração para a camada inferior de solo. Nesta camada é definida uma parcela do volume dos reservatórios de água livre que não estaria disponível para atendimento da demanda de evapotranspiração, pois encontra-se a uma profundidade abaixo das raízes da vegetação, suficiente também para a não ser perdida por evaporação (Krauskopf Neto, 2006). Esta parcela esta definida no modelo pelo parâmetro $RSERV$.

Exposta a forma de contabilidade da evapotranspiração, encerra-se a descrição do modelo Sacramento, que pode ser resumido pelo esquema da Figura 2.3.

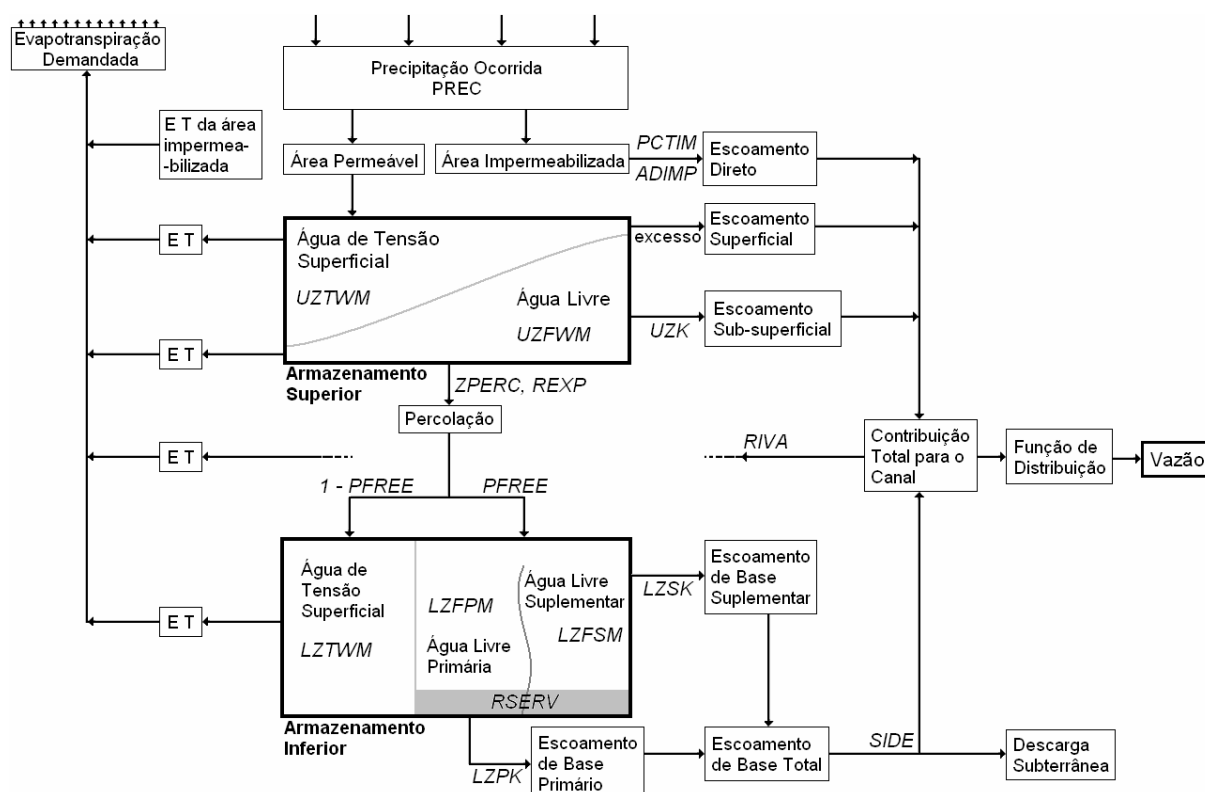


Figura 2.3: Apresentação esquemática do modelo Sacramento

Observando o esquema da Figura 2.3, nota-se que o modelo conta com 16 parâmetros ao todo, os quais são descritos no quadro da Tabela 2.1. Este número de parâmetros pode ser considerado alto, se comparado a outros modelos conceituais chuva-vazão existentes (Gan, Dlamini e Biftu, 1997), o que dificulta a realização de um bom ajuste do modelo Sacramento aos dados da bacia em estudo.

Como dito no início desta seção, o modelo Sacramento concebe somente a fase de escoamentos que ocorrem na bacia, sendo que a escolha de um algoritmo de propagação destes escoamentos ao longo do canal fluvial fica a critério do operador. Posto isso, adotou-se como método de propagação, o mesmo adotado no modelo 3R, de reservatórios conceituais, o qual será descrito na próxima seção.

Tabela 2.1: Descrição dos parâmetros da fase bacia do modelo Sacramento

Parâmetro	Descrição	Unidade
<i>UZTWM</i>	Capacidade máxima do armazenamento superior de água de tensão superficial	mm
<i>UZFWM</i>	Capacidade máxima do armazenamento superior de água livre	mm
<i>LZTWM</i>	Capacidade máxima do armazenamento inferior de água de tensão superficial	mm
<i>LZFPM</i>	Capacidade máxima do armazenamento inferior primário de água livre	mm
<i>LZFSM</i>	Capacidade máxima do armazenamento inferior suplementar de água livre	mm
<i>UZK</i>	Taxa de depleção lateral da zona superior de água livre	dia ⁻¹
<i>LZPK</i>	Expoente da equação da percolação	dia ⁻¹
<i>LZSK</i>	Expoente da equação da evapotranspiração ocorrida no armazenamento inferior	dia ⁻¹
<i>PCTIM</i>	Fração de área constantemente impermeável na bacia	fração
<i>ADIMP</i>	Área impermeável adicional	fração
<i>PFREE</i>	Fração da água percolada da zona superior que vai direto para a zona de água livre inferior	fração
<i>ZPERC</i>	Taxa máxima de percolação	–
<i>REXP</i>	Expoente da equação de percolação	–
<i>RSERV</i>	Fração da água livre da zona inferior que não é transferível para a zona de água de tensão superficial	fração
<i>RIVA</i>	Fração de área coberta por mata ciliar na bacia	fração
<i>SIDE</i>	Fração do escoamento de base que compõe a perda de base	–

2.4 Modelo 3R

A denominação deste modelo provém das iniciais dos nomes, em inglês, dos componentes principais do modelo hidrológico: *Rainfall – Runoff – Routing*. Esta composição pode ser traduzida como: Chuva – Escoamentos na bacia – Propagação, porém a literatura refere-se a este modelo normalmente pela sigla: 3R.

O modelo 3R foi concebido como uma simplificação do modelo Sacramento Modificado (Georgakakos *et al.*, 1988, citado em Krauskopf Neto, 2005). O Sacramento Modificado consiste basicamente na adaptação do algoritmo do modelo de Sacramento para

uma formulação de estados, que teve por finalidade o acoplamento de um estimador de estado ao modelo hidrológico. A simplificação do equacionamento para concepção do 3R foi destinada à aplicação em problemas onde a escala espacial e temporal da simulação são maiores, ou seja, maiores bacias e maiores intervalos de simulação. Estes fatores reduzem a vantagem de uma representação muito detalhada de alguns processos hidrológicos (Krauskopf Neto, 2005). O 3R também mantém a característica do Sacramento Modificado de ser formulado em espaço de estados, desta maneira mantendo a capacidade de aplicação do estimador de estado associado ao modelo. Quanto à classificação do 3R, o mesmo pode ser classificado como um modelo hidrológico determinístico, conceitual e espacialmente semidistribuído.

Contudo, antes de ser formulado para aplicação semidistribuída, o modelo foi concebido como concentrado, para aplicações apenas em bacias de cabeceira (Guetter *et al.*, 1996). Posteriormente ele foi adaptado para funcionar como semidistribuído. Nesta versão semidistribuída, é definida uma rede de canais que, ao longo de seu percurso, recebem contribuições de sub-bacias hidrográficas, cada uma simulada pela mesma estrutura da representação concentrada. A Figura 2.4 representa um exemplo de modelagem de uma bacia de forma semidistribuída. Esta alteração no modelo significaria, em tese, a inclusão de um algoritmo adicional de propagação, para representar a propagação em canal. No entanto, com o intuito de simplificar a estrutura do modelo, atribuiu-se ao componente de propagação disponível na fase bacia a responsabilidade de representar, também, a propagação em canal (Krauskopf Neto, 2005). Com isto, o modelo conta com apenas um esquema de propagação de vazões, compartilhado pelas fases bacia e canal, responsável tanto pela propagação das vazões geradas internamente à cada sub-bacia como pela propagação em canal das contribuições das sub-bacias de montante. Este fato está representado na Figura 2.5, que apresenta a estrutura do modelo 3R.

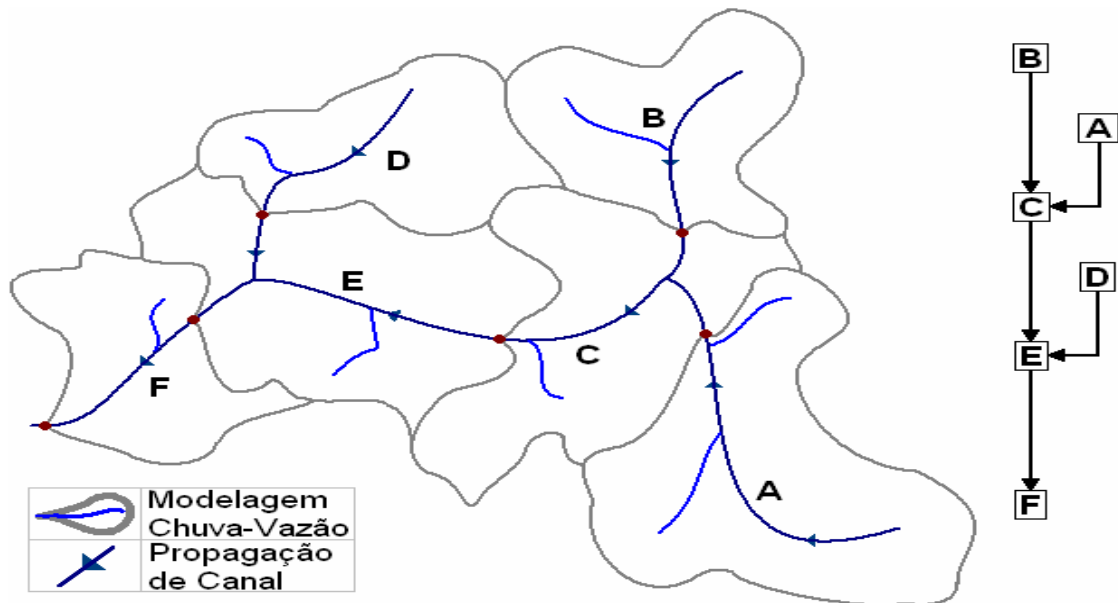


Figura 2.4: Modelagem semidistribuída de uma bacia hidrográfica

Krauskopf Neto (2005) descreve o modelo 3R segundo vários aspectos, no intuito de construir uma imagem completa dele, sendo estes aspectos: estrutura básica, fluxos gerados, parâmetros, variáveis de estado e principais componentes do modelo conceitual. Nesta descrição, a componente de propagação será descrito na fase canal do modelo.

2.4.1 Fase Bacia

As grandes simplificações em estrutura do modelo 3R, em relação aos modelos Sacramento e Sacramento modificado, consistem na representação de cada camada de solo por um único reservatório não-linear e na utilização de uma única cascata de reservatórios não-lineares para representar tanto o processo de propagação dos fluxos na fase bacia como a propagação em canal. Estas alterações simplificam sobremaneira a formulação do modelo, mas, por outro lado, diminuem sua capacidade de representação. A estrutura do modelo 3R é apresentada na Figura 2.5.

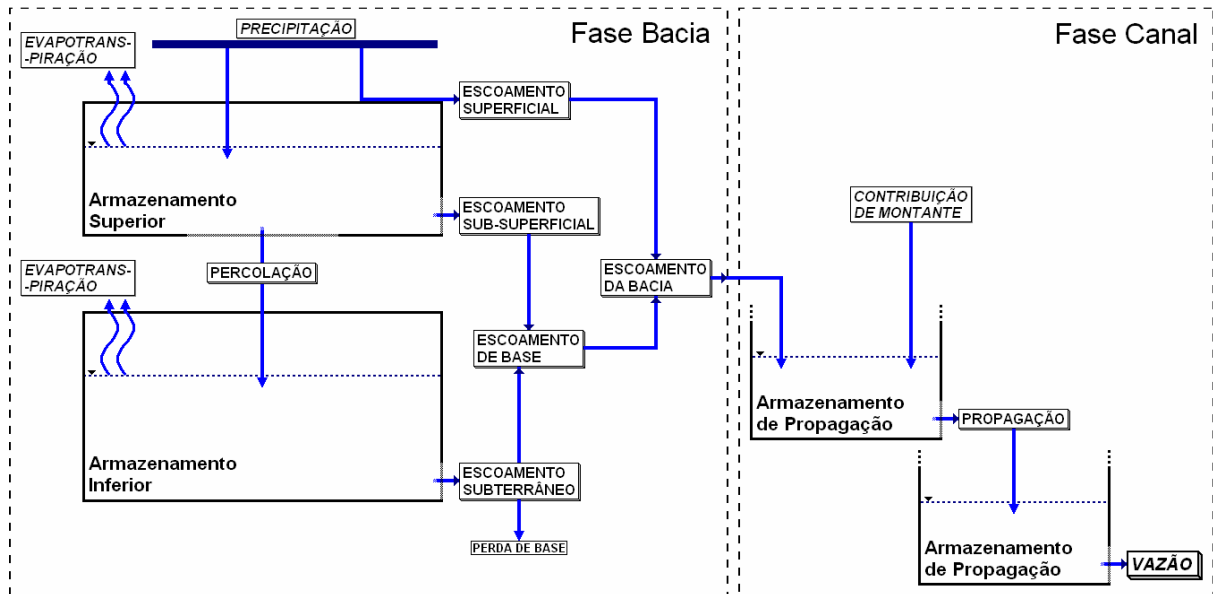


Figura 2.5: Apresentação esquemática do modelo 3R

A camada superior do solo representa os fenômenos de balanço de água que ocorrem na porção rasa do terreno, como a interceptação ou abstração inicial, caracterizando também a reprodução dos processos mais dinâmicos da bacia, menor tempo de resposta. No modelo 3R, esta camada é modelada por um reservatório não-linear, denominado de reservatório da camada superior de solo, que é responsável pela separação dos volumes de água que compõem o escoamento superficial, escoamento subsuperficial, percolação e uma parcela da evapotranspiração. Este reservatório é alimentado pela precipitação e deplecionado pelos fluxos anteriormente citados.

A camada inferior representa o armazenamento subterrâneo e a maior parcela da umidade presente no solo, modelando os fenômenos de variação mais lenta e maior duração no processo hidrológico. O reservatório da camada inferior do solo também é representado por um reservatório não-linear. Ele é alimentado pela percolação proveniente do reservatório da camada superior e gera, como fluxos de saída, o escoamento do subsolo e uma parcela da evapotranspiração ocorrida.

A propagação dos fluxos do modelo é de responsabilidade de um único componente, constituído por uma cascata de reservatórios não-lineares, que recebe as contribuições dos fluxos da fase bacia (superficial, subsuperficial e de base) e das sub-bacias de montante e gera a vazão propagada na exutória da sub-bacia.

No equacionamento do modelo 3R, o armazenamento máximo dos reservatórios das zonas superior e inferior são identificados, respectivamente, pelas variáveis X_1^0 e X_2^0 , enquanto que o volume presente em um dado momento nestes reservatórios é dado por X_1 e

X_2 . Note que o modelo 3R utiliza somente um reservatório para cada zona do solo, de modo que os armazenamentos máximos $UZTWM$, $UZFWM$, do modelo Sacramento estão relacionados ao parâmetro X_1^0 do 3R, e da mesma forma $LZTWM$, $LZFPM$ e $LZFSM$ estão relacionados ao parâmetro X_2^0 .

Em termos de fluxos de entrada e saída, cada sub-bacia apresenta uma entrada: chuva média na bacia; e três saídas: escoamento da bacia, evapotranspiração e perda de base. O fluxo de entrada, a precipitação, é processada pelo modelo e segregada em quatro fluxos da camada superior do solo: (i) escoamento superficial, que consiste na parcela da precipitação que não infiltra no solo ou que retorna, em algum ponto da bacia, à superfície e por ela escoar até atingir o canal; (ii) percolação, que consiste no fluxo da camada superior do solo para a inferior; (iii) escoamento subsuperficial, gerado por uma proporção fixa do volume do reservatório superior de água; (iv) evapotranspiração, resultado da evaporação da água presente no solo e da transpiração da vegetação sobre a bacia.

No reservatório inferior há também um único fluxo de entrada, a percolação, enquanto que a umidade presente nesta região é perdida por evapotranspiração e pela drenagem que gera o escoamento subterrâneo. Assim o fluxo entrada, volume percolado da zona superior para a inferior, é contabilizado pelo 3R na geração de três fluxos: (i) fração do escoamento subterrâneo que transforma-se em escoamento de base, dado pelo volume drenado da zona inferior que aporta para o canal fluvial da bacia; (ii) fração do escoamento subterrâneo que transforma-se em perda de base, que é o do volume da drenagem da zona inferior que não contribui para o volume do canal; (iii) transpiração, que consiste em uma parcela da evapotranspiração potencial que não foi atendida pela evapotranspiração ocorrida na camada superior.

Conceitualmente há ainda a agregação do escoamento subterrâneo que contribui para o canal com o escoamento subsuperficial, gerando o escoamento de base. Este escoamento juntamente com o escoamento superficial forma o escoamento da bacia.

O modelo conceitual da fase bacia do 3R é apresentado como um conjunto de equações diferenciais ordinárias, permitindo sua integração em qualquer escala de intervalo de tempo. O modelo é apresentado como equações que representam as taxas de variação no tempo de cada reservatório. Isto significa que o modelo é representado no espaço de estados, ou seja, o armazenamento dos reservatórios e fluxos são funções do tempo, o que será considerado implícito nas equações apresentadas abaixo. Os armazenamentos de água e fluxos associados a um instante t são definidos em função dos estado do instante $t-1$. Para a

fase bacia do modelo 3R, tem-se então a variação dos armazenamentos superior, X_1 , e inferior, X_2 , conforme:

$$\frac{dX_1}{dt} = PREC - E.SUPERF - E.SUBSUP - PERCOL - EVTP_{SUP}, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.13)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = PERCOL - E.SUBTER - EVTP_{INF}, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.14)$$

onde $PREC$ é a precipitação média na bacia, $E.SUPERF$ é o escoamento superficial, $E.SUBSUP$ é o escoamento subsuperficial, $PERCOL$ é a percolação, $E.SUBTER$ é o escoamento subterrâneo, $EVTP_{SUP}$ e $EVTP_{INF}$ é a evapotranspiração ocorrida na zona superior e inferior, respectivamente. Estes fluxos considerados nas equações (2.13) e (2.14) estão definidos nas equações (2.15) à (2.20), sendo calculados sempre em altura de coluna da água por unidade de tempo, sendo no caso deste trabalho dados em mm/h:

$$E.SUPERF = PREC \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1}, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.15)$$

$$E.SUBSUP = C_1 X_1, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.16)$$

$$PERCOL = C_2 X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0}, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.17)$$

$$E.SUBTER = C_2 X_2, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.18)$$

$$EVT_{SUP} = EVTP \frac{X_1}{X_1^0}, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.19)$$

$$EVT_{INF} = (EVTP - EVT_{SUP}) \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3}, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.20)$$

onde $EVTP$ é o dado de entrada de evapotranspiração potencial, enquanto que as demais variáveis são os parâmetros do modelo 3R, listados no quadro da Tabela 2.2.

O modelo 3R também conta com um fluxo de perda de base, que representa a fração do escoamento subterrâneo que deixa a bacia sem atingir o canal fluvial. O fluxo de água que de fato aporta para o canal, denotado por $E.SUB_{efetivo}$, é então calculado como:

$$E.SUB_{efetivo} = \frac{E.SUBTER}{1 + \varepsilon}, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.21)$$

sendo ε também um dos parâmetros do 3R, descrito na Tabela 2.2.

Portanto o fluxo de umidade da bacia para o canal, definido por $E.BACIA$, é a soma dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo efetivo, tal como:

$$E.BACIA = E.SUPERF + E.SUBSUP + E.SUB_{efetivo} \cdot \text{mm h}^{-1} \quad (2.22)$$

Tabela 2.2: Descrição dos parâmetros da fase bacia do modelo 3R

Parâmetro	Descrição	Unidade
X_1^0	Capacidade máxima do armazenamento superior do solo	mm
X_2^0	Capacidade máxima do armazenamento inferior do solo	mm
C_1	Taxa de drenagem lateral do reservatório superior	hora ⁻¹
C_2	Taxa de drenagem lateral do reservatório inferior	hora ⁻¹
C_3	Máxima percolação possível, dado como múltiplo da demanda de percolação mínima ($C_2 X_2$)	—
m_1	Expoente da equação do escoamento superficial	—
m_2	Expoente da equação da percolação	—
m_3	Expoente da equação da evapotranspiração ocorrida no armazenamento inferior	—
ε	Porção do escoamento de base que compõe a perda de base	—

2.4.2 Fase Canal

A contribuição da sub-bacia sendo modelada (escoamentos superficial e subsuperficial e parte do escoamento do subsolo), resultante do balanço de água no solo, é somada com as contribuições das bacias de montante e alimentam um canal, onde o volume de água sofre um processo de propagação, isto é, é distribuído no tempo e no espaço. Esta distribuição é feita por uma cascata de reservatórios não-lineares, conforme proposto por Mein *et al.* (1974) e formulado para o espaço de estados por Georgakakos e Brás (1980), segundo Krauskopf Neto (2005). O resultado da propagação das contribuições da sub-bacia e de montante para o canal gera o fluxo identificado neste trabalho como vazão propagada. A fase canal do modelo 3R está identificada na Figura 2.4.

Na formulação proposta, cada trecho de canal associado a uma sub-bacia é dividido em uma série de tramos, cada um sendo representado pela seguinte relação, com a dependência temporal implícita:

$$V_i = \beta S_i^\eta, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.23)$$

onde V_i é a descarga do i -ésimo tramo do canal, S_i o armazenamento do tramo i , β e η são parâmetros à serem ajustados para a bacia em simulação.

Esta formulação leva ao estabelecimento de uma relação cota-vazão unívoca para o trecho, indicativo de um modelo de propagação do tipo onda cinemática. O modelo de onda cinemática é derivado das equações de Saint Vénant (Maidment, 1992), equações (2.24) e (2.25), que representam a conservação de massa e de quantidade de movimento do sistema, respectivamente:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + g A \frac{\partial y}{\partial x} = g A (S_0 - S_f), \quad (2.25)$$

sendo A a área da seção transversal do canal, Q a vazão, t o tempo, x a distância no sentido do fluxo, g a aceleração da gravidade, y a profundidade da lâmina d'água, S_0 a declividade do fundo do canal e S_f a declividade da linha de resistência ao escoamento.

O modelo de propagação de onda cinemática é obtido da equação dinâmica de Saint Vénant, equação (2.25), desprezando-se os efeitos de inércia e pressão, supondo-se que as variáveis S_0 e S_f têm o mesmo valor. Substituindo então a variável S_f pela equação de Chezy, obtêm-se:

$$Q = C A \sqrt{R S_0}, \quad (2.26)$$

onde C é o coeficiente de Chezy e R é o raio hidráulico.

A equação (2.26) estabelece uma relação biunívoca entre a vazão e a área da seção, condição equivalente à equação (2.23), que define uma relação biunívoca da vazão com o volume armazenado no tramo de rio. Esta categoria de modelo é mais recomendada para segmentos de rio com alta declividade, característica de rios de cabeceira.

Supondo que todo o volume do aporte ao tramo de canal entra à montante de uma cascata de n_r tramos, representados como reservatórios não-lineares, e aplicando a equação de

conservação de massa a cada um destes reservatórios, têm-se as equações descritivas da fase canal no espaço de estados:

$$\frac{dS_1}{dt} = E.BACIA \frac{A_{inc}}{A_{tot}} + Q_{mont} - \beta S_1^\eta, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.27)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = \beta S_{i-1}^\eta - \beta S_i^\eta, \text{ com } i = 2, \dots, n_r, \quad \text{mm h}^{-1} \quad (2.28)$$

sendo Q_{mont} a contribuição proveniente das bacias à montante, A_{inc} a área incremental da bacia e A_{tot} a área total de contribuição para a exutória da bacia.

Quanto às unidades utilizadas no modelo de propagação, para este trabalho, têm-se que os reservatórios S_i são contabilizados em mm, as áreas incremental e total em km^2 , e vazão da contribuição à montante é convertida de m^3/s para mm/hora, multiplicando pelo fator de $3,6/A_{tot}$.

2.4.3 Modelo conceitual completo

O modelo conceitual do modelo chuva-vazão-propagação 3R para uma sub-bacia consiste no conjunto de $n_r + 2$ equações diferenciais ordinárias não-lineares de primeira ordem, sendo n_r o número de tramos (reservatórios) da fase canal, composto, em sua forma sintética, pelas equações (2.13), (2.14), (2.27) e (2.28). Substituindo-se as expressões apresentadas anteriormente para os componentes das equações dos armazenamentos do solo, obtém-se a formulação detalhada do modelo conceitual, no espaço de estados, apresentada nas equações (2.29) a (2.32):

$$\frac{dX_1}{dt} = PREC - PREC \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} - C_2 X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} - EVTP \frac{X_1}{X_1^0} - C_1 X_1, \quad (2.29)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = C_2 X_2^0 \left[1 + C_3 \left(1 - \frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_2} \right] \frac{X_1}{X_1^0} - EVTP \left(1 - \frac{X_1}{X_1^0} \right) \left(\frac{X_2}{X_2^0} \right)^{m_3} - C_2 X_2, \quad (2.30)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = \left[\frac{1}{1 + \varepsilon} C_2 X_2 + C_1 X_1 + PREC \left(\frac{X_1}{X_1^0} \right)^{m_1} \right] \frac{A_{inc}}{A_{tot}} + Q_{mont} - \beta S_1^\eta, \quad (2.31)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = \beta S_{i-1}^\eta - \beta S_i^\eta, \text{ com } i = 2, \dots, n_r. \quad (2.32)$$

A escolha do número de reservatórios para o modelo de propagação influi na atenuação da hidrógrafa, sendo que para este trabalho, tanto no modelo Sacramento quanto no 3R, foram implementados dois reservatórios de propagação. Deste modo o modelo 3R passa a ser constituído por quatro equações diferenciais, sendo que a vazão modelada, Q_{mod} , é dada pela saída do segundo reservatório de propagação, conforme:

$$Q_{mod} = \beta S_2^\eta. \quad (2.33)$$

Postas estas equações encerra-se a descrição do modelo 3R, finalizando também toda a descrição dos processos hidrológicos considerados pelos dois modelos utilizados neste trabalho.

2.5 Métodos de calibração automática

Como visto anteriormente, os modelos chuva–vazão Sacramento e 3R, apresentam um grande número de parâmetros, os quais devem ser ajustados para cada bacia modelada. Estes parâmetros visam reproduzir certos aspectos dos processos hidrológicos que ocorrem na bacia, os quais estão ligados a propriedades intrínsecas de relevo, tipo de solo e uso e ocupação do solo, entre outros. Collischonn e Tucci (2003) descrevem que a etapa de ajuste dos parâmetros exige do usuário um maior grau de conhecimento sobre o comportamento do modelo, o objetivo ao qual se espera que o modelo atenda e a qualidade e representatividade dos dados hidrológicos. Esta etapa de ajuste dos parâmetros pode ser feita através de um método interativo, de tentativa e erro, ou então através de rotinas computacionais que empregam métodos matemáticos para busca de um conjunto de parâmetros satisfatórios (Collischonn e Tucci, 2003).

Todavia um ajuste manual do conjunto de parâmetros, onde estes são alterados por tentativa e erro, é de grande importância para que o operador do modelo adquira experiência sobre a sensibilidade do modelo à variação de cada um dos parâmetros. Outro ponto importante da calibração manual é a adoção de valores para os parâmetros que sejam condizentes com a realidade do processo simulado. Deste modo, uma primeira etapa de calibração manual do modelo serve para garantir que uma futura busca automática comprometa-se ao espaço de valores dos parâmetros próximos ao determinado manualmente. Contudo, quando o número de parâmetros com grande influência na resposta do modelo é alto, mesmo um operador experiente pode demorar a definir o resultado da calibração manual.

A alternativa para resolver problema é a utilização de rotinas computacionais de calibração automática. Estas rotinas aplicam variados métodos de otimização para a procura de um conjunto de parâmetros que minimizem o valor de uma determinada função objetivo. Por exemplo, o erro médio. Collischonn e Tucci (2003) comentam que os primeiros algoritmos apresentavam vários problemas tais como convergência para mínimos locais, podendo estes serem inconsistentes com os processos reais, porém matematicamente possíveis.

Dentro dessa primeira geração de métodos para calibração automática, destaca-se o método *Simplex Downhill* desenvolvida por Nelder e Mead em artigo de 1965, sendo posteriormente adicionada uma rotina computacional deste método em Press et al. (1995). Este método consiste basicamente em gerar novos conjuntos de parâmetros a partir de um conjunto inicial fornecido à rotina, utilizando-se de operações entre os pontos deste conjunto. Dentro do contexto deste capítulo é interessante ressaltar que este método converge, na grande maioria dos casos, apenas para mínimos locais da função objetivo escolhida, mesmo quando realizadas várias execuções para conjuntos de pontos iniciais diferentes. Todavia, devido ao seu baixo custo computacional, este método foi empregado largamente na calibração de modelos hidrológicos (Collischonn e Tucci, 2003).

Em Duan, Sorooshian e Gupta (1992) há uma breve revisão dos métodos de calibração automática existentes, entre eles: (i) sistema de busca aleatória, onde vários conjuntos de parâmetros são escolhidos aleatoriamente, verificando-se qual destes conjuntos obteve o menor valor da função objetivo; (ii) análise da superfície da função objetivo, onde é montado um gráfico do valor da função objetivo *versus* uma faixa de valores de cada parâmetro; (iii) método combinado de busca aleatória com o *Simplex*. Entretanto, no estudo destes autores todos estes métodos apresentam alguma deficiência, seja por convergir a mínimos locais ou por necessitar de um poder de processamento computacional altíssimo.

Com base nestes experimentos, estes autores desenvolveram o método denominado, em inglês, de *Shuffled Complex Evolution*, mais citado pela sigla *SCE-UA*, sendo que o termo *UA* significa *University of Arizona*, que é onde a rotina foi desenvolvida. Este método combina o que há de mais eficiente em três métodos de calibração: (i) o procedimento *Simplex*, de Nelder e Mead (1965); (ii) os conceitos de busca aleatória controlada, descrita em Price (1987); (iii) e o processo de evolução competitiva do algoritmo genético de Holland (1975), todos citados em Duan, Sorooshian e Gupta (1992). Além destes três processos os autores adicionaram o procedimento de “embaralhamento de complexos”, no qual grupos de conjuntos de parâmetros, após terem passado por um processo de evolução, são misturados de

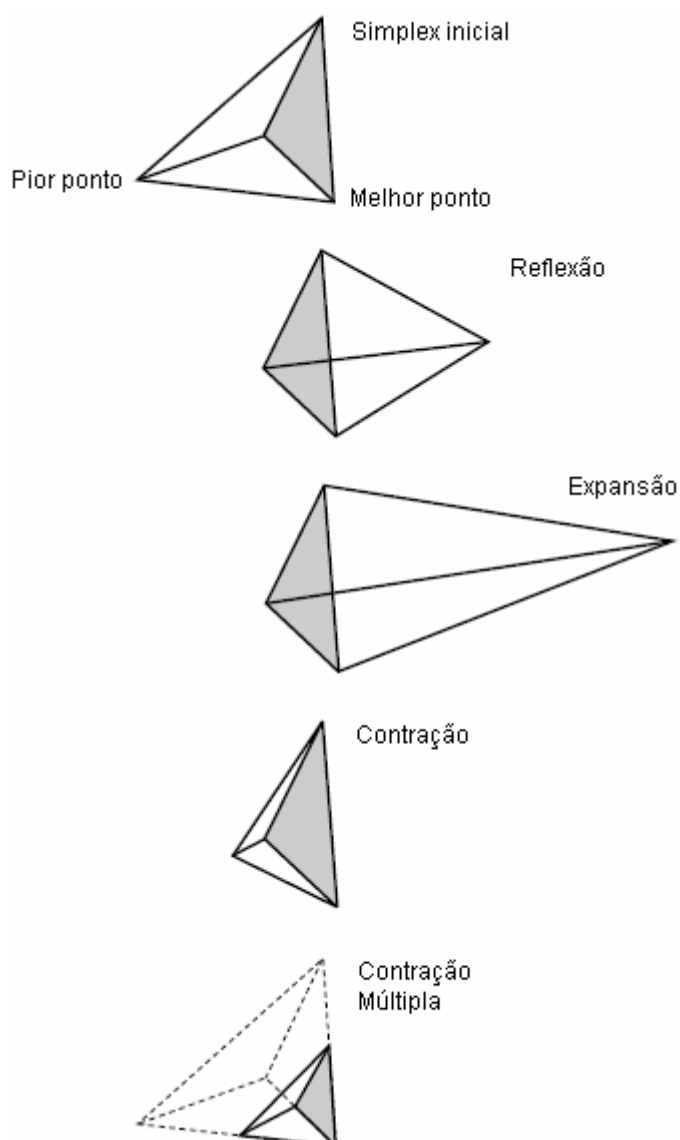
forma a distribuir a informação sobre a variação da função objetivo no espaço determinado pelos limites dos parâmetros do modelo a ser calibrado. Esta etapa, segundo os autores, garante que o método convergirá no mínimo global do espaço de busca.

Todavia, qualquer rotina de calibração automática está sujeita a condições externas que interferem na qualidade de seus resultados. Um fator é a qualidade dos dados hidrológicos, pois como a série de vazão modelada é utilizada para computar o valor da função objetivo, o fornecimento de dados inconsistentes pode gerar uma série de vazão modelada que receba um alto valor da função, embora fosse utilizado um conjunto de parâmetros muito próximo do que seria o ideal. Outro fator que interfere na qualidade da calibração é o tamanho da série de dados hidrológicos. Yapo, Gupta e Sorooshian (1996) mostram que o fornecimento de uma série curta de dados pode induzir a rotina à calibração de um período com característica própria, como um período de cheia ou de recessão, ao invés de uma situação mediana do observado na bacia. Do oposto, uma série longa demais, apesar de conter um maior número de eventos de cheias e recessões, pode tornar o custo computacional da calibração muito alto.

2.5.1 Método Simplex Downhill

Neste método, um conjunto de $n_p + 1$ pontos, sendo n_p o número de parâmetros do modelo, é evoluído através dos processos representados pela Figura 2.6, onde o pior ponto, o de maior valor da função objetivo, é modificado em relação ao ponto definido pela média dos parâmetros que compõe os demais n_p pontos.

Para facilitar o entendimento é suposto um modelo de apenas 3 parâmetros, de modo que a rotina *Simplex* opera com um conjunto de 4 pontos, denotados por A , B , C e D . Supondo que o ponto D seja o pior ponto do grupo, pois teria o maior valor da função objetivo, será calculado um novo ponto D realizando operações entre este ponto e o ponto O , dado pela média dos parâmetros, ou coordenadas, em A , B e C . Utilizando-se de valores fictícios, a fim de demonstrar os processos do *Simplex*, a Tabela 2.3 mostra os valores dos parâmetros que compõe os pontos A , B , C , D e O .



Fonte: Press *et al.* (1995)

Figura 2.6: Passos do método *Downhill Simplex*

Tabela 2.3: Pontos fictícios para um conjunto inicial da rotina *Simplex*

Ponto	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3
A	50,0	100,0	0,50
B	200,0	100,0	0,50
C	50,0	250,0	0,50
D	50,0	100,0	0,10
O	100,0	150,0	0,50

Um novo ponto será gerado para cada uma das etapas do *Simplex*: reflexão, extensão ou contração. O ponto de reflexão, R , consiste em utilizar os parâmetros do ponto que está a uma distância do ponto D de duas vezes o segmento \overline{DO} , conforme:

$$R = 2O - D. \quad (2.34)$$

O ponto de extensão, E , consiste em utilizar as coordenadas do ponto a uma distância de três vezes o segmento \overline{DO} , a partir do ponto D , o que equivale ao ponto obtido por:

$$E = 2R - O. \quad (2.35)$$

O último ponto, o de contração C' , é obtido pelas coordenadas do ponto que encontra-se a uma distância de metade do segmento \overline{DO} , a partir do ponto D , dado pela média simples dos parâmetros destes dois pontos:

$$C' = 0,5(D + O). \quad (2.36)$$

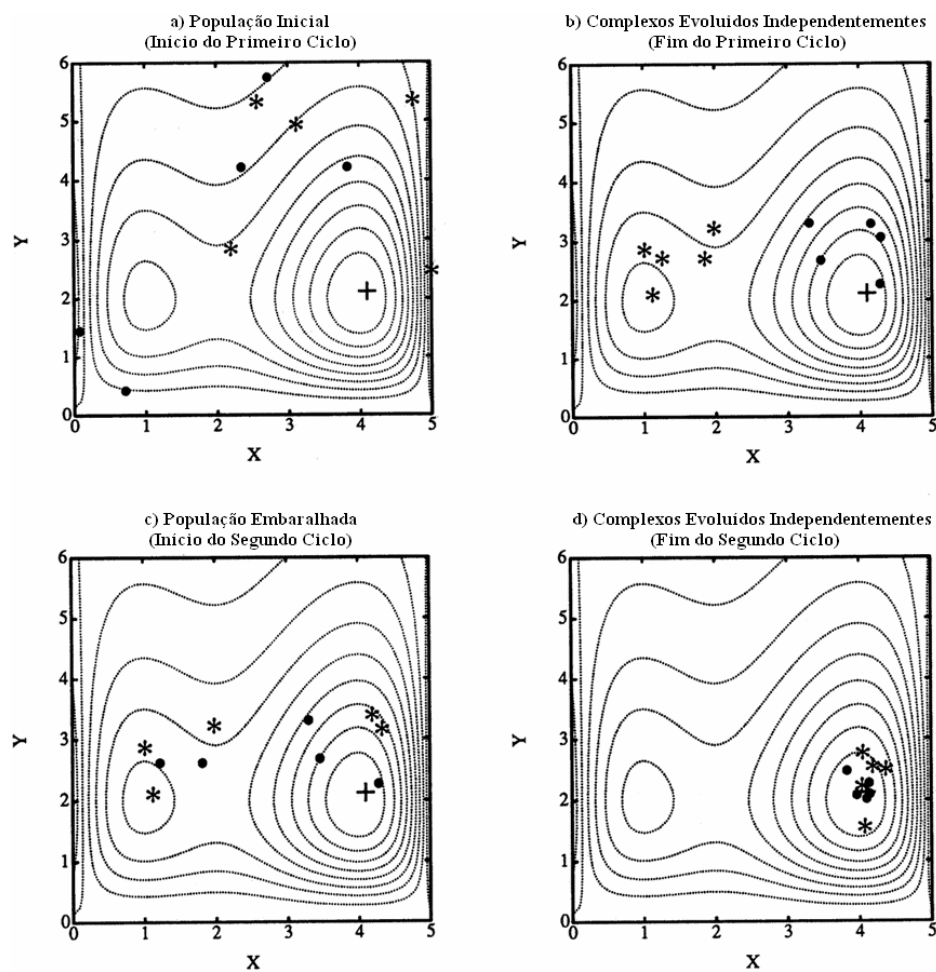
Para o caso dos pontos fictícios da tabela 2.3, as coordenadas dos pontos R , E e C' seriam respectivamente (150, 200, 0,9), (200, 250, 1,3) e (75, 125, 0,3). O algoritmo avalia estes pontos, através do valor de suas funções objetivo e determina quais pontos do grupo inicial serão substituídos. Este algoritmo é descrito em uma seção específica do próximo capítulo. Entretanto, caso nenhum dos pontos calculados satisfaça as condições de melhoria do sistema, procede-se à etapa de contração múltipla, onde todos os parâmetros do grupo sofrem uma contração em direção ao melhor ponto do conjunto.

Este procedimento é muito bom para encontrar regiões de mínimos, entretanto no caso de um modelo de 11 ou 18 parâmetros, a quantidade de mínimos locais é muito grande, de modo que mesmo utilizando-se de diversas matrizes iniciais, o resultado raramente será o ponto de mínimo global.

2.5.2 Método Shuffled Complex Evolution – University of Arizona

Este método foi desenvolvido para realizar uma busca eficiente pela região de mínimo global dos parâmetros de um modelo. O funcionamento deste método é explicado pela Figura 2.7, através de um modelo bidimensional, onde as linhas pontilhadas representam a superfície de uma função objetivo, com mínimo local no ponto $(X,Y) = (1, 2)$, e ponto de mínimo global em $(X,Y) = (4,2)$. A figura representa os passos que dois conjuntos de pontos, representados pelos símbolos \bullet e $*$, sofrem até convergirem ao mínimo global. A Figura 2.7 (a) mostra a

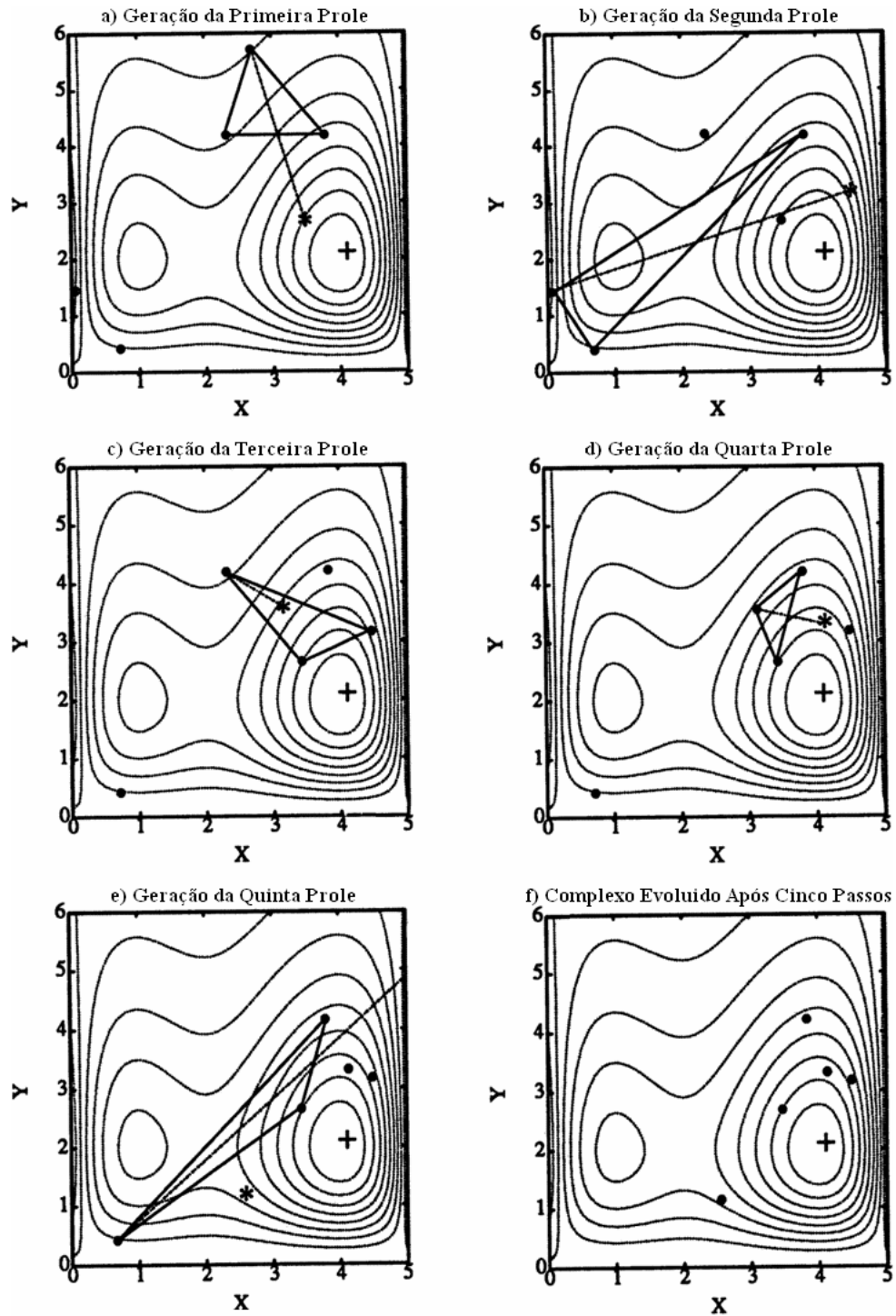
posição inicial dos conjuntos, então estes conjuntos passam por alguns passos de evolução, através da rotina *CCE*, explicada na sequência, chegando à configuração apresentada no item (b) da Figura 2.7. Note que neste ponto da execução, o grupo * está convergindo para o mínimo local, enquanto que o grupo • aproxima-se do mínimo global. A rotina *SCE-UA* procede então com o embaralhamento dos complexos, onde pontos do conjunto • passam para o conjunto * e vice e versa, conforme mostrado no item (c). Mais uma etapa de evolução dos conjuntos e o resultado obtido é a convergência no ponto de mínimo global, conforme apresentado no item (d) da Figura 2.7.



Fonte: Duan, Sorooshian, Gupta (1992)

Figura 2.7: Ilustração do método *Shuffled Complex Evolution*

O processo de evolução dos complexos segue o algoritmo denominado *Competitive Complex Evolution (CCE)*, o qual combina atributos da rotina *Simplex* com o outros do método de algoritmo genético. O funcionamento desta etapa é ilustrado na Figura 2.8, onde um conjunto de pontos denotados por • é evoluído conforme este procedimento.



Fonte: Duan, Sorooshian, Gupta (1992)

Figura 2.8: Ilustração dos passos de evolução aplicados a um complexo

O primeiro passo da evolução é o ponto de reflexão, onde o pior ponto é refletido através do centróide entre os demais pontos do sub-complexo operante. No caso apresentado pela Figura 2.8 (a) o sub-complexo é dado pelo triângulo, e o ponto refletido pela marca *. Na sequência outro sub-complexo é formado e evoluído também por um passo de reflexão, item (b) da Figura 2.8. Nos itens (c) e (d), a evolução ocorre por um passo de contração. Já no item

(e) da Figura 2.8, há o processo de mutação, pois o ponto evoluído excedeu os limites dos parâmetros, sendo então escolhido um novo ponto aleatório. No final os pontos que partiram da posição mostrada no item (a), aproximaram-se de um ponto de mínimo, conforme visto no item (f) da mesma figura.

Este algoritmo difere do *Simplex* em três pontos principais: (i) a escolha dos pontos que podem compor o conjunto inicial do *Simplex*, a qual se dá por um método probabilístico, onde os melhores pontos têm mais chances de participar; (ii) utilização de limites, mínimo e máximos, de cada parâmetros, de modo que é possível garantir que a solução do problema ocorra em um intervalo de valores possivelmente reais, ou seja, não são gerados parâmetros incoerentes; (iii) passo de mutação, o qual permite que uma quantidade maior de informações sobre a variação da função no espaço dado fique disponível para futuras evoluções.

O algoritmo completo do SCE-UA é descrito em uma seção específica do próximo capítulo.

Exposto os métodos de calibração utilizados neste trabalho, encerra-se então toda a revisão bibliográfica necessária para entendimento completo deste trabalho, procedendo-se a seguir com a descrição dos métodos utilizados na obtenção dos resultados objetivados para este trabalho.

3 Métodos Utilizados

Após traçada a linha de pesquisa na qual este trabalho está incluso, proceder-se-á descrevendo todos os métodos e demais observações referentes à execução da pesquisa que gerou os resultados apresentados no próximo capítulo deste documento. Em síntese, este capítulo apresenta uma descrição da rede telemétrica hidrológica e meteorológica, da qual se obteve os dados utilizados neste trabalho. Ainda referente às informações hidrometeorológicas, é mostrado o método de identificação e de preenchimento de dados espúrios, assim como os métodos para cálculo de propriedades média das bacias: precipitação e evapotranspiração potencial. Na sequência é apresentada uma descrição da área de estudo, onde são expostas algumas características das bacias hidrográficas, tais como informações hidrometeorológicas, relevo e tipo de solo. Na seção posterior são apresentados os métodos de calibração automática dos parâmetros dos modelos hidrológicos, assim como seus algoritmos. Finalizando este capítulo tem-se a descrição do procedimento de simulação do sistema de previsão hidrológica, sobre o qual serão avaliados alguns aspectos estatísticos, também descritos na sequência.

3.1 Rede telemétrica de monitoramento e dados hidrometeorológicos

O sistema de previsão hidrológica utiliza-se da rede telemétrica de monitoramento automático do Instituto Tecnológico SIMEPAR. Esta rede é constituída por estações meteorológicas, que monitoram as variáveis de temperatura do ar, pressão atmosférica, radiação solar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, e por estações hidrológicas que monitoram somente nível e precipitação.

A região de estudo deste trabalho, descrita mais detalhadamente na próxima seção, compreende a região da bacia hidrográfica do rio Iguaçu que contribui para a descarga líquida em União da Vitória (Figura 3.1). Esta bacia de estudo tem uma área da ordem de 24.000 km², correspondente a quase um terço de toda a Bacia do Rio Iguaçu. Dentro desta região estão inseridos municípios importantes como o de Curitiba e região metropolitana, São Mateus do Sul e União da Vitória.

Da rede telemétrica do SIMEPAR utilizada para este estudo constata-se a presença de 20 postos telemétricos, sendo 14 hidrológicos e 6 meteorológicos. Todavia a distribuição espacial é bastante irregular. Dentro de alguns dos problemas que esta baixa densidade de estações implica, há dois pontos que podem ser considerados críticos: (i) cinco das seis estações meteorológicas estão na região norte da bacia; (ii) não há postos telemétricos ao sul das sub-bacias 1, 7 e 8 (Figura 3.1).

O primeiro ponto interfere principalmente na contabilização da evapotranspiração potencial na região, de modo que não haverá uma diferença notável entre as sub-bacias. O segundo ponto interfere no cálculo da precipitação média sobre as sub-bacias citadas, sendo que no caso da sub-bacia de Rio Negro há somente duas estações dentro de sua área incremental, enquanto que na sub-bacia de Fluvópolis há quatro estações, porém todas na região norte da sub-bacia.

Os dados coletados pelas estações meteorológicas, utilizados neste trabalho são: temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); pressão atmosférica (hPa); radiação solar incidente (W/m^2); umidade relativa do ar (%); velocidade do vento (m/s); e precipitação (mm), sendo que a amostragem destes dados ocorre com uma periodicidade horária. Já no caso das estações hidrológicas, apenas dados de nível (m) e precipitação (mm) são monitorados, porém com uma taxa de amostragem a cada 15 minutos. Os dados coletados são armazenados em *dataloggers* e transmitidos para o banco de dados do SIMEPAR por satélite, a cada 4 horas. No caso do dado de nível, há também um armazenamento da informação como dado de vazão (m^3/s), obtidas na transformada curva de descarga de cada posto. Estas curvas de descargas foram apresentadas em Gonçalves, Guetter e Anderson (2003). Para este estudo foram utilizadas as séries de dados monitorados dos anos de 1998 a 2006.

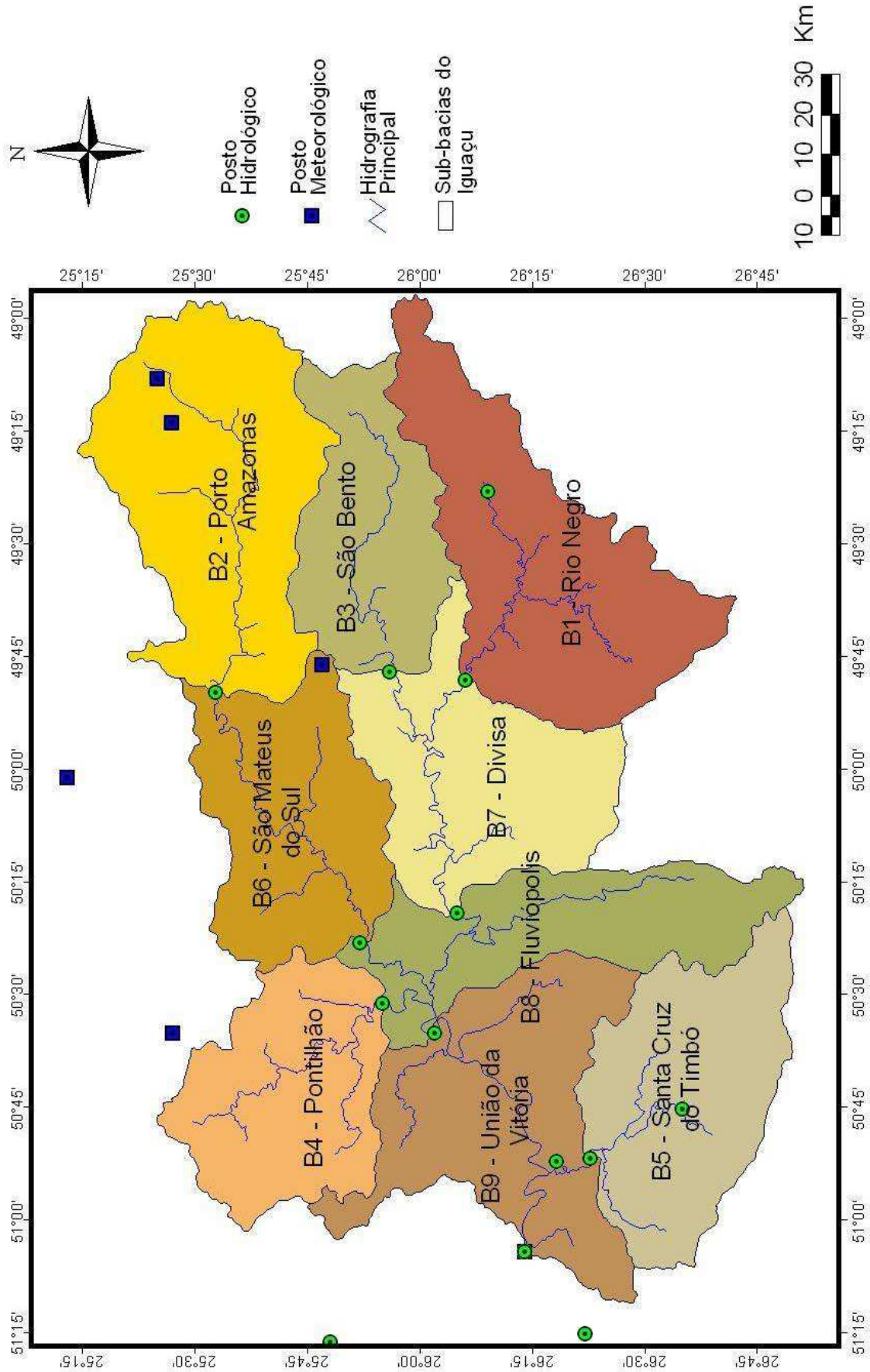


Figura 3.1: Mapa das sub-bacias da área de estudo, hidrografia principal e localização dos postos telemétricos

3.1.1 Identificação e preenchimento de falhas

Eventualmente podem ocorrer falhas ou na medição ou na transmissão dos dados, de tal modo que as séries de dados armazenadas no banco de dados não são isentas de inconsistências ou simples ausência de informações em alguns períodos. Braga (2005) faz uma longa discussão sobre sensores de monitoramento hidroambiental, comentando várias interferências que estes sensores podem sofrer pelo meio onde estão inseridos.

Neste trabalho, tanto dados inconsistentes (dados espúrios) como ausentes são denominados de falhas, uma vez que os procedimentos adotados aqui para correções destes dados são os mesmos. A utilização de dados brutos não é recomendável, dada a presença de dados falhos, sendo necessário implementar algumas rotinas para verificação da consistência destas informações. Da prática, sabe-se que todas as variáveis monitoradas apresentam limites climatológicos, ou melhor, valores máximos e mínimos que quando excedidos podem ser considerados suspeitos, como por exemplo: temperatura do ar acima de 60 °C. Outro indicativo de dados espúrios é a sua variação no tempo. Principalmente no caso da vazão nas exutórias das sub-bacias da área de estudo, é praticamente impossível que ocorra um aumento de 70 para 700 m³/s no período de uma hora, sendo que para as bacias em questão, uma variação desta magnitude só ocorre, no máximo, numa escala de seis a doze horas.

A partir destas suposições foram preparadas rotinas para verificação da consistência dos dados monitorados, de modo que dados inexistentes ou considerados suspeitos recebem um valor específico, denominado “código de falha”, denotado por um valor negativo, geralmente, -999,99. Estas rotinas foram implementadas para três conjuntos de dados: (i) *TPRUV*, que se refere aos dados de temperatura, pressão, radiação, umidade e velocidade do vento; (ii) *chuva*, onde são analisados os dados de precipitação das estações hidrológicas e meteorológicas; (iii) *vazão*, oriundos da conversão dos dados de nível, para cada posto localizado nas exutórias das sub-bacias hidrográficas.

No caso dos dados de *TPRUV*, a verificação de dados espúrios é feita somente pela análise de valores limites para cada tipo de variável, os quais estão listados na Tabela 3.1. Deste modo, valores acima do limite superior ou abaixo do limite inferior recebem código de falha.

Tabela 3.1: Limites máximos e mínimos para os dados de temperatura, pressão, radiação, umidade e velocidade do vento

Variável	Un.	Limite superior	Limite inferior
Temperatura do ar	°C	50,0	-10,0
Pressão atmosférica	hPa	1.000,0	950,0
Radiação solar incidente	W/m ²	2.000,0	0,0
		20,0	0,0
Umidade relativa do ar	%	100,0	0,0
Velocidade do vento	m/s	50,0	0,0

* Dados entre 6 e 20 horas, do fuso local.

** Dados entre 21 e 5 horas, do fuso local.

Para a identificação de falhas dos dados de precipitação, utiliza-se a verificação de um limite máximo, sendo que, obviamente, o dado também não pode ser inferior a zero. Entretanto, no caso dos dados oriundos das estações hidrológicas, há a verificação de limite para os dados monitorados a cada 15 minutos e também para o acumulado horário, sendo que este limite não é necessariamente o mesmo para todos os postos. A Tabela 3.2 mostra o valor limite de precipitação em 15 e em 60 minutos para cada uma das estações hidrológicas, os quais foram obtidos após análises das séries históricas por membros do SIMEPAR (Gonçalves, Guetter e Araújo, 2003). Neste estudo, o valor limite foi calculado como o maior valor consistente da série observada, tanto para a medição de 15 minutos quanto para o acumulado horário. Na acumulação para dado horário, as falhas dos dados de 15 minutos não são adicionadas ao montante horário, e ocorrendo situações em que os quatro dados são falhas, o dado daquela hora também recebe falha. Entretanto, não foi realizado um levantamento dos limites máximos para os dados de precipitação monitorados em estações meteorológicas, e sendo assim, considerou-se suspeito os dados acima de 70 mm. Tal valor foi escolhido porque, dentre as estações hidrológicas em que o valor limite foi estabelecido, a maior precipitação horária permitida é de 57 mm, no posto São Mateus do Sul. Dado que há uma probabilidade de ocorrer uma precipitação com tempo de recorrência maior do que o intervalo das séries de dados já observados, o valor de 70 mm foi posto como um limite que venha a aceitar chuvas intensas, reais, ainda não registradas pelas estações em uso neste trabalho.

Tabela 3.2: Limite de valor máximo do dado de precipitação das estações hidrológicas

Estação	Código SIMEPAR	Longitude (° S)	Latitude (° W)	Precipitação máxima em 15 minutos	Precipitação máxima em 60 minutos
Porto Amazonas	25334953	49,88	25,55	36,8	43,8
São Mateus do Sul	25525023	50,38	25,86	20,8	57,0
São Bento	25564947	49,78	25,93	19,4	51,8
Fragosos	26094923	49,38	26,15	39,6	40,8
Rio Negro	26064948	49,80	26,10	30,6	34,8
Divisa	26055019	50,31	26,08	29,4	47,2
Pontilhão	25555031	50,51	25,91	16,0	28,2
Fluviópolis	26025035	50,58	26,03	24,0	27,0
Foz do Cachoeira	26355045	50,75	26,58	26,2	45,4
Santa Cruz do Timbó	26125049	50,81	26,20	19,4	50,4
Foz do Timbó	26105047	50,78	26,16	21,8	30,6
União da Vitória	26145104	51,06	26,23	20,0	40,2
Porto Vitória	26105114	51,23	26,16	16,2	36,2
Madeira Gavazzoni	25485116	51,26	25,80	18,4	33,2

Braga *et al.* (2007) comentam sobre irregularidades no processo de mensuração de precipitação por pluviômetros de báscula, que é o tipo de pluviômetro utilizados na rede telemétrica do SIMEPAR. Em testes realizados em laboratório, utilizando-se de uma bomba peristáltica de alta precisão para simular chuvas em várias intensidades, notou-se que os quatro pluviômetros testados subestimam precipitações acima de 30 mm/h. Para esta intensidade, em dois dos quatros modelos de pluviômetros testados, a perda fica entre 3,5% à 10%, aproximadamente, aumentando para percentuais de 10% a 23% em taxas da ordem de 100 mm/h. Contudo há um modelo de pluviômetro que apresenta percentuais de perda de registro muito maiores, de 44,8% e 57,4% para as taxas de 20 e 100 mm/h respectivamente. Do oposto, o modelo mais sofisticado, e mais caro, dos quatro testados, superestima a precipitação em 0,4% à taxa de 20 mm/h, e subestima em 2,9% quando a taxa de precipitação

é de 100 mm/h. Infelizmente os autores não citam as marcas e nome dos modelos utilizados, de forma que não foi possível comparar aos pluviômetros utilizados pelo SIMEPAR.

O monitoramento de nível, e consequentemente de vazão, é de longe o mais problemático para identificação de falhas, pois grande parte dos dados espúrios está dentro dos valores climatológicos, além de serem sistemáticos. São valores possíveis de serem observados, tanto quanto ao valor do dado como à variação deste em relação aos dados anteriores, mas que destoam da série num dado momento. Ocorre que, normalmente, algumas partes da série estão em conformidade com variações de curto prazo, de poucas horas, mas não estão em conformidade com variações de um período um pouco maior, de 24 horas, por exemplo. A Figura 3.2 mostra um intervalo da série de vazão em União da Vitória que ilustra bem este caso. Nesta figura percebem-se três períodos com grande possibilidade de serem falhas. O primeiro, localizado no início da série plotada, mostra uma oscilação com frequência incomum, dada sua amplitude que é da ordem de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. A segunda ocorre no início de setembro, onde a vazão que vinha em uma recessão suave no final de agosto, após a ocorrência de um evento de chuva apresenta quedas bruscas, chegando a um valor bastante baixo em 5 de setembro. E próximo ao dia 18 de setembro nota-se uma interrupção na subida da hidrógrafa com grande chance de ser uma falha não-detectável por análise de variações bruscas.

Um outro erro ao qual as variáveis monitoradas por estações automáticas estão sujeitos é devido à desajustes do sensor de medição que ocorrem com o tempo, o que pode vir a medir valores acima ou abaixo do ocorrido de fato. No caso da informação de nível esta alteração é verificada, pela comparação do dado monitorado com o dado observado visualmente na régua junto ao posto, por um operador no local. Nesta situação há uma mudança no *setup* da estação, onde é adicionado um valor fixo, no caso a diferença entre o dado automático e o visual, aos dados que serão medidos daquele instante em diante. Erros deste tipo são difíceis de serem verificados por métodos computacionais, de modo que uma análise visual dos dados torna-se praticamente indispensável. Um exemplo deste tipo de ocorrência pode ser visualizado na Figura 3.4, mais precisamente no dia 20 de agosto.

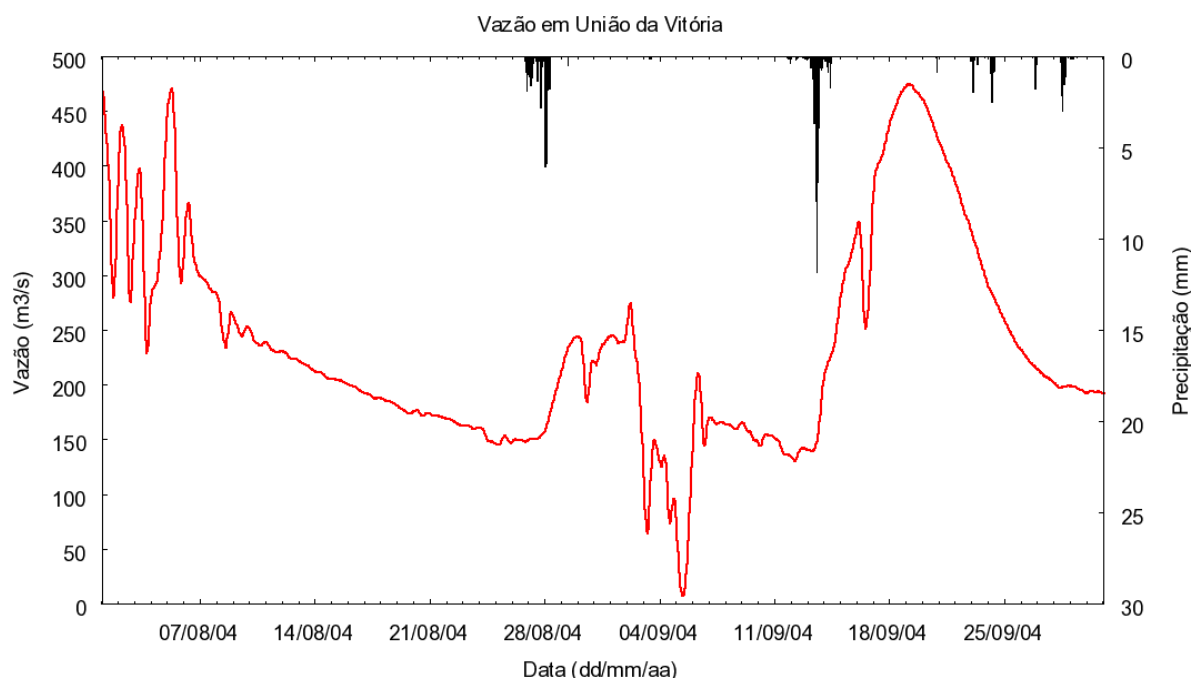


Figura 3.2: Série de vazão com falhas não detectáveis por rotinas computacionais

Braga (2005) apresenta uma discussão sobre interferências que sensores piezométricos de nível, como os utilizados pela rede SIMEPAR, podem sofrer. A variação da temperatura da água proporcionou diferenças significativas na mediação realizada por um sensor que tinha algum tempo de uso, enquanto que para um sensor novo, a variação da temperatura na medição era desprezível. O autor também comenta que a deposição de sedimentos e/ou a formação de filme biológico sobre o sensor também alteram sua resposta.

Além dos erros citados acima, que os dados de nível podem apresentar, há ainda mais um inconveniente, que ocorre devido à variação da voltagem da bateria do equipamento de medição. Acontece que, como as baterias são recarregadas por energia solar, e esta varia ao longo do dia, a medição sofre pequenas oscilações diárias. Estas oscilações conferem um aspecto de um ruído sobre os dados observados (Figura 3.3), principalmente quando a estimulação do sensor é baixa, ou seja, em medições de baixos valores de vazão. Devido à pequena magnitude das oscilações, as rotinas de verificação de falhas não são capazes de detectar tais ruídos, e a única solução encontrada para estes casos é a utilização de um filtro. Esta aplicação de filtro consiste basicamente em suavizar os contrastes da série, pois cada dado é substituído pela média entre seu valor e o valor de seus vizinhos.

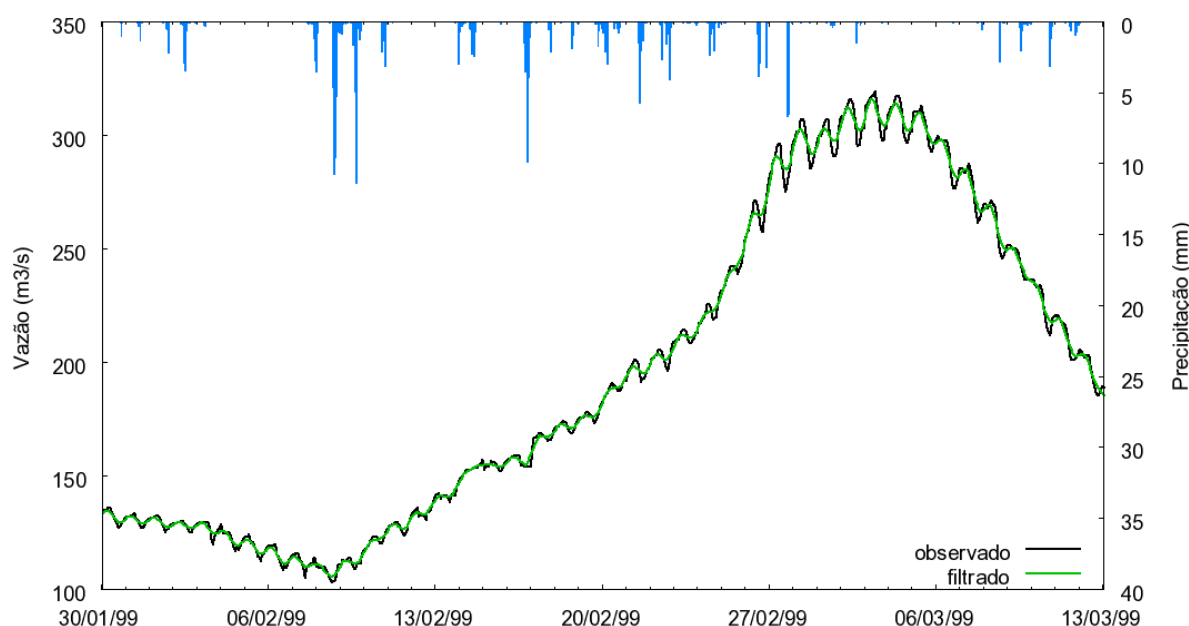


Figura 3.3: Série de vazão afetada por variação da carga da bateria do posto telemétrico e série após filtro de 12 horas

Neste trabalho empregou-se um filtro de 6 horas, ou seja, cada dado da série horária é substituído pela média entre seu próprio valor e o valor dos 6 dados anteriores, mais os 6 dados posteriores. Gonçalves, Guetter e Araújo (2003) relatam que tal oscilação só é corrigida totalmente com a aplicação de um filtro com uma janela total de 24 ou mais dados. Contudo os autores alertam que a aplicação de um filtro desta proporção temporal elimina variações em escala horária que seriam importantes para a modelagem hidrológica em mesma escala. Portanto a aplicação de uma janela total de doze horas fica a meio termo da correção completa dos dados e perda de informações horárias.

Coube à verificação automática de falhas, os testes de limites climatológicos, e também, a verificação na variação entre dados adjacentes. Deste modo, erros mais grosseiros são descartados com menor esforço. A Tabela 3.3 exibe os valores dos limites climatológicos para as séries de vazão dos nove postos localizados nas exutórias das sub-bacias, sendo que estes valores também foram obtidos no trabalho de Gonçalves, Guetter e Araújo (2003). Estes limites foram obtidos de forma semelhante aos limites de precipitação, com a diferença que foram estipulados valores mínimos e máximos da vazão para cada posto. Estes limites correspondem aos valores extremos observados nas séries de vazões analisadas, com um acréscimo de 10% no valor máximo e decréscimo do mesmo percentual a vazão mínima. Além desta verificação climatologia foi implementado, para os dados utilizados neste trabalho, o processo de verificação da variação dos dados.

Tabela 3.3: Limites climatológicos de vazão nos postos das exutórias das sub-bacias

Estação	Rio	Código SIMEPAR	Vazão mínima (m ³ /s)	Vazão máxima (m ³ /s)
Rio Negro	Negro	26064948	7,40	785,0
Porto Amazonas	Iguaçu	25334953	2,71	1.230,0
São Bento	Rio da Várzea	25564947	5,00	290,0
Pontilhão	Potinga	25555031	3,00	300,0
Santa Cruz do Timbó*	Timbó	26125049	1,00	2.000,0
São Mateus do Sul	Iguaçu	25525023	10,30	1.950,0
Divisa	Negro	26055019	15,00	915,0
Fluviópolis	Iguaçu	26025035	25,00	3.750,0
União da Vitória	Iguaçu	26145104	10,10	5.120,0

* Não há levantamento dos limites para este posto.

Este procedimento funciona da seguinte forma: se o dado em verificação for maior que 110%, ou inferior a 95%, do dado anterior, então é considerado falha. Entretanto nos casos de erro sistemático, o erro pode estar presente em um longo período, sendo necessário ampliar o valor permitido da variação conforme a distância temporal entre o dado em verificação e o último dado tido como correto. Esta ampliação do limite de variação é feita da seguinte maneira: (i) mede-se a diferença, *dif*, entre os dois últimos dados consistentes, se esta diferença for muito pequena admite-se um valor de 3 m³/s; (ii) conta-se quantos dados, *nd*, foram medidos entre o último dado consistente, *vref*, e o dado em verificação; (iii) calcula-se a variação permitida, *vp*, pelo produto *dif* x *nd*; (iv) se o dado em verificação estiver acima de *vref* + *vp* ou abaixo de *vref* - *vp*, será considerado falha, caso o contrário é dado válido e assume a posição de último dado válido.

A verificação de falhas por si só não teria muito sentido para o sistema de previsão hidrológica, pois os modelos conceituais utilizados neste trabalho não são capazes de saltar períodos falhos durante a modelagem. E ainda pior são seus resultados quando são fornecidos dados espúrios como informação de entrada. Por isto, logo após a verificação dos dados falhos são ativadas rotinas para preenchimento destes valores, procurando-se métodos que criem dados próximos do que viria a ser a observação correta dos mesmos. Entretanto no caso do conjunto TPRUV, que é utilizado para calcular a evapotranspiração potencial das sub-bacias, não é realizado nenhum procedimento de preenchimento, pois os dados falhos podem

ser descartados no cálculo do valor médio da propriedade para cada sub-bacia. Por isto, não há rotinas de preenchimento destes dados, de modo que se prosseguirá descrevendo as rotinas de preenchimento para os dados de precipitação e de vazão.

Para o preenchimento dos dados de precipitação é feita uma classificação quanto ao período de falhas da série. Se a falha ocorre em um dado isolado, falha de curto período, o mesmo é substituído pela média dos dados adjacentes, o anterior e o posterior. Este procedimento ocorre já nas séries de dados horários, tanto para dados oriundos de estações hidrológicas, como meteorológicas. Entretanto quando ocorrem falhas em uma sequência de dois dados consecutivos ou mais, passa-se a utilizar informações de estações vizinhas para substituição da falha. Tal procedimento é realizado pelo o método do *inverso da distância ao quadrado*, que também será denotado por r^{-2} neste trabalho. Este método consiste em utilizar uma média ponderada pela distância ao quadrado, entre o posto em questão e postos próximos, de modo que os dados medidos nas estações mais próximas sejam mais influentes no cálculo da propriedade para o ponto onde houve a falha. A equação 3.1, descreve a formulação matemática deste procedimento, sendo P o valor calculado da propriedade, no caso precipitação, r_i a distância entre o posto de referência e o posto i , p_i a precipitação ocorrida no posto i , e N o número de postos utilizados para o cálculo:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{p_i}{r_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{r_i^2} \right)}. \quad (3.1)$$

Nas séries de precipitação utilizadas neste trabalho, o método r^{-2} foi aplicado considerando somente os quatro postos telemétricos mais próximos. Esta fixação do número de postos visa dar mais fidelidade ao dado em escala horária, de modo que a informação coletada em pontos muito distantes não faça parte da contabilidade do novo valor da série. Obviamente, também podem ocorrer situações em que houve falha no monitoramento de duas ou mais estações ao mesmo tempo, seja por erros na transmissão, ou mesmo na medição. Em situações como estas é preciso garantir que a falha de uma estação não entre na contabilidade do novo dado de outro posto. Portanto, reduz-se o número de postos, N , até que permaneçam somente estações com dados consistentes. Entretanto, em casos raros, pode ocorrer de todas as estações próximas apresentarem dados inconsistentes no mesmo período. Nesta condição o dado em verificação é simplesmente substituído por zero, ou seja, supõe-se que não ocorreu chuva.

Passando-se ao procedimento de preenchimento de dados de vazão, também é notável a dificuldade em gerar dados condizentes com a realidade, principalmente em períodos extensos de falhas. A utilização das informações de postos a montante para estimar a vazão jusante, em um determinado período, necessita de estudos sobre o comportamento da propagação do fluxo d'água no corpo hídrico em questão. Contudo tal estudo não foi realizado neste trabalho. Ainda, para o caso de postos que não disponham de informações da montante, não é possível estipular uma rotina de preenchimento de falhas com base em tais informações. Deste modo, todos os métodos de preenchimento de dados de vazão são implementados em cima de operações realizadas na própria série, como interpolação ou filtragem.

Assim como na etapa de preenchimento dos dados de precipitação, as falhas nos dados de vazão são substituídas conforme o tamanho do período de falha. Quando a falha ocorre de modo isolado, um dado falho entre dois consistentes, o mesmo é substituído pela média dos dados adjacentes, lembrando que a periodicidade do monitoramento de vazão é de 15 minutos. Quando a falha ocorre em uma sequência de dois ou mais dados, utilizam-se então rotinas de interpolação para gerar valores sobre o período inconsistente. Novamente é feita uma classificação quanto ao tamanho do período de falha, sendo que falhas de no máximo 6 horas consecutivas são substituídas por dados gerados através de interpolação linear entre o dado consistente anterior e o posterior ao período de falha. Quando a sequência de dados falhos é superior a 6 horas, uma simples interpolação linear pode já não ser tão fiel à realidade, principalmente em casos de ondas de cheia que ocorrem após eventos de chuva. Uma opção nestes casos é adotar interpolações de ordens maiores, como quadrática ou cúbica, porém a consistência da curva gerada nestes métodos depende dos pontos escolhidos para a construção da mesma. Isto implica em um grande gasto de tempo na escolha de tais pontos, diminuindo a eficiência do processo de preenchimento.

Assim sendo optou-se por utilizar o método de interpolação *spline cúbica*, descrito detalhadamente em Press *et al.* (1995), o qual consiste no ajuste de uma equação de 3º grau a cada dois pontos, garantindo continuidade até a derivada de 2º ordem nestes pontos. As falhas intermediárias aos pontos consistentes da série são substituídas pelo valor da função ajustada entre os dados adjacentes. A vantagem principal deste método é a obtenção de uma curva mais próxima ao observado nos hidrogramas. Todavia, este método também pode vir a gerar valores que não condizem com a situação, principalmente quando a série observada de dados consistentes é muito fragmentada. A Figura 3.4 mostra uma série de vazão observada, onde dois períodos foram interpolados pelos dois métodos: linear em linha verde; *spline* cúbica em

linha azul. Observa-se que no primeiro período, entre 4 e 8 de agosto, a interpolação da *spline* imitou uma onda de cheia com respectiva recessão, conectando as extremidades do período inconsistente de modo mais condizente ao que se esperaria ter observado. Entretanto, no dia 20 há uma mudança no *setup* da estação, de modo que o período logo anterior a este evento deveria ser corrigido. Nesta etapa a *spline* mostrou um resultado insatisfatório, diferente à uma recessão mais tênue à observada, que seria o esperado. A interpolação linear não é capaz de imitar o comportamento de uma hidrógrafa, mas para este caso é uma alternativa melhor à *spline* pois provavelmente está mais próxima à recessão que deveria ter ocorrido.

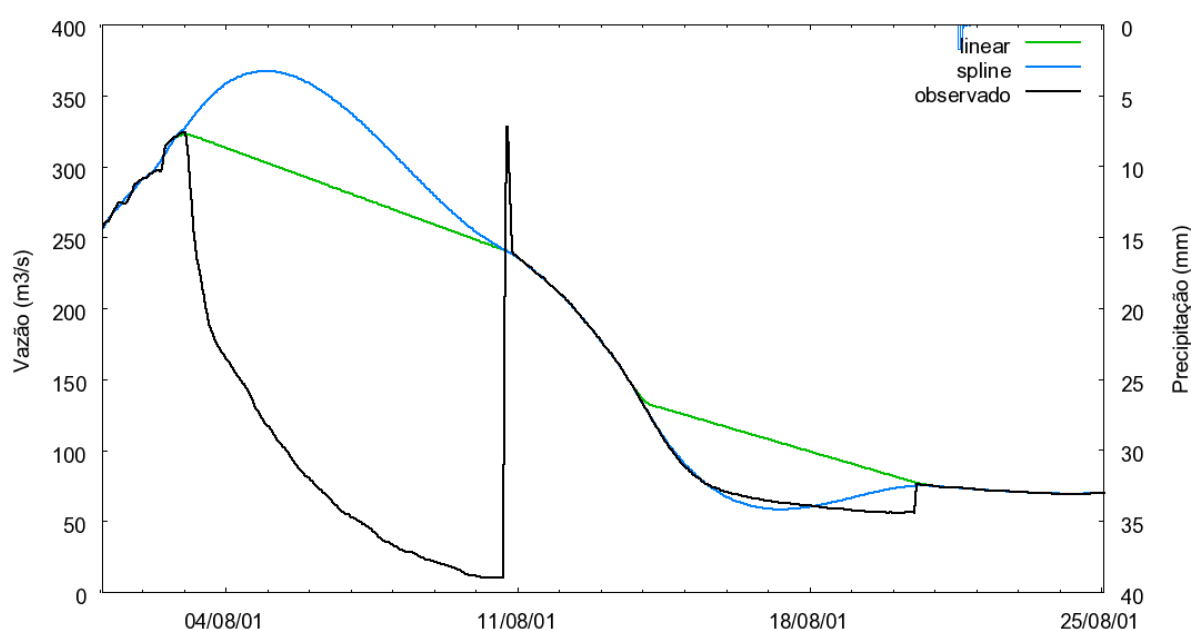


Figura 3.4: Comparação de períodos, de uma série de vazão, interpolados linearmente e por *spline* cúbica

Como dito anteriormente o método de interpolação *spline* cúbica também pode gerar curvas incompatíveis com a realidade, como ondas de cheia muito acentuadas ou recessões muito intensas. Por isto, todas as séries de vazões utilizadas neste estudo foram verificadas visualmente, sendo que períodos julgados inconsistentes (degrais, oscilações intensas, etc.) foram substituídos pelo melhor resultado entre os dois métodos de interpolação.

À exceção da verificação de falhas em relação à porcentagem do dado de nível anterior, todos os demais métodos para verificação já faziam parte do sistema de previsão hidrológica. Contudo, para os dados de vazão, os testes eram aplicados primeiramente aos dados de nível e então transformados em vazão, enquanto que para as séries utilizadas neste trabalho houve primeiramente a transformação nível-vazão e então a aplicação das rotinas de verificação e preenchimento. Quanto aos métodos de preenchimento das falhas (ausência de

dados e dados inconsistentes), apenas a verificação visual e conseqüente interpolação, *spline* ou linear, dos intervalos inconsistentes é que foram realizadas pelo autor.

3.1.2 Propriedades médias da bacia

Após as etapas de verificação e preenchimento de falhas, procede-se ao cálculo dos valores médios, para cada sub-bacia, de evapotranspiração potencial e precipitação. Nesta parte serão mostrados os procedimentos e métodos, aplicados sobre os dados do monitoramento, para geração das séries horárias de evapotranspiração potencial e precipitação média de cada uma das nove sub-bacias. Quando trata-se de propriedades médias é importante utilizar-se de métodos que garantam uma boa estimacão do que está acontecendo sobre a região a cada momento. Na literatura são descritos vários métodos para tal tipo contabilidade, como média aritmética dos postos mais próximos, o método de Thiessen, e o método das isoietas. Em geral, o procedimento do cálculo de uma propriedade média, consiste em realizar uma média ponderada entre dados de estações próximas, cabendo ao método atribuir um determinado peso para cada posto, com relação à região onde se deseja saber o valor médio de alguma propriedade.

No SISPSHI, utiliza-se uma ponderação, das informações obtidas nos postos telemétricos, em função da distância entre estes e o ponto central de cada sub-bacia, através do método do inverso da distância ao quadrado, conforme a equação (3.1). A posição do ponto central em questão foi obtida pela média das coordenadas dos pontos utilizados para gerar a linha de contorno de cada sub-bacia. O método r^{-2} é aplicado tanto para o cálculo do conjunto TPRUV quanto para a precipitação, sendo que no primeiro caso, somente as estações meteorológicas é que são utilizadas na contabilidade, pois as estações hidrológicas não monitoram tais variáveis. Outra diferença na aplicação para TPRUV e para precipitação é o número de estações utilizadas para cada sub-bacia, pois para a contabilidade da precipitação há uma pré-definição de quais postos serão utilizados em cada sub-bacia, enquanto que para os dados de TPRUV todas as estações são utilizadas para as nove sub-bacias. A Figura 3.5 mostra um esquema da configuração de quais estações são utilizadas para cada sub-bacia, no cálculo da precipitação média. Nesta figura os postos telemétricos (x), que são considerados em cada sub-bacia, estão ligados ao ponto central (*) destas, por linhas de mesma cor.

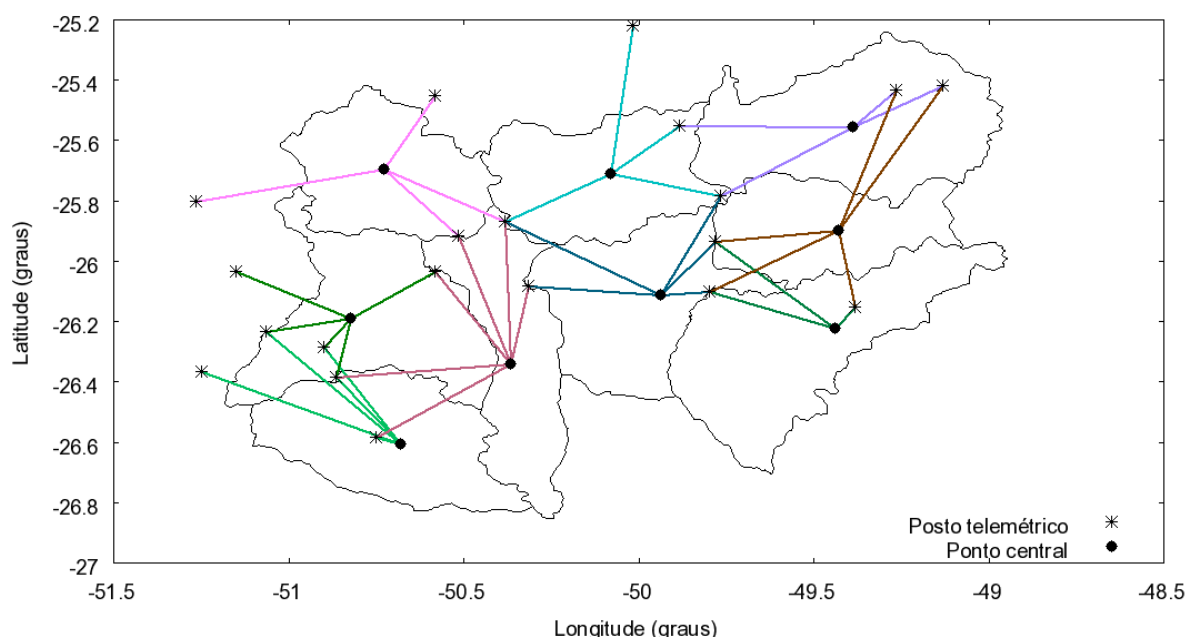


Figura 3.5: Estações telemétricas utilizadas para o cálculo da precipitação média nas sub-bacias por r^{-2}

O cálculo da evapotranspiração potencial foi realizado pela equação de Penman, também denominado de método combinado (Tucci, 2002). Este método utiliza-se de todos os dados do conjunto TPRUV, calculados para o ponto médio da sub-bacia, para a estimação do valor da evapotranspiração potencial na mesma, em mm/hora. Posto isto, tem-se então que o dado de evapotranspiração potencial é obtido após uma longa etapa, onde os dados de TPRUV devem ser verificados, e as falhas identificadas. Então se deve calcular o valor médio de cada propriedade, para cada hora, para cada sub-bacia, tomando-se o cuidado de desconsiderar os dados marcados como falha, para então transformá-los em um dado de evapotranspiração potencial. Operacionalmente, um procedimento deste não é muito recomendado, devido à quantidade de dados que devem ser consultados e trabalhados para a geração de um dado de entrada do modelo hidrológico, o qual se sabe da prática, não é muito influente no resultado da simulação.

Por isto, uma estratégia adotada para simplificar a formação da série de dados de evapotranspiração potencial, foi a de estimar médias climatológicas para cada hora do ano. Esta média foi feita utilizando a série calculada de dados horários entre 1998 e 2006, de modo a gerar uma série horária de extensão de um ano, onde o valor de cada hora é dado pela média, desta mesma hora, dos valores de evapotranspiração potencial dos 9 anos da série calculada. Como o objetivo deste trabalho é comparar alterações no sistema de previsão propostos neste trabalho com o sistema em atual operação, estas séries climatológicas foram também empregadas em todas as simulações hidrológicas realizadas deste estudo.

Além da estimativa da precipitação média sobre as sub-bacias por r^{-2} , também foi calculada pelo método de Thiessen (Tucci, 2002), onde cada estação tem um peso proporcional a sua área de influência sobre a bacia. A equação 3.2 demonstra a formulação matemática deste método, onde P é o valor de precipitação médio, p_i é a precipitação no posto i , e δ_i é seu respectivo peso, e N é o número de postos empregados na contabilidade:

$$P = \sum_{i=1}^N \delta_i p_i . \quad (3.2)$$

O somatório dos pesos que exercem influência em uma dada região deve ser sempre igual a 1, e o mesmo é calculado pela fração de sua área de influencia sobre a área da região. Na região de estudos a distribuição destes polígonos é a apresentada pela Figura 3.6. Devido à utilização deste método é que se realizou o procedimento de preenchimento de falhas dos dados das estações telemétricas, pois as informações de todas as estações são consideradas na área de estudo, sem margem à exclusão de períodos de falhas.

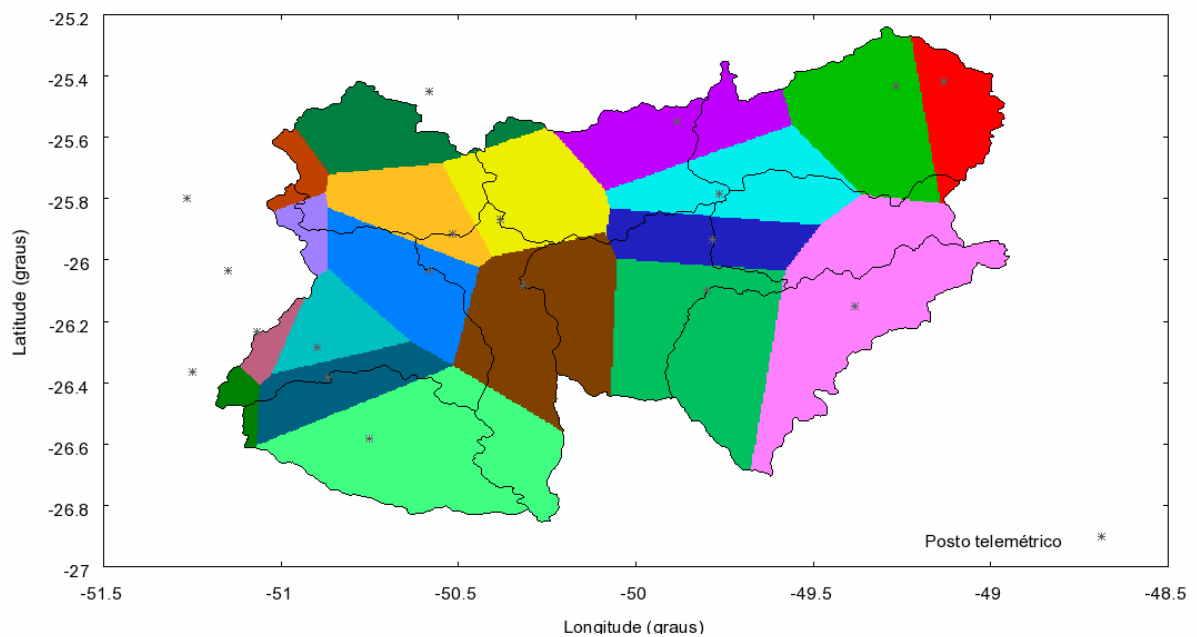


Figura 3.6: Polígonos de Thiessen para a região de estudo

3.2 Área de estudo

O foco principal do sistema de previsão hidrológica a ser implementado é a previsão de níveis críticos de vazões de cheia do rio Iguaçu nas proximidades do município de União da Vitória. Entretanto o sistema atual em operação também realiza previsões hidrológicas para oito pontos a montante de União da Vitória, e outros onze pontos a jusante, sendo que o ponto mais a jusante localiza-se próximo à foz do rio Iguaçu, na afluição com o rio Paraná. Todavia, a previsão hidrológica nos pontos a jusante de União da Vitória não fazem parte deste trabalho, uma vez que seus resultados não afetam a qualidade da previsão hidrológica na área de estudo.

Desta forma a área de estudo fica limitada à região da bacia do rio Iguaçu, que contribui para o aporte de água, até o posto hidrológico localizado próximo ao município de União da Vitória, conforme apresentado na Figura 3.1. Esta região, também denominada de Alto Iguaçu, está localizada na porção sudeste do estado do Paraná e nordeste do estado de Santa Catarina (Figura 3.7), e engloba municípios paranaenses importantes como Curitiba e região metropolitana, União da Vitória e São Mateus do Sul.

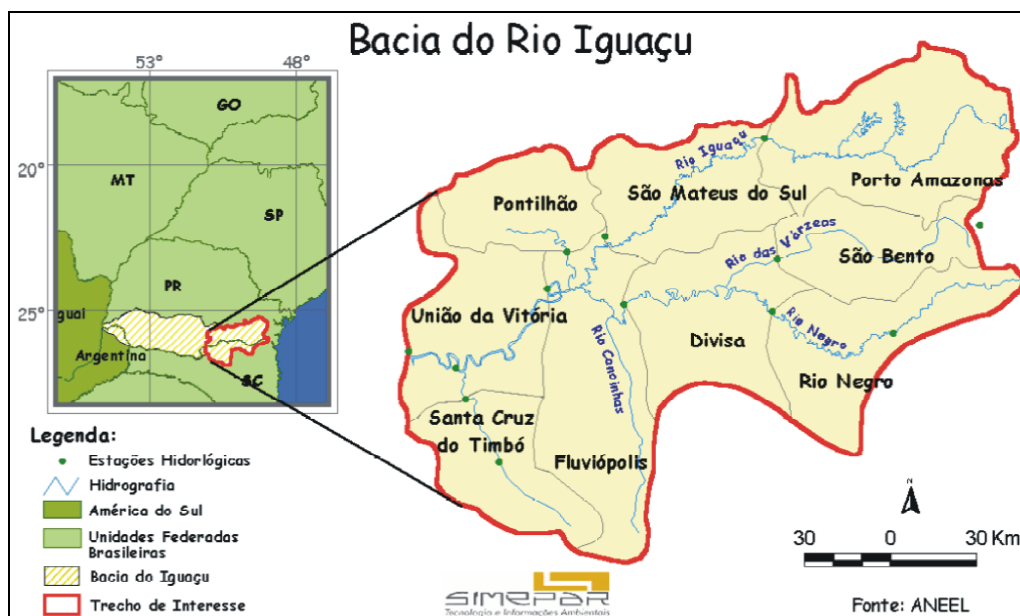


Figura 3.7: Localização da área de estudo

Mine (1998) apresenta um conjunto de informações sobre as características desta bacia hidrográfica como um todo, onde há uma breve descrição do clima local, relevo e geologia. Contudo, não há descrições detalhadas quanto às sub-bacias, de forma que se procurou reunir informações à cerca de tais áreas nesta dissertação. A Figura 3.1 apresenta o conjunto das

nove sub-bacias utilizadas no sistema de previsão hidrológica, tendo suas exutórias demarcadas por alguns dos postos hidrológicos instalados na região. Esta subdivisão da área de estudo em nove sub-bacias é utilizada para garantir que a modelagem hidrológica fique restrita a áreas relativamente pequenas. No caso, áreas inferiores a 4.000 km². A importância de se utilizar uma área pequena é garantir que o modelo concentrado conceitual chuva-vazão, empregado atualmente, apresente resultados satisfatórios. Além deste aspecto, a divisão em sub-bacias torna possível observar a previsão hidrológica em pontos a montante de União da Vitória.

Tabela 3.4: Lista do nome das sub-bacias e suas respectivas áreas de drenagem

Bacia	Nome	Área Total (km ²)	Área Incremental (km ²)
1	Rio Negro	3.379	3.379
2	Porto Amazonas	3.662	3.662
3	São Bento	2.012	2.012
4	Pontilhão	2.190	2.190
5	Santa Cruz do Timbó	2.698	2.698
6	São Mateus do Sul	6.065	2.403
7	Divisa	7.970	2.579
8	Fluviópolis	18.300	2.075
9	União da Vitória	23.993	2.995

Da maneira como esta área está dividida, tem-se um total de cinco bacias de cabeceiras, as quais não recebem aporte de água de outras bacias, e quatro bacias internas, sendo que estas sim recebem a contribuição dos corpos hídricos de outras bacias. Neste trabalho as sub-bacias serão denominadas pelo seu número ou pelo nome do posto hidrológico localizado à exutória da mesma.

A Tabela 3.4 lista o nome das nove sub-bacias, além de apresentar o valor da área total de contribuição para a exutória e a área incremental de cada uma, enquanto que a Figura 3.8 mostra um esquema do fluxo hídrico entre as sub-bacias. Cabe aqui a observação que nas bacias de cabeceiras estas duas áreas apresentam o mesmo valor, pois a única contribuição da bacia é a que provém de sua área incremental.

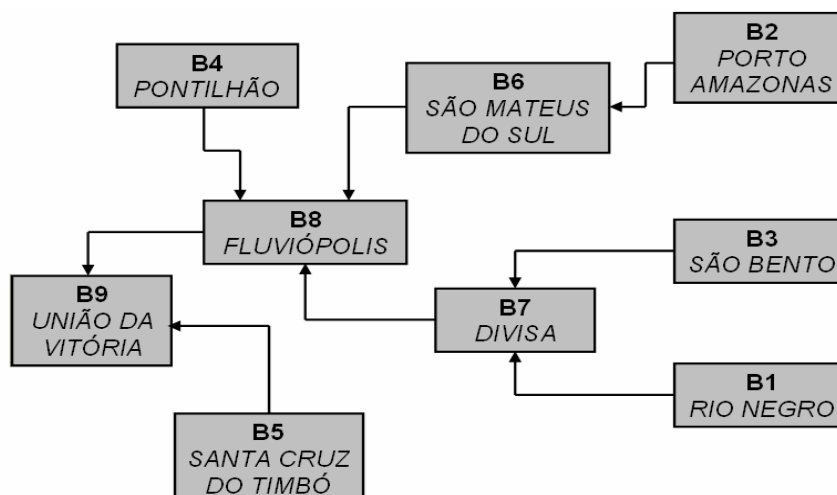


Figura 3.8: Esquema do fluxo hídrico entre as sub-bacias

3.2.1 Caracterização hidrometeorológica

Para a caracterização hidrometeorológica de cada sub-bacia hidrográfica foram analisados os dados de vazão, precipitação média e evapotranspiração potencial média. Os índices estatísticos gerados para cada sub-bacias foram calculados com base na série de dados consistidos, entre 1998 e 2006, oriundos da rede telemétrica do Instituto Tecnológico Simepar, processados conforme os métodos descritos na primeira seção deste capítulo.

Utilizando-se séries de dados horários de vazão, durante o período de 1998 a 2006, foi montada a Tabela 3.5 onde estão agrupadas algumas informações importantes sobre o comportamento da vazão de cada bacia. Nesta tabela estão listados os valores da vazão média (μ) e respectivo desvio-padrão (σ) da série, seguido da porcentagem de dados que se encontram dentro da faixa $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$, o maior e o menor registro da série, e também os meses de maior e de menor deflúvio, seguidos do valor da vazão média nestes meses. O último item da Tabela 3.5 é o coeficiente de deflúvio, calculado conforme:

$$\text{Coeficiente de deflúvio} = \frac{Q_m}{P_m}, \quad (3.3)$$

onde Q_m é a vazão anual média e P_m é a precipitação anual média, ambos em mm/ano. Estas duas variáveis são obtidas em relação à área total de drenagem de cada exutória, e não em relação à área incremental da bacia (Tabela 3.4).

Estes índices estatísticos fornecem informações sobre a magnitude do volume de água escoado em cada bacia, além da amplitude da oscilação da vazão. Os valores de vazão máxima e mínima mostram limites climatológicos para a magnitude da vazão em cada sub-

bacia, enquanto que a constatação dos meses de maior e de menor deflúvio serve de base para caracterização da oscilação sazonal da vazão. O coeficiente de deflúvio mostra uma proporção entre o volume de água precipitado e o volume de água escoado através da seção do rio na exutória.

As propriedades de vazão apresentadas na Tabela 3.5 são dadas em L/s/km^2 para que a análise das séries de vazão das sub-bacias não seja distorcida pela magnitude da área de contribuição total de cada uma. A sub-bacia 3 é a de menor vazão média, $16,83 \text{ L/s/km}^2$, sendo que as bacias 6 e 7 também apresentaram vazão específica média inferiores a 20 L/s/km^2 . Nas demais sub-bacias, à exceção da 5, observa-se uma média da ordem de 22 L/s/km^2 . A maior vazão específica média observada foi na sub-bacia 5, que apresentou um valor de $27,63 \text{ L/s/km}^2$. Quanto à variação da série de vazão, observou-se que os desvios padrões das vazões está entre $11,73 \text{ L/s/km}^2$ da sub-bacia 3 e $26,5 \text{ L/s/km}^2$ da sub-bacia 5. Contudo os valores de desvio padrão são ligeiramente inferiores ao valor da vazão específica média, à exceção da sub-bacia 3 em que o desvio padrão é 5 L/s/km^2 menor que a média.

Pela porcentagem de dados dentro do intervalo $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$, observa-se para todas as bacias um total acima de 80%, sendo que a bacia 3 exibe o menor percentual, 80,9%, enquanto que nas bacias 4, 7 e 9 há 83% da série à distância de um desvio padrão da média, aumentando para 84,4% na bacia 8, e atingindo valores da ordem de 88% nas bacias 1, 2, 5 e 6. Destes três índices conclui-se que a sub-bacia 3 é a de menor vazão específica e também a que apresenta variações mais brandas, de tal modo que a faixa de um desvio padrão em torno da média é mais estreita que nas demais sub-bacias, levando-a a apresentar a menor porcentagem de dados dentro desta faixa. Já a sub-bacia 5 é o oposto, pois exibe valores grandes de vazão específica média e do desvio padrão desta variável. Pode-se supor que esta sub-bacia deve apresentar um tempo de concentração curto, de tal modo que eventos de precipitação são rapidamente escoados para fora da sub-bacia. Todas as demais sub-bacias apresentam comportamentos medianos ao observado nas sub-bacias 3 e 5. Para a bacia total de estudo, representada pelos índices da bacia 9, obteve-se uma vazão concentrada média de $528 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo que em 83,5% do tempo o fluxo do rio neste ponto está entre 73 e $984 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 3.5: Índices estatísticos da série de vazão horária, entre 1998 e 2006, e características climatológicas, das nove sub-bacias

BACIA	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Vazão Média (L/s/km ²)	21,91	21,76	16,83	22,25	27,63	17,31	19,02	21,42	22,02
Desvio Padrão da Vazão (L/s/km ²)	19,85	17,52	11,73	20,95	26,50	16,47	15,65	18,01	18,98
Dados no intervalo [$\mu - \sigma$, $\mu + \sigma$] (%)	88,4	87,8	80,9	82,4	87,3	88,4	83,3	84,4	83,5
Maior Vazão Medida (L/s/km ²)	144,24	164,93	77,98	107,56	208,03	120,89	78,04	110,02	113,98
Menor Vazão Medida (L/s/km ²)	3,17	2,49	2,98	1,37	2,48	2,76	2,25	2,46	1,83
Mês de Maior Vazão Média	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT	OUT
Vazão Média do Mês de Maior Vazão (L/s/km ²)	32,50	30,98	22,0	41,48	54,44	29,18	30,07	36,63	40,17
Mês de Menor Vazão Média	JUN	MAI	JUN	MAI	JUN	JUN	JUN	JUN	JUN
Vazão Média do Mês de Menor Vazão (L/s/km ²)	14,34	14,58	12,05	14,81	19,55	11,45	13,65	15,27	15,86
Coefficiente de Deflúvio (adim.)	0,537	0,494	0,407	0,486	0,522	0,396	0,475	0,424	0,496

O quarto e quinto índice da Tabela 3.5 mostram os extremos das séries de vazão, sendo respectivamente o maior e o menor registro. Quanto à maior medição observada nota-se uma grande faixa de valores, entre 78 L/s/km² nas sub-bacias 3 e 7 e 208 L/s/km² na bacia 5. Em proporção, os maiores registros são das bacias 2 e 5, que foram 7,5 vezes maiores que a vazão média, enquanto que nas demais sub-bacias esta proporção ficou entre 3 e 5 vezes. Para União da Vitória, o maior registro corresponde a uma vazão concentrada de 2.735 m³/s.

Quanto às menores vazões registradas, há uma pequena variação entre 1,37 L/s/km² da bacia 4 e 3,17 L/s/km² da bacia 1, sendo que o menor registro no posto da bacia 9 é de 44 m³/s.

Para a análise da variação mensal da vazão média, são expostos na Tabela 3.5 o mês de maior e o de menor vazão média, juntamente com o valor da vazão média específica destes meses. Em todas as sub-bacias o mês de outubro é o de maior deflúvio, com vazões específicas médias entre 22 L/s/km² da sub-bacia 3 e 54 L/s/km² da sub-bacia 5, sendo que as sub-bacias 1, 2, 6 e 7 apresentam valores da ordem de 30 L/s/km², enquanto que para as sub-bacias 4, 8 e 9 a vazão específica média do mês de maior deflúvio é da ordem de 40 L/s/km². Quanto ao mês de menor deflúvio, junho destaca-se pela menor vazão média em 7 das 9 sub-bacias, pois nas sub-bacias 2 e 4 a menor vazão média é a do mês de maio. A menor vazão específica média é observada na sub-bacia 7, 11,45 L/s/km², sendo que a sub-bacia 3 apresenta a segunda menor vazão do mês de menor deflúvio, 12,05 L/s/km². Nas bacias 1, 2, 4, 7, 8 e 9, este índice é da ordem de 14 a 16 L/s/km² aproximadamente, sendo que novamente a bacia 5 destaca-se pelo maior valor de vazão específica, 19,55 L/s/km² na média do mês de menor deflúvio. Em vazão concentrada para o posto de União da Vitória tem-se a média do mês de maior vazão de 964 m³/s enquanto que no mês de menor deflúvio a média é de 380 m³/s.

Os coeficientes de deflúvio que mostram a fração de água precipitada que foi convertida em vazão observada nos postos hidrológicos variaram pouco entre as sub-bacias. Os menores coeficientes foram observados nas sub-bacias 6, 3 e 8, com valores em torno de 0,40. As sub-bacias 2, 4, 7 e 9 apresentaram coeficientes entre 0,47 e 0,49, enquanto que nas sub-bacias 1 e 5 observa-se os maiores coeficientes, 0,53 e 0,52 respectivamente.

Realizada estas análises sobre a série de vazões, segue-se à análise das características das séries de precipitação média na bacia e evapotranspiração potencial, utilizando-se também da série de nove anos de dados horários. Estas análises são apenas de cunho climatológico, uma vez que a informação de, por exemplo, chuva média horária, não aparenta ser de grande utilidade.

Quanto à evapotranspiração potencial, calculada pelo método de Penman, o valor anual médio para toda a região foi de 1.240 mm, com variação entre 1.160, na bacia 9, a 1.300 mm, na bacia 6.

No cálculo da precipitação média nas sub-bacias, utilizou-se dois métodos distintos, ambos descritos na próxima seção: Inverso da distância ao quadrado entre os postos e um ponto central das sub-bacias; e o método de Thiessen. Em ambos os métodos a chuva anual média de toda a região foi de 1.400 mm, entretanto houve algumas diferenças nos montantes

de cada sub-bacia. Em suma, as maiores diferenças foram nas bacias 1 e 7, onde a chuva anual média difere de aproximadamente 80 mm, o que corresponde a aproximadamente 6 % da precipitação anual em toda a região. Analisando as sub-bacias separadamente, observou-se que a bacia 5 apresenta a maior precipitação anual média, 1.660 mm em ambos os métodos, enquanto que as bacias 1 e 7 obtiveram valores de 1.200 e 1.190 mm respectivamente, a primeira por Thiessen e a segunda por inverso da distância ao quadrado.

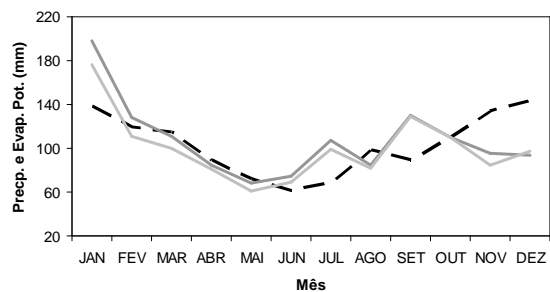
É importante notar que há poucos postos pluviométricos nas bacias 1 e 7, principalmente na região sul destas (Figura 3.1), e esta falta de informação pode interferir, não somente no cálculo da precipitação média como no da evapotranspiração potencial.

Os dados de precipitação e evapotranspiração também foram analisados quanto à variação do acumulado mensal. O gráfico da Figura 3.9, mostra os valores mensais médios de precipitação pelos dois métodos, e também os acumulados mensais da evapotranspiração potencial. Nota-se por esta figura que há, de certa forma, dois tipos de comportamento da precipitação mensal nas bacias. Um primeiro tipo teria janeiro como o mês de maior precipitação, com um segundo período chuvoso em setembro e outubro. Dentro desta característica enquadram-se as bacias 1, 2, 3 e 4. O segundo tipo teria o mês mais chuvoso em outubro, sendo setembro o segundo e janeiro o terceiro. Nesta classe entrariam as bacias 5, 8 e 9, enquanto que as bacias 6 e 7 ficariam em uma posição intermediária, onde janeiro é tão chuvoso quanto setembro e outubro. Já quanto ao período de estiagem, todas as sub-bacias apresentam um menor acumulado mensal entre os meses de abril a agosto, com um leve aumento em julho. Entretanto na bacia 5, o mês de abril apresenta um valor próximo ao de janeiro.

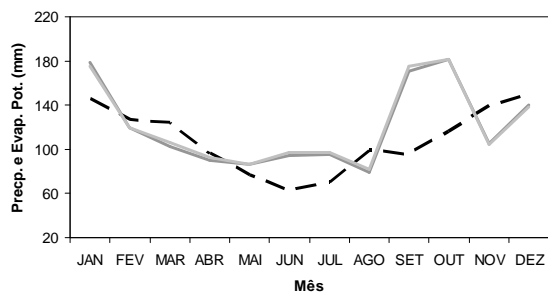
Ainda sobre a Figura 3.9, ao se observar a variação mensal da evapotranspiração potencial, linha preta tracejada, nota-se um comportamento muito semelhante em todas as sub-bacias. Este comportamento é de caráter sazonal, sendo que de janeiro à junho a evapotranspiração potencial diminui praticamente pela metade, de 140 para 70 mm. Enquanto isso, no segundo semestre há um aumento de mesma proporção de julho para dezembro, de tal modo que no verão encontra-se os maiores valores de evapotranspiração potencial, e o oposto para o inverno.

Uma característica que chama atenção nesta região é o fato do mês de agosto ser bastante seco, normalmente mais seco que julho, e em algumas sub-bacias o mês mais seco do ano. Esta particularidade está ligada, provavelmente, ao fato de agosto apresentar um potencial de evapotranspiração maior que a do mês de setembro, o qual tem uma média pluviométrica alta na maioria das sub-bacias.

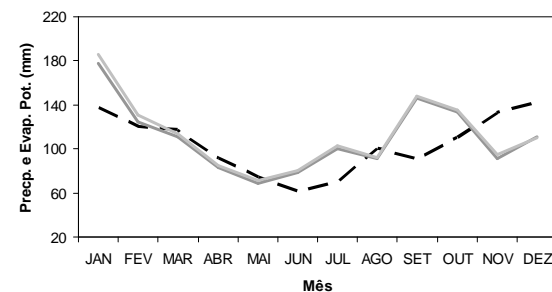
Figura 3.9: Valores de precipitação mensal pelo método de Thiessen (linha cinza claro), por inverso da distância ao quadrado (linha cinza escuro), e evapotranspiração potencial pelo método de Penman (linha preta tracejada), das nove sub-bacias



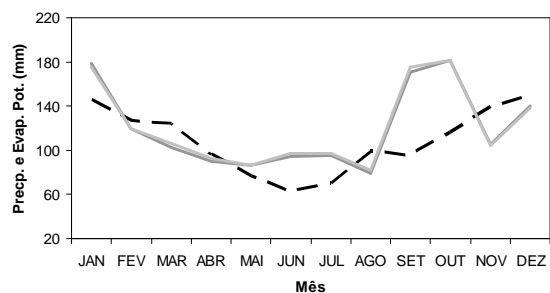
(a) B1 – Rio Negro



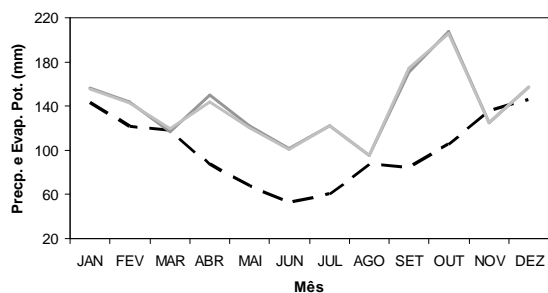
(b) B2 – Porto Amazonas



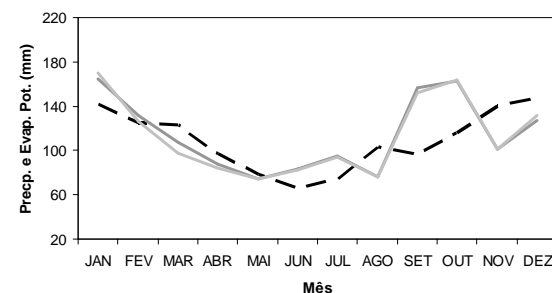
(c) B3 – São Bento



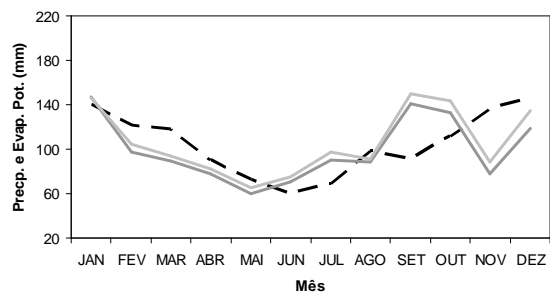
(d) B4 – Pontilhão



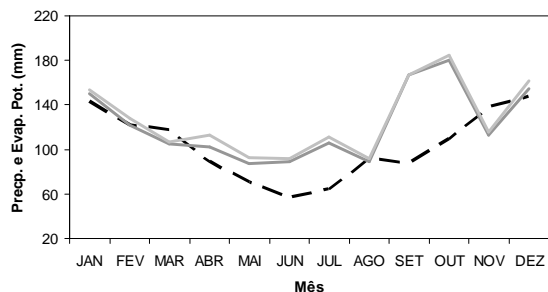
(e) B5 – Santa Cruz do Timbó



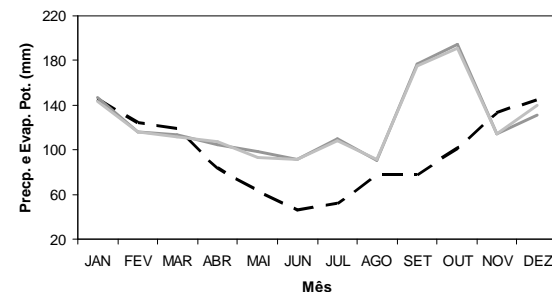
(f) B6 – São Mateus do Sul



(g) B7 – Divisa



(h) B8 – Fluviópolis



(i) B9 – União da Vitória

3.2.2 Caracterização dos tipos de solos

Encerrada as análises dos dados hidrometeorológicos, procedeu-se com uma caracterização dos tipos de solo da região de estudo, seguido de uma breve descrição das características principais de cada classe de solo. Esta descrição servirá para melhor fundamentar a avaliação de aspectos tais como erodibilidade e permeabilidade nas sub-bacias. Na seqüência é descrito o relevo da região, seguida de uma análise conjunta com os tipos de solo para cada uma das nove sub-bacias.

Dentre todas as classes de solo listadas pela Embrapa, a região do Alto Iguaçu possui nove destas classes, conforme visualizado no mapa da Figura 3.10. Olhando a bacia como um todo, nota-se uma porção maior de Cambissolo Háplico, principalmente na região mediana da bacia. Na região mais a leste encontram-se também presentes em grandes regiões os Argissolos e Latossolos, ambos vermelhos-amarelos, sendo o primeiro ocorrendo mais ao sul e o segundo ao norte. Na porção oeste da bacia há grande ocorrência de Neossolo Litólico, ao norte, Latossolo Vermelho, na porção central e norte, e Cambissolo Húmico na porção ao sul. Observa-se também que o Gleissolo Háplico ocorre com bastante frequência às margens do rio Iguaçu, na região centro-oeste e também nordeste da bacia. Quanto aos solos Argissolo Vermelho e Nitossolo Háplico, observa-se uma pequena porção do primeiro no extremo nordeste da bacia, e do segundo no extremo sudoeste.

Uma melhor descrição destes solos pode ser encontrada em EMBRAPA (1999) e Cunha e Guerra (2001), sendo que aqui são descritos apenas os aspectos mais importantes para um estudo hidrológico, como composição do solo, drenagem e erodibilidade.

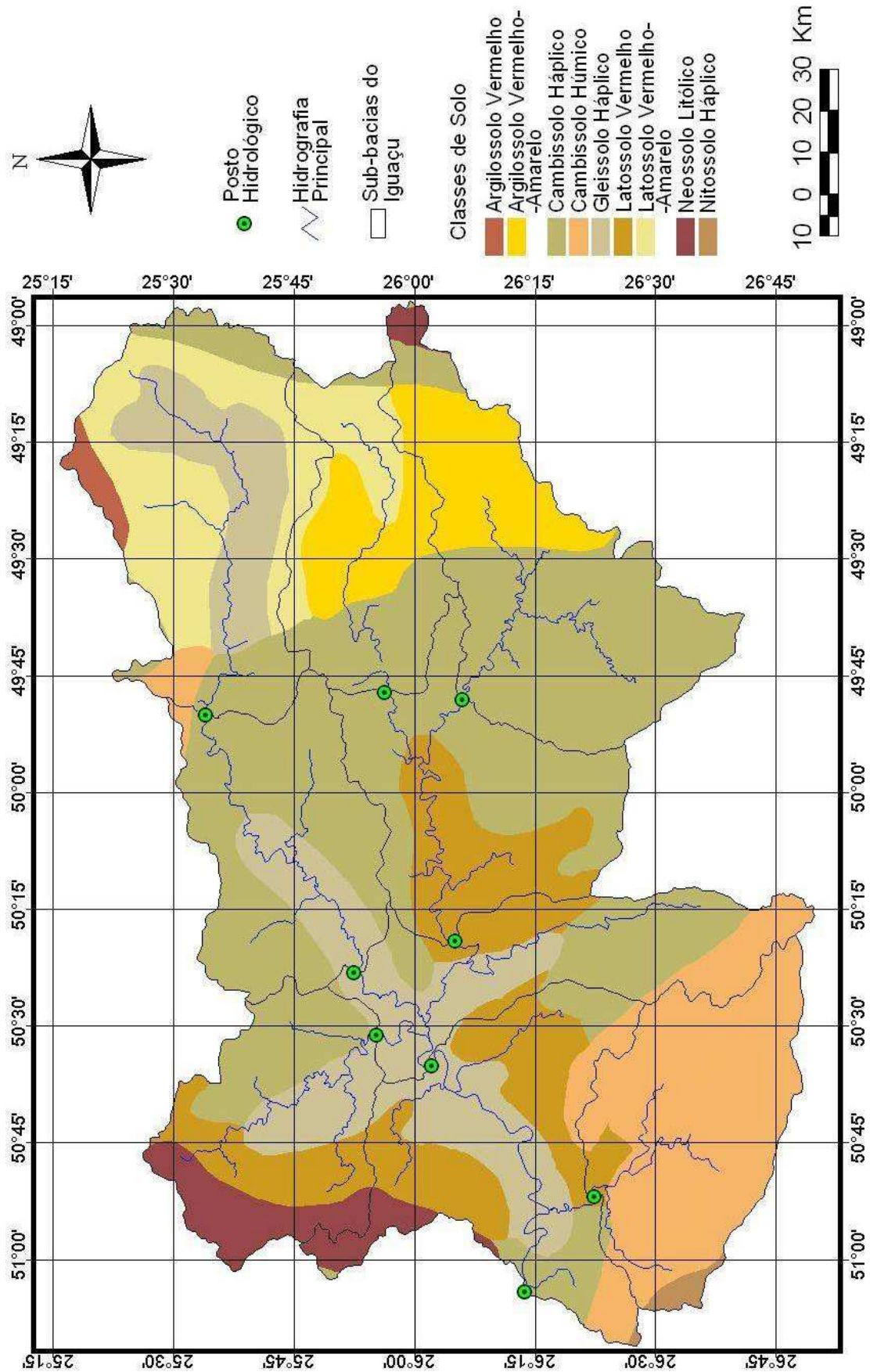


Figura 3.10: Mapa das classes de solo da área de estudo, segundo classificação da EMBRAPA

Descrição dos tipos de solos:

- *Argissolos*: Denominados antigamente de Solos Podzólicos, são constituídos por material mineral, com teor de argila crescente com a profundidade, apresentando um horizonte superficial mais arenoso passando para um horizonte subsuperficial argiloso. Esta estrutura favorece escoamentos superficiais e subsuperficiais até a zona de contato dos dois materiais, sendo que a permeabilidade da zona subsuperficial é baixa. Geralmente apresentam cores avermelhadas e amareladas, apresentando drenagem variável, desde forte até imperfeitamente drenados, com profundidades variáveis. Este solo apresenta uma certa suscetibilidade à erosão devido a descontinuidade textural ao longo do perfil (Cunha e Guerra, 2001);
- *Cambissolos*: As características desta classe de solo variam muito de um local para o outro devido a fatores como o material de origem, formas de relevo, e condições climáticas (EMBRAPA, 1999). São constituídos por material mineral com horizonte subsuperficial incipiente, de textura variando de franco-arenosa à muito argilosa, geralmente apresentado alto teor de silte. O teor de argila é variável entre os horizontes, podendo ocorrer situações onde o horizonte superficial mais argiloso que o horizonte seguinte. Assim, a classe apresenta solos desde fortemente até imperfeitamente drenados, com profundidades entre rasos profundos, de cor bruna ou bruna-amarelada até vermelho-escuro. O grau de suscetibilidade à erosão é variável, sendo dependente principalmente da profundidade do solo, da declividade do terreno, do teor de silte e do gradiente textural (Cunha e Guerra, 2001);
- *Gleissolos*: São solos hidromórficos, constituídos por material mineral, podendo apresentar uma camada superficial com alto teor de matéria orgânica. São típicos de planícies aluviais e várzeas, e encontram-se permanente ou periodicamente saturados por água, o que lhes a característica de mal drenados. Apresentam cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas devido as atividades anaeróbias que ocorrem nestes solos quando encharcados (EMBRAPA, 1999). São geralmente solos pouco profundos e por situarem em regiões planas, apresentam uma baixa suscetibilidade à erosão. (Cunha e Guerra, 2001);
- *Latossolos*: Também constituídos por material mineral, são solos muito evoluídos, apresentando baixa concentração de minerais primários ou secundários, devido ao avançado estágio de intemperização. Variam de fortemente a bem drenados, podendo ocorrer situações transicionais onde são imperfeitamente drenados. São

normalmente muito profundos, com pouca diferenciação entre os horizontes. Quanto à coloração, nota-se geralmente cores mais escuras no horizonte superficial e cores mais vivas no horizonte seguinte, variando desde amarelas até vermelho-escuro-acizentadas (EMBRAPA, 1999). Este tipo de solo é bastante poroso e permeável, com textura que varia entre média e muito argilosa. Estas características garantem um aspecto de pouco suscetíveis à erosão (Cunha e Guerra, 2001);

- *Neossolos*: Ou Solos Litólicos conforme a classificação antiga, são constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso, geralmente pouco evoluídos. São solos pouco profundos, geralmente localizados em áreas muito acidentadas, onde há afloramentos de rocha, podendo existir um horizonte subsuperficial muito pequeno. Porém, em geral, o horizonte superficial está em contato direto com a rocha matriz, de modo que boa parte de sua constituição são fragmentos desta mesma rocha. Devido a pequena espessura, esses solos ficam rapidamente saturados, intensificando o escoamento superficial, e em subsuperfície, na zona de contato solo-rocha. Este processo aumenta bastante a erodibilidade do solo, facilitando a ocorrência de deslizamentos em encostas mais íngremes (Cunha e Guerra, 2001);
- *Nitossolos*: Corresponde às classes Terra Roxa Estruturada e Terra Bruna Estruturada da antiga classificação, os Nitossolos são constituídos por material mineral com horizonte subsuperficial nítico de textura argilosa ou muito argilosa. A transição entre os horizontes superficial e subsuperficial é difusa, pouco nítida, apresentando como um todo, baixo gradiente textural. São solos profundos e bem drenados, de coloração variando de vermelho a brunada (EMBRAPA, 1999). Apesar da textura bastante argilosa, são bastante porosos, e portanto, permeáveis, ficando mais suscetível à erosão somente em regiões mais inclinadas e ou de drenagem imperfeita (Cunha e Guerra, 2001).

3.2.3 Caracterização do relevo

Descritas as classes de solo encontradas na região de estudo, prosseguiu-se com o estudo do relevo da região, para então distinguir algumas características específicas de cada bacia, levando-se em consideração o tipo de solo e a inclinação do terreno.

A Figura 3.11 mostra o mapa hipsométrico da bacia do Alto Iguaçu, onde a altitude é representada por faixas de valores. De modo geral a bacia apresenta altitudes entre 700 e 1.500 metros, sendo que as maiores altitudes encontram-se nos divisores d'água da bacia

cinco, no divisor leste da bacia quatro, e no divisor nordeste da bacia 1. A região mais baixa, e menos acidentada, é observada na faixa que acompanha a hidrografia da Figura 3.11, nas bacias 8 e 9. As bacias de cabeceiras, 1 a 5, apresentam maior variação das classes de altitude, caracterizando regiões mais acidentadas, enquanto que nas bacias internas, 6 a 9, já é possível notar uma certa predominância das faixas de altitude mais baixas, além de um gradiente menor na variação das altitudes. Esta configuração do relevo pode influenciar no tempo de resposta de cada bacia à ocorrência de chuva, de modo que bacias mais íngremes apresentam um aumento de vazão, devido à ocorrência de chuva, em um tempo menor que bacias com menor inclinação. Tal fato decorre principalmente da diferença na velocidade do escoamento superficial, que é mais veloz quanto mais inclinado for o terreno.

3.2.4 Caracterização por sub-bacia

Feitas as considerações mais gerais sobre solo e relevo da bacia em estudo, foi realizada uma análise destes aspectos para cada uma das nove sub-bacias do sistema de previsão hidrológico. O intuito desta análise é levantar aspectos que influenciem no comportamento hidrológico de cada bacia, tais como: capacidade de armazenamento do solo, dado pela profundidade e nível de drenagem do solo; tempo de resposta da bacia, dado pela inclinação da mesma, além de outros fatores; e intensidade de remoção do solo pela suscetibilidade à erosão das classes de solo encontradas em cada bacia.

Na bacia 1, Rio Negro, percebem-se duas classes preponderantes: Cambissolo Háplico, na metade próxima a exutória; e Argissolo Vermelho-Amarelo, na outra metade. Quanto ao relevo, observam-se maiores inclinações na porção sul da bacia, e em uma faixa estreita próxima ao divisor de água na parte norte-nordeste. O relevo acidentado da porção sul, combinado com Cambissolo pode indicar um solo mais raso, suscetível à erosão. Entretanto na região próxima aos cursos d'água, onde ocorre Cambissolo, é possível que ocorra o contrário. Enquanto isso o Argissolo, que apresenta um horizonte superficial de caráter mais arenoso e um subsuperficial argiloso, é mais suscetível à erosão e pouco permeável. Isto indica que boa parte da chuva ocorrida nessa região, escoar superficialmente e subsuperficialmente. Observa-se também uma região de Neossolo no extremo leste da bacia, onde a erodibilidade é alta, todavia ocorre numa área reduzida. Dadas estas informações, é possível supor que esta bacia apresente uma resposta entre moderada e rápida à ocorrência de chuva, com uma capacidade de armazenamento reduzida.

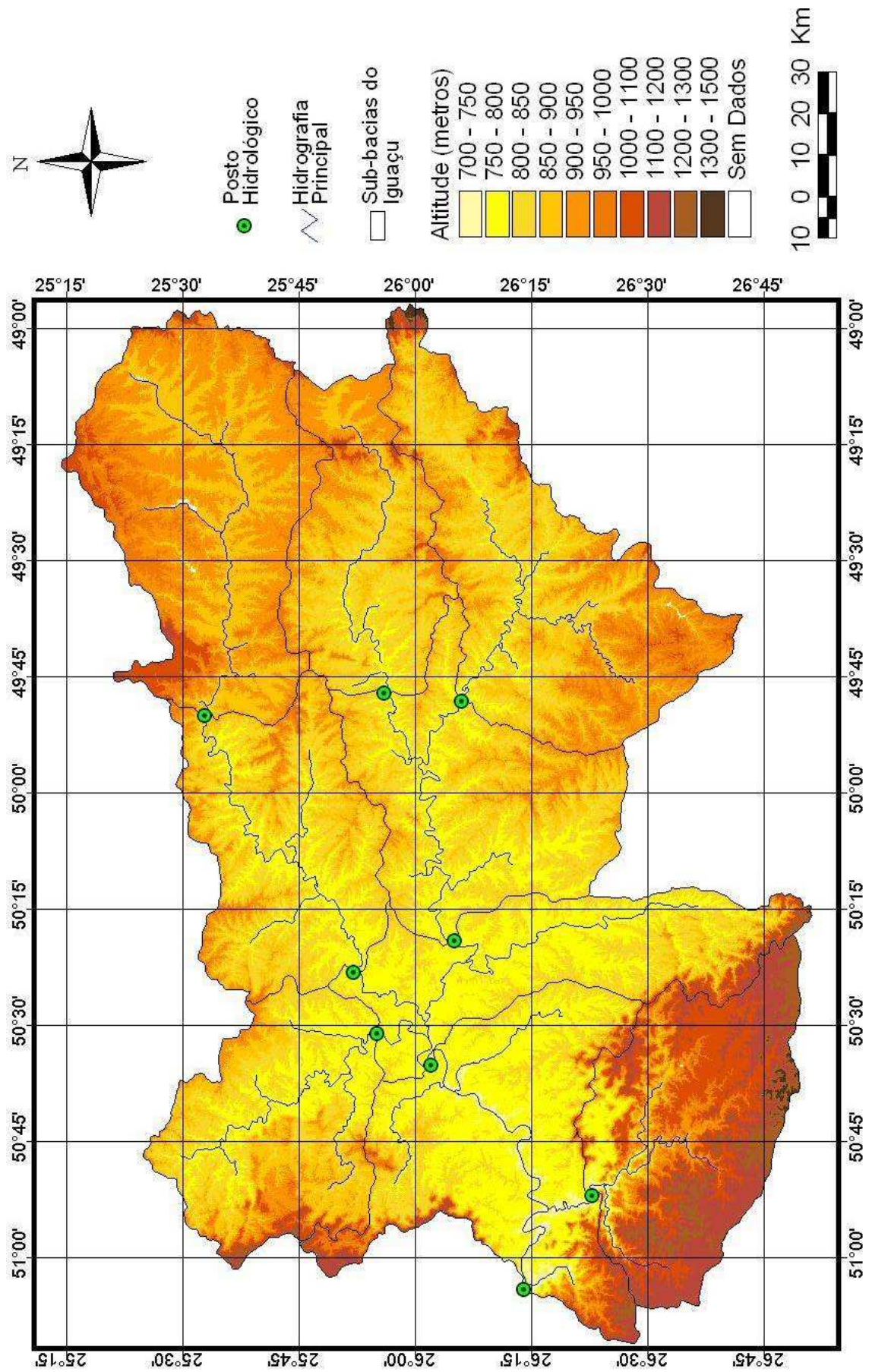


Figura 3.11: Mapa hipsométrico (faixas de altitude) da área de estudo

A bacia 2, Porto Amazonas, apresenta quatro classes de solo, sendo uma faixa de Gleissolo em torno do curso d'água principal, envolto por uma região de Latossolo Vermelho-Amarelo, com a ocorrência de Cambissolo na região próximo à exutória, e no extremo leste da bacia. Verifica-se também uma pequena porção de Argissolo Vermelho na região norte desta bacia. A maior parte da área desta bacia é composta por Latossolo e Gleissolo, que são de baixa erodibilidade, sendo que o Latossolo, bastante permeável e profundo, encontra-se numa região um pouco mais acidentada que a do Gleissolo. Entretanto este último é caracterizado por pequena permeabilidade, o que teoricamente encurta o tempo de resposta da bacia, em contraposição à porção de Latossolo. Das regiões de Cambissolo, tanto a porção leste como oeste, a inclinação elevada do terreno implica em maior suscetibilidade à erosão, baixa capacidade de armazenamento e favorecimento de ocorrência de escoamento superficial. A porção de Argissolo é bastante reduzida em relação ao restante da bacia, de modo que não deve interferir de modo significativo nas características desta bacia. Unindo estas características observa-se que somente na porção de Latossolo é que há uma maior capacidade de armazenamento de água pelo solo, enquanto que nas demais regiões ocorre o oposto, baixo armazenamento. Quanto ao tempo de resposta, credita-se à inclinação do terreno e solos de baixa permeabilidade, eventos de aumento da vazão logo após a observação de chuva na bacia, ou seja, rápida resposta.

Na terceira bacia, São Bento, há predominância de Cambissolo no terço da área mais próximo à exutória, Argissolo Vermelho-Amarelo no terço central, e Latossolo Vermelho-Amarelo no primeiro terço. Neste primeiro terço o relevo é bastante inclinado o que garantiria uma rápida resposta à precipitação. Entretanto a presença do Latossolo garante uma maior capacidade de absorção d'água da chuva, com baixa suscetibilidade à erosão, reduzindo a ocorrência de escoamentos superficiais. Já o Argissolo do terço intermediário é menos permeável e com maior suscetibilidade à erosão. No terço de Cambissolo, o relevo tem uma inclinação reduzida, podendo-se supor então, que nesta região, há uma maior capacidade de armazenamento e erosão de baixa intensidade. Com isto, supõe-se que, a bacia três, deve comportar uma boa quantidade de água no solo, sendo que a resposta da vazão à ocorrência de chuva é um pouco lenta, em comparação às demais bacias de cabeceiras.

Em Pontilhão, bacia 4, há uma faixa de Neossolo próximo ao divisor d'água na região oeste, passando para uma faixa de Latossolo Vermelho e então para uma região de Gleissolo na região mais central, onde há o curso d'água principal desta bacia, enquanto que na porção leste predomina o Cambissolo. O Neossolo, que normalmente já está associado a terrenos acidentados, é bastante erodível, raso e permeável, indicando uma região de baixo

armazenamento do solo e alta taxa de escoamento superficial. O Latossolo, entre as regiões de Neossolo e de Gleissolo, é profundo, permeável e pouco erodível, garantindo um maior armazenamento de água no solo para esta região. Entretanto este solo encontra-se numa região ainda bastante inclinada, de modo que chuvas mais intensas devem gerar escoamentos superficiais intensos, após encharcamento do solo. Na porção de Gleissolo, há baixa permeabilidade, mas também baixa suscetibilidade à erosão devido ao relevo mais suave. E no Cambissolo, que também ocupa uma região pouco ondulada, é possível que ocorra um maior armazenamento de água pelo solo, com erosão de baixa intensidade. Assim, supõe-se que na bacia 4, o tempo de resposta esteja ligado à intensidade da precipitação ocorrida, ou melhor, à intensidade de formação de escoamento superficial. Deste modo a resposta da bacia pode variar entre moderada e rápida. Quanto à suscetibilidade a erosão, é garantido que somente a região ocupada por Neossolo mostra-se bastante suscetível, enquanto que no restante da bacia, aproximadamente 3/4 da área, a erosão ocorra com baixa intensidade.

A bacia 5, Santa Cruz do Timbó, está em quase toda a sua extensão ocupada por Cambissolo Húmico, com uma pequena porção de Latossolo Vermelho próximo à exutória e de Nitossolo na região oeste. Contudo o fato mais proeminente desta bacia é o seu relevo muito acidentado, com uma variação entre o ponto mais alto e o mais baixo em torno de 600 metros. Como o Cambissolo é muito dependente de condições regionais, intui-se que nesta bacia, esta classe de solo possa apresentar uma baixa profundidade, e conseqüente baixa capacidade de armazenamento d'água. Deste modo os escoamentos superficiais e subsuperficiais devem ser bastante intensos, caracterizando esta bacia como a de resposta mais rápida entre todas as demais. O destacamento do solo provocado por estes escoamentos deve também elevar a intensidade do processo erosivo na bacia, podendo acarretar em grandes perdas de solo dependendo do uso do solo na região.

Iniciando a análise das bacias internas, percebe-se na bacia 6, de São Mateus do Sul, a predominância do solo do tipo Cambissolo, com uma faixa de Gleissolo em volta do curso d'água principal entre a região central da bacia e a exutória. O relevo nesta bacia mostra-se um pouco acidentado nas regiões próximas aos divisores d'água norte, leste e sudeste, enquanto que na região de ocorrência do Gleissolo a variação da altitude é mais suave. Desta configuração de solo e relevo espera-se que, na região de Cambissolo, seja observada uma capacidade de retenção de água no solo, e suscetibilidade à erosão, medianas. Quanto à região do Gleissolo, deve ocorrer erosão de baixa intensidade, porém uma pequena capacidade de absorção de água pelo solo. Deste modo o tempo de resposta à ocorrência de chuva nesta bacia, deve variar conforme a intensidade do evento, onde eventos mais intensos, que

encharcam rapidamente o solo, são rapidamente convertidos em escoamento superficial. Entretanto em chuvas de menor intensidade, o solo é capaz de reter a maior parte da água precipitada.

Na bacia de Divisa, bacia 7, observa-se um relevo mais suave em boa parte da bacia, sendo que regiões um pouco acidentadas ocorrem no divisor d' água norte e na região sudeste da bacia. Nestas duas áreas e mais a porção leste da bacia, onde aporta os cursos d' água das bacias 1 e 3, o solo é basicamente constituído de Cambissolo Háplico. Porém na área restante da bacia, centro e oeste, observa-se principalmente a presença de Latossolo Vermelho. Como o Cambissolo está presente nas regiões mais inclinadas desta bacia, pode-se supor que suas características sejam: baixa profundidade e suscetível à erosão. Já o Latossolo, que ocorre numa região mais plana, é caracterizado por ser profundo, permeável e resistente à erosão. Dados estas características, e observando-se pela figura 1 que ambas as classes ocupam áreas de mesma magnitude na bacia 7, espera-se que de modo geral esta bacia tem valores medianos de capacidade de armazenamento, suscetibilidade à erosão e tempo de resposta à ocorrência de chuvas.

A oitava bacia, Fluviópolis, mostra-se predominantemente como de relevo pouco inclinado, especialmente nas regiões central e norte. Entretanto o divisor d' água que faz fronteira com a bacia 5, encontra-se numa área muito acidentada, assim como praticamente toda a região sul e sudoeste desta bacia. Esta parte mais acidentada a bacia está ocupada por Cambissolo, sendo que esta associação pode atribuir ao solo da região as características de ser raso, bastante suscetível à erosão, e baixa capacidade de retenção d' água proveniente da chuva. Na região central desta bacia há a ocorrência de Latossolo Vermelho próximo às bordas enquanto que o meio é ocupado por Gleissolo. Estes dois solos são pouco suscetíveis à erosão, entretanto a capacidade de armazenamento de água no Gleissolo é pequena devido a sua baixa permeabilidade, enquanto que no Latossolo, profundidade e permeabilidade elevadas garantem uma maior retenção d' água. Por fim, na porção norte percebe-se predominância de Gleissolo com pequenas regiões de Cambissolo. Dado o relevo pouco ondulado, a intensidade da erosão nesta região deve ser baixa porém, dada as características destes dois tipos de solo, a capacidade de armazenamento de água deve ser no máximo mediana, devido à baixa permeabilidade e pouca profundidade. Consolidando estas informações, supõe-se que na ocorrência de chuva sobre esta bacia, o tempo para observar um aumento na vazão da exutória não deve ser um alto, em relação às demais bacias analisadas, devido a grande ocorrência de solos pouco permeáveis. Entretanto, devido ao relevo, a erosão de modo geral nesta bacia não é muito intensa.

Finalizando as análises das características de relevo e solo das sub-bacias, observa-se na bacia nove, União da Vitória, quatro classes principais de solo: Nitossolo, Latossolo, Gleissolo e Cambissolo. O canto noroeste da bacia é ocupado por Nitossolo, que é típico de regiões muito íngremes, como a área em questão. Obviamente esta combinação implica em um solo raso, que encharca-se rapidamente, transformando praticamente toda a precipitação em escoamentos superficiais e subsuperficiais. Em volta do curso do rio Iguaçu há uma zona de Gleissolo, que também é típico de planícies aluviais, de relevo quase plano. Esta característica do relevo garante uma baixa suscetibilidade à erosão, porém o solo aí presente encontra-se boa parte do tempo encharcado, de modo que boa parte da precipitação sobre esta área dirige-se superficialmente ao corpo hídrico. O Latossolo, que aparece na região central da bacia, em torno do Gleissolo, associado ao relevo pouco inclinado, serve como grande armazenador de água da chuva, devido a sua grande profundidade e permeabilidade. Também nesta região a suscetibilidade à erosão é baixa. Nos cantos sudeste e sudoeste há a presença de Cambissolo, sendo que a parte a oeste é bastante acidentada, enquanto que a porção leste é um pouco mais regular. Deste modo espera-se que a porção sudoeste seja rápida conversora de chuva em escoamentos superficiais e subsuperficiais, enquanto que a porção sudeste seja capaz de reter uma maior quantidade de água, contribuindo para o aporte de água no corpo hídrico através de escoamentos subterrâneos. De modo geral, a bacia nove apresenta uma grande região de baixa erodibilidade, porém há também uma região de tamanho considerável, próxima ao corpo hídrico principal e à exutória, onde a chuva é rapidamente escoada. O armazenamento de água no solo deve ser mais expressivo somente nas regiões de Latossolo. Deste modo percebe-se que a bacia de União da Vitória é bastante variada.

Um fato importante a ressaltar, quanto à avaliação do tempo de resposta das sub-bacias, é que nas bacias internas, como há a propagação do volume de água das bacias à montante, pode ocorrer que este volume seja muito superior ao gerado pelo escoamento da bacia. Deste modo torna-se mais difícil perceber variações no hidrograma devido somente à precipitação ocorrida na área incremental da sub-bacia.

3.3 Funções objetivo e métodos de calibração automática

Conforme apresentado no capítulo anterior, modelos do tipo conceitual chuva-vazão são, geralmente, super-parametrizados e o resultado da simulação hidrológica destes modelos é dependente de uma calibração adequada destes parâmetros, além é claro, do fornecimento de dados hidrometeorológicos consistentes. Entretanto o ajuste destes parâmetros também apresenta algumas complicações, sendo que uma alternativa viável é a utilização de rotinas computacionais de calibração automática. Estas rotinas executam procedimentos que visam minimizar uma determinada função, ou melhor, visam encontrar pontos de mínimo desta função. Esta função, denominada de função objetivo, envolve geralmente alguma comparação entre o resultado da vazão simulada e a vazão observada, em um certo ponto da bacia hidrográfica. Simon e Diskin (1977) mostraram que a escolha da função objetivo influi na qualidade do resultado da simulação, sendo que, conforme o uso requerido do modelo uma função objetivo pode apresentar melhores resultados em relação à outra.

Posto isto, foram definidas neste estudo duas funções objetivo. A primeira, que também será denotada por $f1$, foi a função utilizada na calibração dos parâmetros que estão sendo usados atualmente no SISPSHI. Esta função é dada pela equação (3.4), na qual o seu valor é calculado com base no módulo do valor médio do resíduo, entre vazão modelada e vazão observada, e também no seu desvio padrão:

$$f1 = 0,3 \frac{|\bar{x}_{RES}|}{\bar{x}_{Qobs}} + 0,7 \frac{s_{RES}}{s_{Qobs}}, \quad (3.4)$$

onde \bar{x}_{RES} e s_{RES} são o valor médio e o desvio padrão, do resíduo absoluto, respectivamente. Do mesmo modo, \bar{x}_{Qobs} e s_{Qobs} representam o valor médio e o desvio padrão da série de vazão observada utilizada na calibração. A utilização destas duas últimas variáveis visa normalizar o valor da função objetivo, de modo que o resultado esteja entre 0 e 1. Note também que são atribuídos pesos aos termos desta função, sendo que foi usado um peso maior, de 70 %, no termo do desvio padrão, o que teoricamente garante uma maior fidelidade do modelo a eventos de grande variação da vazão.

A segunda função objetivo testada neste trabalho pode ser denominada de média da raiz do erro quadrático, denotada por $f2$ e calculada conforme:

$$f2 = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{mod_i} - Q_{obs_i})^2}, \quad (3.5)$$

onde Q_{mod_i} é a vazão modelada e Q_{obs_i} é a vazão observada na hora i , dado as N horas da série de calibração. Gan, Dlamini e Biftu (1997) mostraram que a escolha desta função objetivo promove resultados melhores nos picos de vazão, e dado que o objetivo deste trabalho é melhorar a previsão hidrológica, justamente, de picos de vazão, esta função foi testada como uma possível alternativa de melhoria do sistema.

Antes da apresentação dos algoritmos dos métodos de otimização de parâmetros faz-se necessário definir o termo “série sintética”, que é muito utilizado em trabalhos referentes a calibrações de modelos. A série sintética nada mais é do que a série de vazão modelada de uma bacia hidrográfica, utilizando-se dos dados de entrada observados na região, mas com parâmetros escolhidos pelo usuário do modelo. Esta série serve para verificar o quão bom é uma rotina de otimização de parâmetros. Ao fornecer a série sintética no lugar da série observada para a rotina de otimização, espera-se que os parâmetros resultantes sejam bastante próximos aos utilizados para a própria geração da série sintética, uma vez que os dados de entrada e condições iniciais sejam os mesmos.

3.3.1 Algoritmo do método *Simplex Downhill*

O método utilizado para calibrar os parâmetros vigentes do SISPSHI foi o *Simplex Downhill* de Nelder e Mead (1965). Este método consiste em aplicar certas operações a um conjunto pré-definido de pontos, onde entende-se por “ponto” um conjunto dos n parâmetros do modelo, alterando suas posições em direção a uma região de mínimo da função objetivo, até atingir algum critério de parada. Este critério de parada pode ser: (i) atingir uma tolerância, F_{TOL} , em relação à diferença entre o maior e o menor valor da função objetivo, dentre os pontos na rotina; (ii) ultrapassar um número máximo de iterações, it_{MAX} . Também deve ser fornecido à rotina os limites, máximos e mínimos, de cada parâmetro, o que evita a geração de parâmetros irreais, como parâmetros de valores exorbitantes. Posto isso, segue-se a descrição do algoritmo do método *simplex*:

1. Gere uma matriz inicial de $n+1$ pontos, calcule o valor da função objetivo de todos os pontos e inicie um contador de iterações, $iter$, em zero;
2. Identifique o melhor ponto do grupo (menor valor da função objetivo) e também o pior (maior valor) e o segundo pior ponto (segundo maior valor). Guarde suas posições na matriz, nas variáveis ILO , IHI e $INHI$, respectivamente;
3. Calcule a fração de variação do valor da função objetivo, R_{TOL} , por:

$$R_{TOL} = 2 \times |FO_{IHI} - FO_{ILO}| / |FO_{IHI} + FO_{ILO}|; \quad (3.6)$$

4. Se $R_{TOL} \leq F_{TOL}$, ou $iter > it_{MAX}$, encerra a busca. Caso contrário, incremente $iter$ e siga;
5. Calcule o ponto centróide, $psum$, pela média dos parâmetros entre todos os pontos da matriz, excetuando-se o pior ponto desta contabilidade;
6. Execute um passo de reflexão, conforme: $pr = 2 \times psum - p_{IHI}$; e calcule o valor da função objetivo para pr . Porém antes, verifique se algum parâmetro excedeu seus limites, e em caso positivo substitua o parâmetro refletido pelo limite excedido;
7. Se o valor da função objetivo do ponto de reflexão, FO_{pr} , for menor que FO_{ILO} , execute o passo de extensão, caso contrário salte para o passo 9. O passo de extensão é obtido por: $pe = 2 \times pr - psum$; e o valor da função neste ponto é armazenada em FO_{pe} ;
8. Se $FO_{pe} < FO_{IHI}$, então substitua o ponto de extensão no lugar do pior ponto da matriz de pontos. Caso contrário substitua o ponto de reflexão no lugar do pior ponto da matriz, e volte ao passo 3;
9. Se $FO_{pr} \leq FO_{IHI}$, substitui o pior ponto pelo ponto de reflexão e volta ao passo 3. Caso contrário segue para o próximo passo;
10. Se $FO_{pr} \leq FO_{IHI}$, substitui o pior ponto pelo ponto de reflexão e calcula o ponto de contração como: $pc = 0,5 \times (psum + p_{IHI})$, e armazene o valor da função objetivo deste ponto em FO_{pc} ;
11. Se $FO_{pc} \leq FO_{IHI}$, substitui o pior ponto pelo ponto de contração e volte ao passo 3. Caso contrário execute uma contração múltipla, ou seja, contraia todos os pontos em direção ao melhor, conforme: $pi = 0,5 \times (pi + p_{ILO})$, sendo pi os demais pontos da matriz, com a exceção do melhor ponto, ILO ;
12. Retorne ao passo 3 até atingir algum dos critérios de convergência.

Duan, Sorooshian e Gupta (1992) realizaram testes do *Simplex* para a calibração dos seis parâmetros de um modelo hidrológico, utilizando uma série sintética. Os resultados mostraram que o *Simplex* é incapaz de chegar ao mínimo global da função objetivo, pois foram testados vários conjuntos iniciais de parâmetros e a rotina devolveu pontos mínimos diferentes para cada simulação. Quanto à escolha dos critérios de parada, foram adotados os mesmos utilizados na calibração dos parâmetros em vigência no SISPSHI, de modo que a comparação dos resultados testados neste trabalho, com os resultados do sistema em operação, não fossem prejudicados. Estes critérios de parada, para o *Simplex*, foram: valor de 5×10^{-6} para F_{TOL} e it_{MAX} igual a 1.000 para o modelo 3R e de 4.000 para o modelo de Sacramento, pois este tem sete parâmetros a mais que o primeiro.

3.3.2 Algoritmo do método Shuffled Complex Evolution

O segundo método de calibração testado foi o *Shuffled Complex Evolution* desenvolvido na Universidade do Arizona, e assim denotado por *SCE-UA*. Este método, desenvolvido por Duan, Sooroshian e Gupta (1992), é enunciado como uma ótima rotina para procura de mínimo global da função objetivo. Seu algoritmo é um pouco mais complexo que o do *Simplex*, pois envolve alguns componentes extras como competição evolutiva e embaralhamento de grupos. Esta rotina também conta com alguns parâmetros internos, que são ajustados pelo usuário para melhorar a eficiência e a eficácia do método. Entende-se por eficiência, a quantidade de vezes que a função objetivo é calculada até que se atinja um critério de parada. Já o conceito de eficácia refere-se ao quão preciso é o ponto de mínimo obtido pela rotina. Quanto aos critérios de parada, assim como no *Simplex*, são dois, um para verificar a convergência dos pontos em torno de uma região, *dpcrit*, e outro que encerra a rotina após um certo número de operações, K_{STOP} . Entretanto o cálculo do critério de convergência é calculado de forma diferente daquela utilizada no *simplex*, sendo basicamente avaliada a proporção do desvio padrão dos parâmetros em relação ao valor médio dos mesmos. Por exemplo, se *dpcrit* for 5 %, quer dizer que quando o desvio padrão de todos os parâmetros, calculado no conjunto total de pontos na rotina for inferior a 5 % do valor médio de seus respectivos parâmetros, a população convergiu.

Segue-se a descrição do algoritmo do *SCE-UA*, seguida da descrição do *Competitive Complex Evolution*, *CCE*, que é utilizado internamente pelo *SCE-UA*:

1. Para iniciar o processo, selecione $p \geq 1$ e $m \geq n + 1$, onde p é o número de complexos, m é o número de pontos em cada complexo, e n é a dimensão do problema. Compute o tamanho da amostra $s = pm$. Inicialize o contador de operações, $it = 0$;
2. Gere uma amostra inicial. Amostre s pontos x_1, \dots, x_s dentro do espaço permitido, Ω , pelos limites dos parâmetros. Calcule o valor da função objetivo f_i para cada ponto x_i . Na ausência de uma informação *a priori*, utilize uma distribuição uniforme de amostragem;
3. Hierarquize os pontos. Ordene os s pontos em ordem crescente do valor da função. Armazene-os em um vetor $D = \{x_i, f_i, i = 1, \dots, s\}$, de forma que $i = 1$ represente o ponto com o menor valor da função objetivo;
4. Particione D em p complexos A^1, \dots, A^p , cada um contendo m pontos, de modo que $A^k = \{x_j^k, f_j^k \mid x_j^k = x_{k+p(j-1)}, f_j^k = f_{k+p(j-1)}, j = 1, \dots, m\}$;

5. Evolua cada complexo A_k , $k = 1, \dots, p$, de acordo com o algoritmo *CCE*, separadamente;
6. Misturar os complexos. Reponha A^1, \dots, A^p dentro de D , de tal forma que $D = \{A^k, k = 1, \dots, p\}$. Ordene D em ordem crescente do valor da função objetivo. Incremente o contador de operações ($it = it + 1$).
7. Verificar convergência. Se algum dos critérios de parada é satisfeito (K_{STOP} ou dp_{crit}), pare; caso contrário, retorne ao passo 4.

O algoritmo do método de evolução competitiva dos complexos (*CCE*), mencionado no passo cinco do *SCE-UA* é descrito a seguir:

1. Para iniciar o processo, selecione o número de pontos dentro do sub-complexo de evolução, q , o número de vezes que este sub-complexo será evoluído α , e o número de evoluções a ser executado nos complexos, β , obedecendo os seguintes critérios: $2 \leq q \leq m$, $\alpha \geq 1$;
2. Atribuir pesos. Designe uma distribuição de probabilidade trapezoidal para A^k , conforme:

$$\rho_i = \frac{2(m+1-i)}{m(m+1)}, i = 1, \dots, m. \quad (3.7)$$

O ponto x_1^k tem a maior probabilidade $\rho_1 = 2 / (m + 1)$, enquanto que o ponto x_m^k tem a menor probabilidade $\rho_m = 2 / m(m + 1)$;

3. Selecione parentes através da escolha aleatória de q pontos distintos u_1, \dots, u_q de A^k de acordo com a distribuição de probabilidade especificada acima (os q pontos definem um sub-complexo). Armazene-os no vetor $B = \{u_i, v_i, i = 1, \dots, q\}$, onde v_j é o valor da função associado ao ponto u_j . Armazene em L as posições dos pontos de A^k que foram usados para construir B ;
4. Gere os descendentes de acordo com o seguinte procedimento: (a) Ordene B e L de forma que os q pontos sejam arranjados em ordem crescente do valor da função e calcule o centróide g utilizando a expressão:

$$g = \frac{1}{q-1} \sum_{j=1}^{q-1} u_j. \quad (3.8)$$

(b) Calcule o novo ponto $r = 2g - u_q$ (ponto de reflexão). (c) Se r está dentro do espaço permitido Ω , calcule o valor da função f_r e pule para o passo d; caso contrário, compute o menor hipercubo H dentro de Ω , que contenha A^k , gere um ponto aleatório z dentro de H , compute f_z , estabeleça $r = z$ e $f_r = f_z$ (passo de mutação). (d) Se $f_r < f_q$,

- substitua u_q por r e pule para o passo f; caso contrário calcule $c = (g + u_q)/2$ e f_c (passo de contração). (e) Se $f_c < f_q$, substitua u_q por c e pule para o passo f; caso contrário gere um ponto aleatório z dentro de H e calcule f_z (passo de mutação). Substitua u_q por z . (f) Repita os passos a-e α vezes;
5. Substitua os parentes pelos descendentes. Reponha B em A^k usando as posições originais armazenadas em L . Ordene A^k em ordem crescente do valor da função objetivo.
 6. Itere novamente os passos 2 a 5 por β vezes, determinado quantos descendentes deverão ser gerados.

Valores de alguns dos parâmetros do *SCE-UA* foram testados em Duan, Sooroshian e Gupta (1994) para a calibração de 13 parâmetros do modelo sacramento, sobre uma série sintética. Os autores chegaram a conclusão que o valores mais recomendados para m , q , β e α são $2n + 1$, $n + 1$, $2n + 1$, e 1, respectivamente, enquanto que o número de complexos p deve ser escolhido de acordo com o número de parâmetros a serem calibrados. Para realizar esta escolha os autores realizaram várias execuções da rotina utilizando uma série sintética, aumentando o número de complexos a cada uma. Quando os parâmetros convergiam para uma região de $f2$ inferior a 10^{-3} , o número de complexos empregados era então considerado satisfatório.

Utilizando uma série sintética gerada a partir dos dados da sub-bacia 1, foi realizado o mesmo teste para verificar o número mínimo de complexos necessários para que os parâmetros dos modelos hidrológicos convergissem à uma região de $f2$ inferior à 10^{-3} . Fixando o critério de convergência, dp_{crit} , em 5%, e o encerramento da busca, K_{STOP} , após 150 ciclos de mistura dos complexos, foram necessários 8 complexos para a calibração adequada dos 18 parâmetros do modelo de Sacramento. Sob as mesmas condições, a calibração dos 11 parâmetros do modelo 3R atinge o valor satisfatório de $f2$ quando são utilizados 5 complexos.

O usuário do *SCE-UA* deve também informar à rotina os limites máximos e mínimos de cada parâmetro do modelo. Para o caso do modelo de Sacramento foram utilizados os limites listados por Duan, Sorooshian e Gupta (1994). Entretanto neste estudo foram estipulados limites de 13 dos 16 parâmetros da fase bacia do modelo de Sacramento, sendo que os parâmetros *RSERV*, *RIVA* e *SIDE* foram mantidos constantes, com valores 0,3, 0,0 e 0,0 respectivamente. Entretanto, para este trabalho, optou-se por incluí-los na etapa de calibração, de modo que foi necessário adotar limites para tais parâmetros. O parâmetro

RSERV, que representa a fração da água livre inferior que nunca é transferida para a zona de água de tensão superficial inferior, foi estipulado como um valor entre 0,005 e 0,6, para acomodar valores em volta do valor 0,3, como escolhido no estudo citado. Quanto ao parâmetro *RIVA*, que representa a fração da bacia coberta por mata ciliar, é aceitável supor que tal área não represente mais do que 10% da área da bacia, ou que tenha sido devastada em sua totalidade, de modo que o valor deste parâmetro deve-se encontrar entre 0,0 e 0,1. Por fim, o parâmetro *SIDE*, que equivale ao parâmetro ε do modelo 3R, e denota a fração da drenagem da zona inferior que se transforma em perda de base, foi posto como um valor entre 0 e 1, de modo que a perda pode ser nula ou até metade do escoamento subterrâneo profundo.

Escolhidos os limites destes três parâmetros, foi montada a Tabela 3.6 que mostra os valores máximos e mínimos adotados para os parâmetros da fase bacia do modelo de Sacramento.

Tabela 3.6: Limites dos parâmetros do modelo de Sacramento

Parâmetro	Un.	Limite Inferior	Limite Superior
<i>UZTWM</i>	mm	5,0	250,0
<i>UZFWM</i>	mm	5,0	125,0
<i>LZTWM</i>	mm	50,0	400,0
<i>LZFPM</i>	mm	10,0	1000,0
<i>LZFSM</i>	mm	5,0	300,0
<i>UZK</i>	dia ⁻¹	0,100	0,500
<i>LZPK</i>	dia ⁻¹	0,0005	0,050
<i>LZSK</i>	dia ⁻¹	0,010	0,350
<i>PCTIM</i>	km ² /km ²	0,000	0,200
<i>ADIMP</i>	km ² /km ²	0,000	0,400
<i>PFREE</i>	fração	0,000	0,600
<i>ZPERC</i>	—	5,000	250,0
<i>REXP</i>	—	1,10	4,00
<i>RSERV</i>	fração	0,005	0,6
<i>RIVA</i>	fração	0,00	0,10
<i>SIDE</i>	fração	0,00	1,00

Para os parâmetros da fase canal e da fase bacia do modelo 3R não foram encontrados registros na literatura de valores limite. Entretanto, dado que o modelo 3R provém de simplificações do modelo Sacramento Modificado, foi possível por analogia, determinar limites dos parâmetros da fase bacia do modelo 3R. Por exemplo, os parâmetros *ZPERC* e *REXP*, do modelo de Sacramento, exercem a mesma função que a dos parâmetros C_3 e m_2 no modelo 3R.

Para os parâmetros β e η da fase de canal, empregada nos dois modelos, foram escolhidos valores limites com base na sensibilidade adquirida pelo autor quanto ao efeito da mudança nestes parâmetros nos resultados no modelo 3R. Os limites estabelecidos para estes parâmetros são exibidos juntamente ao limites dos parâmetros da fase bacia do modelo 3R na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Limites dos parâmetros do modelo 3R e da fase canal

Parâmetro	Un.	Limite Inferior	Limite Superior
X_I^0	mm	10,0	300,0
X_2^0	mm	30,0	1.200,0
C_1	hora ⁻¹	0,1	0,5
C_2	hora ⁻¹	0,0005	0,05
C_3	—	5,0	250,0
m_1	—	0,1	5,0
m_2	—	1,1	4,0
m_3	—	0,1	5,0
ε	fração	0,00001	1,0
β	—	0,0002	0,04
η	—	0,8	1,6

Quanto ao período de calibração, foram utilizadas séries horárias de precipitação média na bacia, evapotranspiração potencial, vazão observada à montante e vazão observada na exutória, entre o período de 1998 e 2002, num total de cinco anos de dados horários. Yapo, Gupta e Sorooshian (1996) estudaram a interferência do tamanho da série de dados, fornecida ao *SCE-UA*, e chegaram ao resultado que, para dados diários, uma série de oito anos apresenta resultados satisfatórios de eficiência e eficácia. Todavia, o mais importante é a representatividade da série fornecida à calibração, de modo que dentro do período de dados é

preciso que estejam registrados eventos de cheia e de estiagem. Por isto, considerou-se que a série de cinco anos de dados horários é suficiente para uma boa calibração dos modelos conceituais chuva-vazão empregados neste trabalho, pois dentro do período designado há a ocorrência de eventos intensos, tanto de cheia como de estiagem.

É importante ressaltar que a calibração dos modelos é feita ajustando-se a vazão modelada à vazão observada, hora à hora, e nunca pelo ajuste de séries de previsão de vazão. Por isto não faz sentido realizar uma comparação entre os métodos de calibração, conforme o horizonte de previsão. Deste modo, tal comparação fica restrita somente ao valor da função objetivo obtida na série de calibração e na série de verificação, sendo esta dada pela série horária de vazão consistida, entre 2003 e 2006.

3.4 Previsão de vazão em longo período e índices de avaliação dos resultados

O SISPSHI está programado para executar simulações hidrológicas a cada seis horas, atualmente acionado às 2, 8, 14, 20 horas, onde são realizadas previsões para um horizonte de até 120 horas à frente. Entretanto, as informações coletadas nos postos telemétricos não são enviadas em tempo real para o banco de dados central. Por isto, a hora de referência a partir da qual será previsto o cenário de 120 horas posteriores, é fixada na 4ª hora anterior ao horário de acionamento do sistema. Deste modo, os horários a partir dos quais são de fato realizadas as simulações de previsão são às 4, 10, 16 e 22 horas. A Figura 3.12 foi elaborada para representar melhor o funcionamento do sistema onde, portanto, a previsão é acionada nas horas marcadas em vermelho, mas a previsão é realizada à partir da hora de referência (verde) apontada pela hora de execução.

Ambos os modelos hidrológicos utilizados neste trabalho necessitam de um estado inicial de umidade do solo e volume de água em propagação. Apesar de estes estados poderem ser estimados por simulações passadas, emprega-se uma simulação em um período que vai desde 1.500 horas antes da hora da simulação, até 120 horas posteriores a esta. A simulação de um grande período anterior ao horário de simulação garante que o modelo “esqueça” as condições iniciais, dos armazenamentos no solo e de propagação.

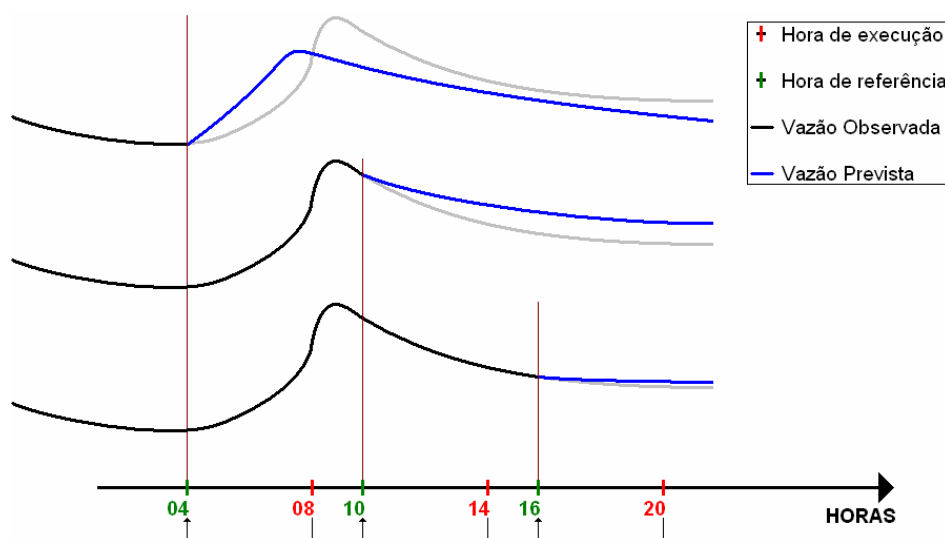


Figura 3.12: Esquema da execução do sistema de previsão hidrológica

No intervalo de 1.500 horas antes da hora de simulação, são usados os dados medidos, devidamente consistidos, de precipitação média nas sub-bacias e vazão nos postos das exutórias. O valor de evapotranspiração potencial é obtido pela série climatológica desta propriedade, enquanto que a vazão à montante é dada pela soma das vazões medidas nos postos, localizados sobre o contorno da sub-bacia interna, das sub-bacias que deságuam na sub-bacia em questão. Obviamente a vazão à montante nas bacias de cabeceira é nula.

No período das 120 horas de previsão é feita a suposição de não ocorrência de chuvas, ou seja, precipitação média nula, enquanto que a vazão à montante é dada pela soma das séries de previsão, nas sub-bacias contribuintes à montante, conforme o esquema da Figura 3.8. Entretanto, o emprego de um horizonte de 120 horas pode vir a gerar situações muito improváveis, como o esgotamento do rio de algumas das bacias, quando em períodos de forte recessão. Eventos deste tipo interferem nos resultados dos índices de avaliação da qualidade da vazão prevista, e devido a isto, foram analisadas somente as previsões até 72 horas, em horizontes de 6 horas, para reduzir a quantidade de informações a serem avaliadas.

Outro ponto importante do sistema operacional é a ancoragem da série de vazão prevista no valor da vazão da hora de simulação. Esta ancoragem consiste em deduzir o valor da diferença entre a vazão modelada e a vazão observada, na hora de simulação, de toda a série de vazão prevista. Se por exemplo a vazão observada na hora da simulação for de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que o modelo indica uma vazão de $110 \text{ m}^3/\text{s}$ neste mesmo horário, será descontada a diferença, de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, de todos os dados de vazão das 120 horas de previsão. Deste modo a série de vazão prevista inicia a partir do último dado observado, mas seguindo o comportamento do modelo. Este procedimento é executado, pois, em geral, os modelos

representam melhor a variação da vazão, do que o valor em si. Este processo reduz bastante os erros nas primeiras horas de previsão, devido à própria persistência da vazão, ou seja, é aceitável supor que a vazão de um rio não se alterará muito dentro de poucas horas.

Para análise dos resultados e devidas comparações entre um cenário e outro, foram realizadas simulações sob condições semelhantes às do sistema em operação, porém, com as séries de dados entre 2003 e 2006. Resumidamente, os resultados apresentados no próximo capítulo foram gerados através de: (i) simulações horárias, às 4, 10, 16 e 22 horas de cada dia, entre 2003 e 2005; (ii) início da simulação em 1.500 horas antes da hora de simulação; (iii) chuva nula em todas as sub-bacias, durante as 72 horas de previsão; (iv) utilização de dados climatológicos de evapotranspiração potencial; (v) utilização da vazão prevista nas sub-bacias como vazão à montante; (vi) ancoragem da série de previsão no valor da vazão na hora de simulação.

A análise dos resultados será feita em cima de quatro índices principais, sendo eles o erro médio absoluto, denotado por EMA , o erro médio positivo, EM^+ , o erro médio negativo, EM^- , e a raiz do erro médio quadrático, $REMQ$. Também foram calculados os valores de correlação linear, ou coeficiente de Pearson, e do coeficiente Nash-Sutcliffe. Estes índices são calculados somente para os horizontes de previsão de 6, 12, 18, ..., 66 e 72 horas, sendo computado a relação entre, a vazão observada e vazão que foi prevista para esta hora. Ou seja, o erro médio absoluto da previsão de 72 horas, é calculado pela diferença entre a vazão observada e a previsão de vazão de 72 horas, realizada há 72 horas atrás da vazão observada, obviamente.

Quanto aos índices de avaliação, o uso do erro médio positivo, EM^+ , calculado pela equação (3.10), informa qual é a diferença média entre a vazão prevista e a vazão observada, quando esta diferença é positiva, ou seja, a vazão prevista foi superestimada. De modo similar o erro médio negativo, EM^- , calculado pela equação (3.11), fornece a diferença média quando a previsão subestima o observado. O erro médio absoluto, EMA , equação (3.9), além de indicar o módulo do erro médio entre a previsão e a observação, pode também mostrar qual dos erros anteriores é mais freqüente. Esta verificação de qual erro, se o positivo ou o negativo, é mais freqüente, é baseada no fato de que o EMA é na verdade a média ponderada entre estes dois índices. A ponderação se dá pela freqüência de ocorrência de cada erro, de tal forma que, se na maior parte do tempo a previsão subestima a observação, então a maior parte da informação utilizada para calcular o EMA veio destas situações, fazendo com que seu valor fique mais próximo ao erro médio negativo que do erro médio positivo. No caso contrário, onde há mais casos de superestimação da vazão, o EMA acaba sendo mais influenciado pelo

EM^+ . Todavia, se ocorrer de ambos os erros, positivo e negativo, apresentarem valores próximos, não necessariamente ambos ocorram com a mesma frequência, pois em tese, pode ocorrer de que os poucos casos de um dos erros tenha magnitude média próxima a da obtida pelo erro oposto. A quarta avaliação da diferença média entre a previsão e o observado, é dada pela raiz do erro médio quadrático, $REMQ$, calculado conforme a equação (3.12), sendo que seu valor deve ser comparado ao do EMA para verificar se há uma grande frequência de erros muito grandes, pois como o erro é elevado ao quadrado, valores maiores contribuem mais para a formação deste índice.

Estes índices de erro médio são calculados conforme:

$$EMA = \sum_{i=1}^N |Q_{PREV,i} - Q_{OBS,i}| / N, \quad (3.9)$$

$$EM^+ = \sum_{j=1}^{N^+} |Q_{PREV,j} - Q_{OBS,j}| / N^+, \quad (3.10)$$

$$EM^- = \sum_{k=1}^{N^-} |Q_{PREV,k} - Q_{OBS,k}| / N^-, \quad (3.11)$$

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{PREV,i} - Q_{OBS,i})^2}{N}}, \quad (3.12)$$

onde o índice i refere-se a todos os dados do período de simulação, j aos dados em que a previsão foi maior que o observado e k aos dados em que a previsão foi menor que o observado. De modo respectivo, N representa o número total de horas simuladas, N^+ o total de horas simuladas em que a previsão foi maior que a observação, sendo N^- o oposto a isto. Quanto às variáveis Q_{PREV} e Q_{OBS} , entende-se pela vazão prevista de um determinado horizonte e a vazão observada, respectivamente, ambas em m^3/s .

Quanto aos coeficientes, de correlação e de Nash-Sutcliffe, sabe-se do primeiro que ele mede o quão igual é variação linear de duas variáveis, enquanto que o segundo mede o quão parelho estão duas variáveis. No coeficiente de correlação, r , calculado conforme a equação (3.13), valores próximos de 1 indicam que as variações das duas variáveis ocorrem numa frequência muito próxima, com baixíssima defasagem. No caso da análise dos resultados, uma correlação alta indica que a vazão prevista é capaz de acompanhar as elevações e descidas da hidrógrafa com a mesma frequência e fase dos dados observados. Do contrário, ou há defasagem da previsão, ou sua oscilação é diferente da oscilação da vazão observada. Quanto ao coeficiente de Nash-Sutcliffe, e , dado pela equação (3.14), tem-se que valores próximos de 1 indicam que os valores da vazão prevista são bastante próximos ao da

vazão observada, em termos da magnitude do valor médio da vazão observada. Quando este índice está próximo de zero, mostra que as variáveis, apesar de não apresentarem séries com valores próximos uma da outra, ainda estão em conformidade quanto ao valor médio. Já valores negativos deste coeficiente indicam que os dois campos são desconexos, sem sintonia. Neste caso é melhor utilizar a vazão média do posto à vazão do modelo. Deste modo a análise conjunta destes dois coeficientes pode ser colocada como um bom indicador da qualidade da previsão, em termos da magnitude da vazão média na bacia, ou seja, um erro absoluto de 40 m³/s numa bacia de vazão média de 400 m³/s, resoluto no mesmo índice que um erro de 5 m³/s para um bacia de vazão média de 50 m³/s.

Estes coeficientes são calculados conforme:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N ((Q_{OBS,i} - \mu_{OBS})(Q_{PREV,i} - \mu_{PREV}))}{N \sigma_{OBS} \sigma_{PREV}}, \quad (3.13)$$

$$e = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{OBS,i} - Q_{PREV,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{OBS,i} - \mu_{OBS})^2}, \quad (3.14)$$

onde Q_{PREV} e Q_{OBS} referem-se novamente à vazão prevista e a vazão observada, para a hora i , dentre todas as N horas da série. O operador μ representa o valor médio da variável subscrita, enquanto que σ é a denotação do desvio padrão da vazão indicada em subscrito.

Outro fator importante de se analisar, que diz respeito não à qualidade da previsão hidrológica, mas sim à eficiência da rotina de calibração automática, é a quantidade de vezes que a função objetivo foi calculada. Este valor, denotado por NF, indica quantos pontos foram gerados pelo método de calibração, até que a busca fosse encerrada por convergência ou excesso de processamento.

Encerra-se aqui então a descrição de todos os métodos empregados na elaboração deste trabalho, partindo dos procedimentos de identificação e preenchimento de falhas dos dados de monitoramento, seguindo com a descrição da área de estudo, passando pela descrição dos métodos de calibração automática, e finalizando com a forma com que os resultados são gerados, e como serão comparados. No próximo capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados, de onde se embasa as observações que concluem este trabalho.

4 Resultados

Seguindo os métodos expostos no capítulo anterior, proceder-se-á apresentando os resultados objetivados para este trabalho. Primeiramente é feita uma comparação entre os dois métodos de calibração automática utilizados neste trabalho, no intuito de verificar suas qualidades e deficiências na busca de um conjunto ótimo dos parâmetros dos modelos empregados. Posteriormente são apresentados os resultados das simulações de previsão hidrológica para os diversos cenários de configuração do sistema de previsão. Estes cenários são definidos pelo modelo hidrológico empregado e a função objetivo utilizada para a calibração do mesmo, num total de quatro cenários, dado que serão testados dois modelos hidrológicos e duas funções objetivo.

A análise dos cenários é realizada pela comparação dos resultados obtidos na simulação da 9ª sub-bacia, de União da Vitória, pois é neste ponto que há um interesse maior em prever a vazão do rio Iguaçu para um curto prazo de previsão.

4.1 Avaliação dos métodos de calibração

Conforme dito anteriormente, foram utilizadas duas rotinas para a calibração automática dos modelos hidrológicos, a rotina *Simplex* e a rotina SCE-UA. A primeira consiste basicamente em evoluir, intensivamente, um conjunto pequeno de pontos, enquanto que a segunda promove a evolução de vários grupos, trocando informações entre eles.

Para comparar o desempenho destas duas rotinas, na obtenção de um conjunto ótimo de parâmetros, foi realizado um teste através da calibração sobre uma série sintética de vazão. Esta série sintética consiste na série da vazão obtida pelo modelo hidrológico dado um cenário de precipitação média na bacia, evapotranspiração potencial, e um conjunto de parâmetros definido pelo usuário. Depois de gerada esta série de vazão, a mesma é fornecida à rotina de calibração no lugar da série de vazão observada. Assim, espera-se da rotina, a obtenção de um conjunto de parâmetros muito próximo do conjunto utilizado para gerar a própria série sintética.

Como as rotinas de calibração guiam-se por uma função objetivo, também foi comparado a qualidade da série calibrada em relação a série sintética, conforme a função objetivo, dadas pelas equações (3.4) e (3.5). Um terceiro ponto de comparação é a eficiência

computacional da rotina, ou seja, quanto tempo é necessário para a rotina finalizar a busca do conjunto ótimo. Para tanto é realizada a medição do número de vezes em que a função objetivo foi calculada, denotado por NF. Este índice garante uma comparação justa, pois independe do poder de processamento do *hardware* utilizado e da quantidade de passos de integração de cada modelo.

Outro fator que pode influenciar no resultado da calibração é a sensibilidade do modelo aos parâmetros, principalmente quanto ao tempo para convergência. Em geral, se há poucos parâmetros de forte influência sobre o modelo, espera-se que a calibração obtenha um conjunto ótimo com menos iterações, sendo a recíproca verdadeira. Neste trabalho não foi realizado nenhum estudo sobre a sensibilidade dos modelos aos seus respectivos parâmetros. Contudo é razoável supor que nas sub-bacias internas, em que parte da vazão observada provém da contribuição de montante, os parâmetros da fase canal, β e η , sejam mais influentes nos resultados. Portanto foram comparados resultados para uma série sintética construída a partir dos parâmetros da sub-bacia de Rio Negro, B1, e para a série sintética obtida pelos parâmetros da sub-bacia de Fluviópolis, B8.

As séries sintéticas foram geradas para o mesmo período utilizado na calibração dos modelos, ou seja, entre 1998 e 2002. Neste período de cinco anos há um total de 43.824 dados horários de cada variável de entrada (*inputs*) dos modelos, entretanto, para as avaliações estatísticas os primeiros 500 dados não foram considerados para que o efeito da condição inicial dos armazenamentos não interfira nos resultados.

Para finalizar a comparação entre os procedimentos de calibração, também são apresentados resultados de simulações utilizando parâmetros calibrados sobre as séries de vazão observada. Fazendo uso novamente das sub-bacias B1 e B8 para as comparações, com parâmetros estatísticos calculados sobre o mesmo período utilizado na avaliação sobre séries sintéticas.

4.1.1 Calibração de série sintética do modelo 3R

A Tabela 4.1 mostra os valores dos parâmetros utilizados para a confecção da série sintética de uma bacia de cabeceira. Nesta mesma tabela são exibidos os valores dos parâmetros obtidos pelas calibrações, conforme a rotina e a função objetivo utilizadas.

Tabela 4.1: Parâmetros do 3R por calibração da série sintética para bacia de cabeceira.

Parâmetro		Valor Utilizado	<i>Simplex</i>		SCE-UA	
			<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
X_1^0	(mm)	189,0	187,2	187,4	181,3	182,8
X_2^0	(mm)	1593,0	1441,8	1399,0	1270,6	1265,1
C_1	(hora ⁻¹)	0,00200	0,00208	0,00202	0,00206	0,00201
C_2	(hora ⁻¹)	0,00004	0,00005	0,00005	0,00005	0,00006
C_3	–	293,0	180,3	180,2	108,4	99,8
m_1	–	1,240	1,299	1,247	1,337	1,311
m_2	–	3,690	3,336	3,209	2,813	2,816
m_3	–	1,690	1,789	1,671	1,612	1,697
ε	–	0,00331	0,10244	0,01510	0,01269	0,08291
β	–	0,03150	0,03347	0,03144	0,03414	0,03379
η	–	0,87000	0,85719	0,87087	0,85063	0,85234

Para avaliar a diferença entre os resultados das calibrações, frente às funções objetivo e rotinas de busca automática, foi montada a Figura 4.1, que mostra um trecho da série sintética e das vazões modeladas utilizando os parâmetros calibrados, e a Tabela 4.2, onde são apresentados alguns índices estatísticos calculados entre as séries de vazão calibradas e a série sintética.

Visualizando na Figura 4.1 as simulações do 3R para os conjuntos de parâmetros da Tabela 4.1, nota-se que em boa parte do gráfico as vazões simuladas estiveram muito próximas à vazão sintética. Contudo nos períodos entre 14 e 22 de janeiro, e entre 3 e 9 de fevereiro é possível perceber uma pequena diferença entre as simulações. Nestes períodos a simulação utilizando os parâmetros calibrados pelo SCE-UA com *f1* superestimou a vazão sintética, enquanto que no primeiro período a simulação para *Simplex* com *f2* ficou ligeiramente abaixo da série sintética.

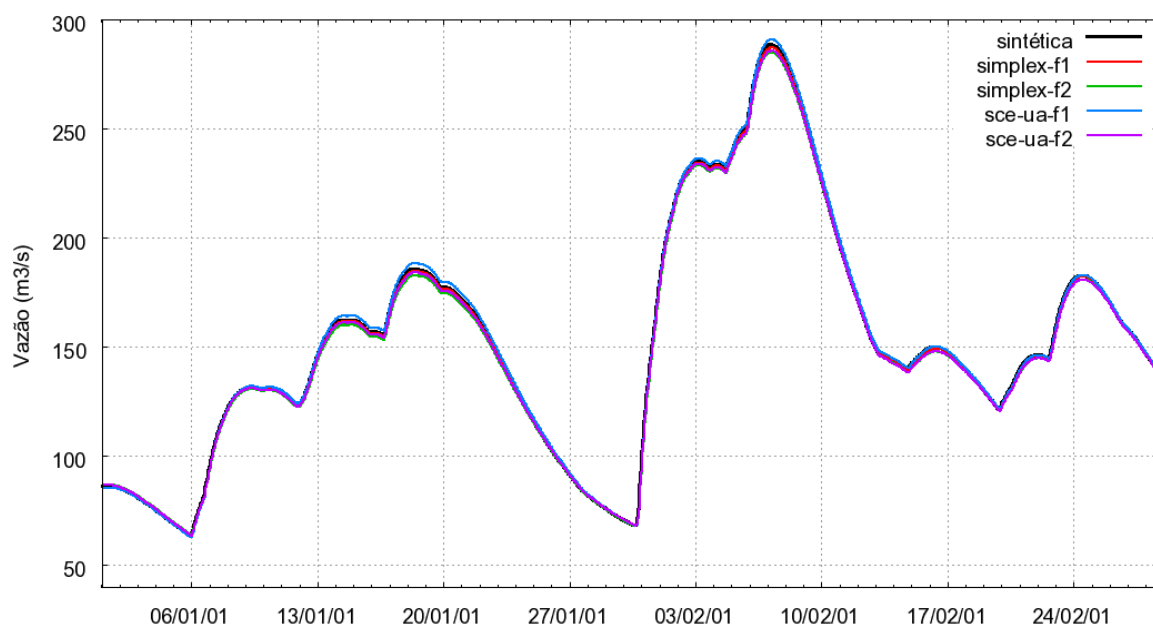


Figura 4.1: Trecho da série sintética e simulação com os parâmetros calibrados para o modelo 3R em sub-bacia de cabeceira.

Tabela 4.2: Avaliação estatística para calibrações sobre série sintética do 3R em bacia de cabeceira.

Variável Estatística	Simplex		SCE-UA	
	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>f1</i> ($\times 10^{-3}$)	7,3	15,6	13,9	15,0
<i>f2</i> ($\times 10^{-3}$)	2,6	5,7	5,0	5,4
EMA	0,42	0,98	0,80	0,91
<i>r</i>	0,9999568	0,9999100	0,9999048	0,9998922
NF	5.353	5.486	15.577	10.541

Pela avaliação estatística das simulações, segundo a Tabela 4.2, é possível notar que a simulação que utilizou os parâmetros calibrados pelo *Simplex* com a 1ª função objetivo obteve valores de *f1*, *f2* e *EMA* equivalente à metade dos mesmos índices obtidos nas demais simulações. No SCE-UA a utilização da *f1* também foi ligeiramente melhor que para *f2*, dado a diferença do *EMA* entre elas de aproximadamente 0,11 m³/s. Entretanto a alta correlação obtida em todas as séries mostra que, de certa forma, todas as simulações ficaram muito próximas à série sintética. Quanto ao número de vezes em que a função objetivo foi calculada, NF, nota-se que o *Simplex* convergiu com pouco mais de 5 mil interações, enquanto que o SCE-UA precisou calcular a função objetivo de 15 mil pontos para *f1*, e de 10 mil pontos para *f2*, para encerrar a otimização.

Montada a série sintética de vazão conforme os parâmetros e *inputs* da sub-bacia B8, procedeu-se às calibrações pelo *Simplex* e SCE-UA para otimização dos parâmetros através da minimização das duas funções objetivo em teste. A Tabela 4.3 exibe os valores obtidos para os parâmetros do modelo 3R nestes testes, assim como o conjunto utilizado na construção da série sintética de vazão para sub-bacia interna.

Tabela 4.3: Parâmetros do 3R por calibração da série sintética para bacia interna.

Parâmetro			<i>Simplex</i>		SCE-UA	
			<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
X_1^0	(mm)	300,0	299,8	300,0	300,0	295,3
X_2^0	(mm)	50,1	50,4	50,4	50,0	50,1
C_1	(hora ⁻¹)	0,00440	0,00440	0,00440	0,00468	0,00469
C_2	(hora ⁻¹)	0,00002	0,00002	0,00002	0,00200	0,00198
C_3	–	5,0	5,0	5,0	5,0	5,3
m_1	–	4,970	5,000	4,970	5,000	4,919
m_2	–	3,950	3,923	3,983	4,000	3,966
m_3	–	4,840	4,980	4,867	2,500	4,355
ε	–	0,00010	0,00490	0,01449	0,00000	0,09749
β	–	0,08600	0,08599	0,08600	0,08369	0,08423
η	–	0,70000	0,70007	0,70000	0,70726	0,70459

Para avaliar o desempenho das rotinas e funções objetivos na calibração dos parâmetros de uma bacia interna foi plotado um trecho da série sintética de vazão e das simulações utilizando os quatro conjuntos de parâmetros obtidos nas calibrações, como pode ser visualizado na Figura 4.2. Uma avaliação estatística simples também foi realizada através do levantamento dos índices estatísticos listados na Tabela 4.4.

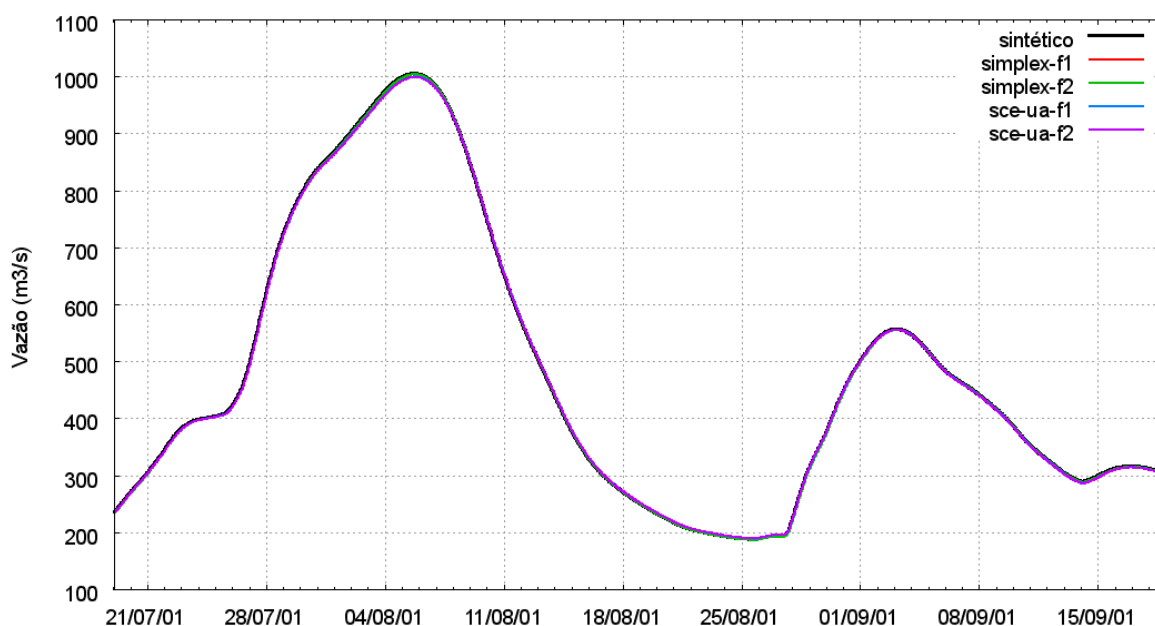


Figura 4.2: Trecho da série sintética e simulação com os parâmetros calibrados para o modelo 3R em sub-bacia interna.

Tabela 4.4: Avaliação estatística para calibrações sobre série sintética do 3R em bacia interna.

Variável Estatística	Simplex		SCE-UA	
	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>f1</i> ($\times 10^{-3}$)	0,067	0,062	3,28	4,11
<i>f2</i> ($\times 10^{-3}$)	0,15	0,14	7,33	8,87
<i>EMA</i>	0,026	0,025	1,20	1,45
<i>r</i>	0,9999990	0,9999999	0,9999907	0,9999945
NF	4.549	4.777	14.359	4.309

O gráfico da Figura 4.2 mostra que não há diferenças significativas entre as séries simuladas com os quatro conjuntos de parâmetros calibrados. Todavia, uma olhada mais atenta ao pico de vazão ocorrido em 6 de agosto, mostra que a linha da simulação SCE-UA com *f2* está um pouco abaixo da série sintética. Esta diferença é confirmada ao verificar pela Tabela 4.4 que, na calibração com SCE-UA, o *EMA* foi de 1,2 m³/s para *f1* e 1,45 m³/s para *f2*. Mas para as séries com parâmetros calibrados pelo *Simplex* este índice foi de aproximadamente 0,025 m³/s. Tamanha diferença está associada aos valores obtidos na otimização dos parâmetros C_2 , β e η . Pela Tabela 4.3, verifica-se que o valor de C_2 obtido nas calibrações do SCE-UA foram duas ordens de grandeza maior que o obtido pelo *Simplex*, sendo que esse apresentou uma estimativa muito mais próxima ao valor utilizado para a série

sintética. Nos parâmetros de propagação em canal, o *Simplex* também apresentou valores muito mais próximos aos utilizados na série sintética, que o SCE-UA.

Este teste, de calibração sobre série sintética da bacia interna para o modelo 3R, foi o único em que uma calibração pelo SCE-UA utilizou menos cálculos de função objetivo que o *Simplex*. Em média, o *Simplex* usou em torno de 4.600 interações, enquanto que o SCE-UA empregou 14 mil na calibração por $f1$ e apenas 4.300 na calibração por $f2$. Em comparação com os valores de NF obtidos nas calibrações sobre a série sintética de bacia de cabeceira, tanto o *Simplex* quanto o SCE-UA foram mais eficientes na calibração da bacia interna. O *Simplex* convergiu utilizando 800 cálculos a menos que na calibração da série de cabeceira, enquanto que o SCE-UA reduziu aproximadamente 1.000 cálculos na calibração por $f1$ e 6.000 cálculos por $f2$.

4.1.2 Calibração de série sintética do modelo Sacramento

Também utilizando de séries sintéticas obtidas com os parâmetros calibrados para as sub-bacias B1 e B8, foram realizadas simulações e calculados parâmetros estatísticos para avaliar o desempenho das rotinas em encontrar um conjunto ótimo dos parâmetros do modelo de Sacramento. A Tabela 4.5 mostra os conjuntos de parâmetros desse modelo empregados para a construção da série sintética, e os conjuntos resultantes das otimizações testadas, utilizando os dados de entrada da sub-bacia de cabeceira, B1. Para que também pudesse ser feita uma comparação das rotinas quanto ao modelo hidrológico utilizado, foram geradas as Figura 4.3 e 4.4 sobre os mesmos períodos apresentados nas Figura 4.1 e 4.2 respectivamente. Como as séries sintéticas foram montadas a partir dos parâmetros calibrados sobre a série de vazão observada, é esperado que as figuras que representam séries sintéticas de uma mesma sub-bacia, exibam hidrogramas similares.

A comparação visual entre os cenários de calibração e a série de vazão sintética do modelo de Sacramento para a sub-bacia de cabeceira foi realizada pela Figura 4.3. Os mesmos parâmetros estatísticos utilizados para avaliar os resultados da calibração sobre série sintética do 3R, foram calculados para os resultados do modelo de Sacramento, e podem ser conferidos pela Tabela 4.6.

Tabela 4.5: Parâmetros do Sacramento por calibração da série sintética para bacia de cabeceira.

Parâmetro			<i>Simplex</i>		SCE-UA	
			<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>UZTWM</i>	(mm)	57,7	57,4	53,0	57,7	57,7
<i>UZFWM</i>	(mm)	125,0	125,0	119,0	124,9	125,0
<i>LZTWM</i>	(mm)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
<i>LZFPM</i>	(mm)	1000,0	999,9	1000,0	999,7	999,6
<i>LZFSM</i>	(mm)	24,1	23,9	24,0	24,1	24,1
<i>UZK</i>	(dia ⁻¹)	0,1000	0,1020	0,1000	0,1000	0,1001
<i>LZPK</i>	(dia ⁻¹)	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041	0,0041
<i>LZSK</i>	(dia ⁻¹)	0,0267	0,0268	0,0265	0,0267	0,0267
<i>PCTIM</i>	(fração)	0,199	0,198	0,196	0,199	0,199
<i>ADIMP</i>	(fração)	0,266	0,267	0,270	0,266	0,266
<i>PFREE</i>	(fração)	0,0002	0,0174	0,0314	0,0005	0,0002
<i>ZPERC</i>	–	248,3	249,8	242,7	249,0	249,1
<i>REXP</i>	–	1,1000	1,1007	1,1002	1,1002	1,1002
<i>RSERV</i>	(fração)	0,163	0,038	0,476	0,589	0,475
<i>RIVA</i>	(fração)	0,00006	0,00016	0,00000	0,00000	0,00005
<i>SIDE</i>	–	0,00002	0,00034	0,00002	0,00002	0,00002
β	–	0,00700	0,00702	0,00704	0,00700	0,00700
η	–	1,18000	1,17928	1,17860	1,17996	1,18000

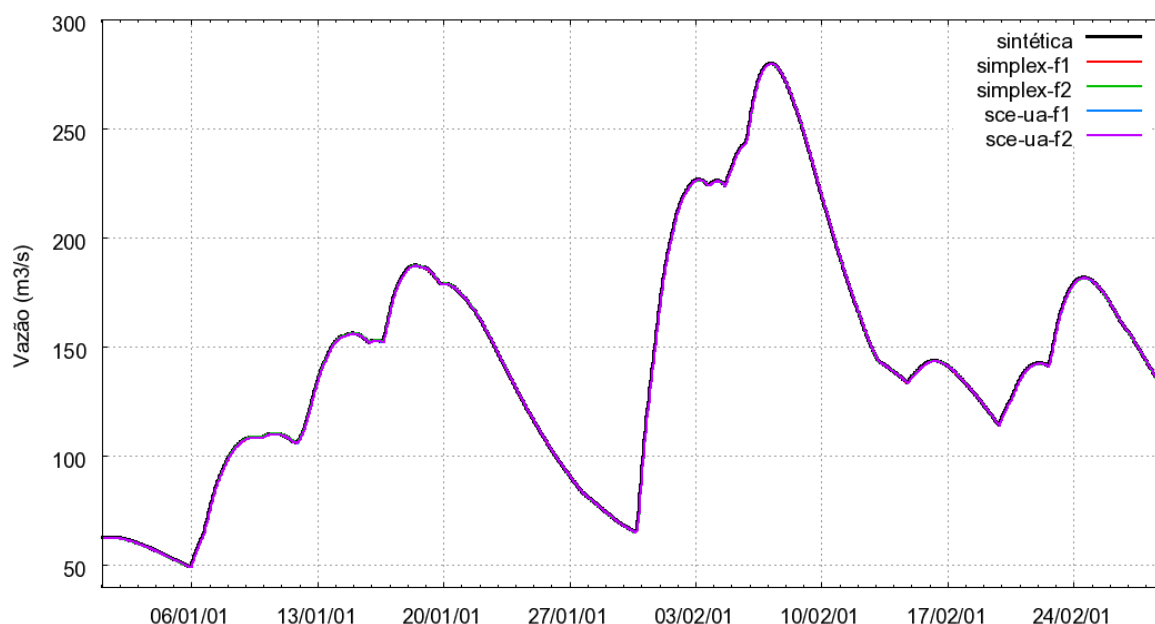


Figura 4.3: Trecho da série sintética e simulação com os parâmetros calibrados para o modelo de Sacramento em sub-bacia de cabeceira.

Tabela 4.6: Avaliação estatística para calibrações sobre série sintética do Sacramento em bacia de cabeceira.

Variável Estatística	Simplex		SCE-UA	
	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>f1</i> ($\times 10^{-4}$)	6,32	23,5	3,77	3,72
<i>f2</i> ($\times 10^{-4}$)	2,35	8,75	1,44	1,41
<i>EMA</i>	0,038	0,132	0,026	0,025
<i>r</i>	0,9999964	0,9999964	1,0000000	0,9999985
NF	12.619	13.353	63.991	49.849

Observando a Figura 4.3 não é possível notar diferença visual entre as séries de vazões do modelo de Sacramento para o período plotado. Isto mostra que todos os conjuntos de parâmetros, obtidos nos quatro cenários de calibração, convergiram para uma região muito próxima ao conjunto dos pontos utilizados na confecção da série sintética de bacia de cabeceira.

Quanto às informações da Tabela 4.6, observa-se que o SCE-UA obteve um melhor desempenho quanto aos valores das funções objetivo e do *EMA*. Quantitativamente tem-se um erro médio absoluto da ordem de $0,025 \text{ m}^3/\text{s}$ para as calibrações com SCE-UA, enquanto que pelo *Simplex* o melhor resultado foi um erro de $0,038 \text{ m}^3/\text{s}$. Para o SCE-UA houve pouca diferença entre os resultados obtidos pelas duas funções. Já no caso do *Simplex*, a utilização

de $f2$ gerou um erro médio $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ maior que o obtido para a calibração com $f1$. A correlação altíssima em todos os casos mostra que todos os cenários de calibração foram satisfatórios em convergirem na direção da série sintética, como já foi observado pela Figura 4.3. Quanto à eficiência das rotinas em número de cálculos da função objetivo, notou-se que o *Simplex* demonstrou um desempenho melhor ao SCE-UA, com uma média de 13 mil funções calculadas contra 55 mil do SCE-UA.

Partindo para a avaliação da série sintética do modelo de Sacramento para uma bacia interna, foi montada a Tabela 4.7 que exhibe os valores dos parâmetros deste modelo para a geração da série sintética, e os valores obtidos pelas calibrações via as duas rotinas de otimização e as duas funções objetivo em teste.

A comparação visual para as vazões simuladas com os parâmetros calibrados é feita com base na Figura 4.4, que representa o mesmo período plotado na Figura 4.2, onde foram exibidos os resultados das calibrações para a série sintética de bacia interna com o modelo 3R. Os resultados dos avaliadores estatísticos para a calibração sobre série sintética de bacia interna, modelado pelo Sacramento, são mostrados na Tabela 4.8.

Observando o gráfico da Figura 4.4 nota-se que todas as simulações coincidiram com a série sintética de vazão do modelo de Sacramento para a bacia interna. Além do gráfico, pode-se conferir pela Tabela 4.7 que, em geral, os parâmetros obtidos nas calibrações foram bastante próximos aos parâmetros utilizados na criação da série sintética. Contudo, há grandes diferenças quanto ao parâmetro *RSERV*, o que pode indicar que este parâmetro exerce pouca influência na simulação. No conjunto obtido pelo *Simplex* com $f2$ há uma diferença significativa quanto ao parâmetro *LZPK*, e provavelmente esta diferença é o motivo de a série simulada, com este conjunto de parâmetros, apresentar maiores valores das funções objetivo e do erro médio absoluto.

Tabela 4.7: Parâmetros do Sacramento por calibração da série sintética para bacia interna.

Parâmetro			<i>Simplex</i>		SCE-UA	
			<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>UZTWM</i>	(mm)	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2
<i>UZFWM</i>	(mm)	125,0	125,0	125,0	125,0	125,0
<i>LZTWM</i>	(mm)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
<i>LZFPM</i>	(mm)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
<i>LZFSM</i>	(mm)	299,9	299,7	300,0	300,0	299,9
<i>UZK</i>	(dia ⁻¹)	0,1000	0,1021	0,1006	0,1004	0,1000
<i>LZPK</i>	(dia ⁻¹)	0,0500	0,0500	0,0018	0,0500	0,0500
<i>LZSK</i>	(dia ⁻¹)	0,1262	0,1262	0,1238	0,1262	0,1262
<i>PCTIM</i>	(fração)	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064
<i>ADIMP</i>	(fração)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>PFREE</i>	(fração)	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000
<i>ZPERC</i>	–	248,4	248,5	244,2	247,1	232,2
<i>REXP</i>	–	1,4400	1,6492	1,4281	1,4206	1,2451
<i>RSERV</i>	(fração)	0,272	0,341	0,028	0,122	0,424
<i>RIVA</i>	(fração)	0,00000	0,00001	0,00001	0,00000	0,00000
<i>SIDE</i>	–	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
β	–	0,08200	0,08200	0,08209	0,08200	0,08200
η	–	0,70000	0,70001	0,70000	0,70000	0,70000

Quantitativamente, seguindo a Tabela 4.8, o *EMA* obtido nas séries simuladas, com exceção da que utilizou parâmetros calibrados pelo *Simplex* com *f2*, foi de 0,025 m³/s, enquanto que para este outro conjunto a simulação obteve 0,144 m³/s de erro médio. Entre as funções objetivo testadas não houve diferenças significativas quanto ao *EMA*, enquanto que para as rotinas de calibração, o SCE-UA obteve valores ligeiramente menores que o *Simplex* com *f1*. Contudo, as correlações entre as séries simuladas e a série sintética obtiveram novamente valores muito próximos de 1,0, mostrando que de certo modo todas as calibrações foram satisfatórias.

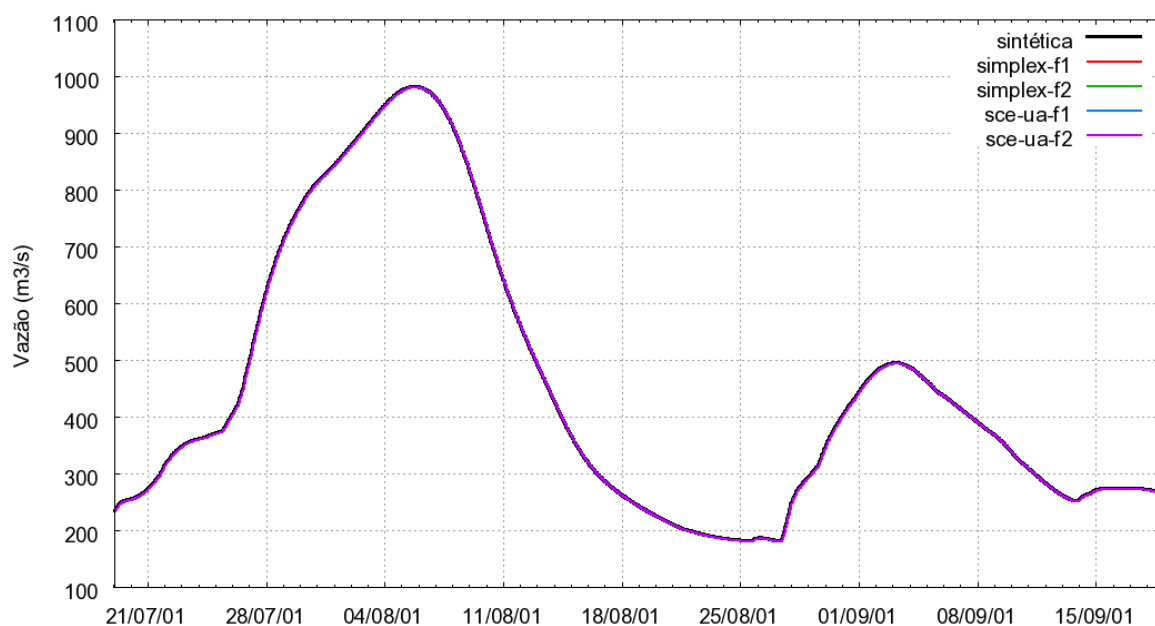


Figura 4.4: Trecho da série sintética e simulação com os parâmetros calibrados para o modelo de Sacramento em sub-bacia interna.

Tabela 4.8: Avaliação estatística para calibrações sobre série sintética do Sacramento em bacia interna.

Variável Estatística	Simplex		SCE-UA	
	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>f1</i> ($\times 10^{-4}$)	0,66	4,77	0,63	0,63
<i>f2</i> ($\times 10^{-4}$)	1,45	10,4	1,39	1,39
EMA	0,0258	0,1437	0,0250	0,0251
<i>r</i>	1,0000000	0,9999998	1,0000000	1,0000000
NF	14.682	12.938	74.056	76.528

A convergência para as calibrações via *Simplex* ocorreram após o processamento de aproximadamente 13 mil funções objetivo, enquanto que o SCE-UA empregou algo em torno de 75 mil cálculos. Valor 5,7 vezes maior que o do *Simplex*.

Comparando a eficiência da rotina de calibração para uma série sintética de bacia de cabeceira com uma série sintética de bacia interna, foi observada um aumento do NF na calibração da série de bacia interna. Contudo o aumento médio pelo *Simplex* foi de pouco mais de 800 cálculos da função, enquanto que para o SCE-UA, o aumento médio foi mais de 20 mil cálculos. Isto mostra que a suposição de que bacias internas seriam calibradas com maior eficácia pode não ser verdadeira.

4.1.3 Calibração de série observada para o modelo 3R

Como o intuito da calibração sobre séries sintéticas é principalmente de, observar a capacidade da rotina de otimização, em convergir para um ponto ótimo global, a escolha de qual rotina é melhor para um determinado modelo, pode não ficar bem fundamentada somente por este tipo de estudo. Portanto decidiu-se operar os mesmos cenários de calibração realizados sobre série sintética, porém agora sobre a série de vazão observada. Utilizando novamente os dados das sub-bacias B1 e B8 para a comparação, sendo que as avaliações estatísticas também foram calculadas para o período calibrado, entre 1998 e 2002, com a exceção das primeiras 500 horas para minimização do efeito de condição inicial.

Tabela 4.9: Parâmetros do 3R para calibração da sub-bacia B1.

Parâmetro		<i>Simplex</i>		SCE-UA	
		<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
X_1^0	(mm)	177,5	196,4	102,8	106,3
X_2^0	(mm)	1148,4	1305,2	332,0	348,4
C_1	(hora ⁻¹)	0,00382	0,00202	0,00668	0,00586
C_2	(hora ⁻¹)	0,00006	0,00005	0,00028	0,00027
C_3	–	249,7	249,0	246,5	250,0
m_1	–	2,653	1,131	4,999	4,999
m_2	–	3,058	3,073	2,739	3,105
m_3	–	1,750	1,853	1,657	1,509
ε	–	0,00017	0,00013	0,00009	0,00001
β	–	0,01534	0,02386	0,04035	0,04492
η	–	1,22606	0,9459	0,86708	0,84453

A Tabela 4.9 mostra os valores dos parâmetros do modelo 3R obtidos nas calibrações para a sub-bacia B1. E para avaliar o desempenho das rotinas foram plotadas, no gráfico da Figura 4.5, um trecho da série de dados de vazão observada e das vazões simuladas com os parâmetros dos quatro cenários de calibração. Para uma base de comparação estatística foi montada a Tabela 4.10, onde podem ser conferidos os valores obtidos para cada índice, contabilizados entre as séries modeladas com a série observada.

Observando o gráfico da Figura 4.5 pode-se dizer que nenhum dos cenários de calibração apresentou uma série modela bastante similar à série observada. Contudo, nas

séries com parâmetros calibrados via *Simplex*, nota-se uma diferença de menor amplitude em relação à série observada. Especialmente no intervalo entre 1º e 18 de fevereiro. Quanto às funções objetivo, percebe-se que na calibração pelo *Simplex*, há uma certa diferença entre as séries modeladas com os parâmetros calibrados por $f1$ e por $f2$. Porém, para o SCE-UA, a diferença entre as séries é menor. Esta magnitude das diferenças é confirmada também por comparação dos valores dos parâmetros na Tabela 4.9. Nela se percebe que para as calibrações pelo SCE-UA todos os parâmetros, exceto C_1 e m_2 , obtiveram valores parecidos, enquanto que nas calibrações por *Simplex* há poucos parâmetros com valores próximos: C_2 , C_3 , m_2 , m_3 e ε .

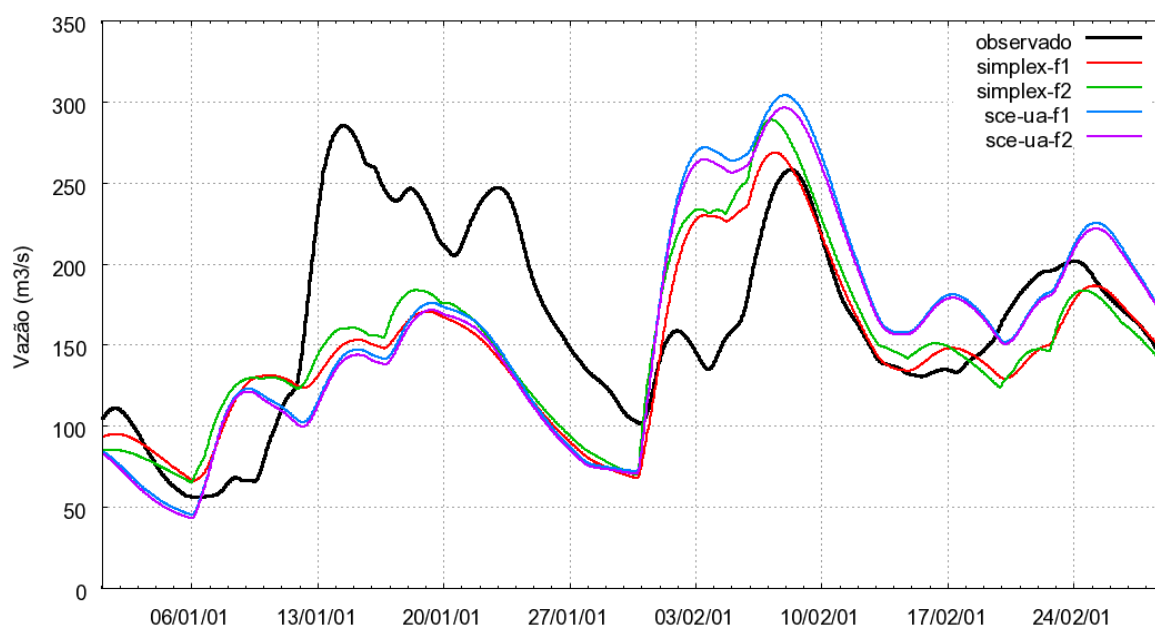


Figura 4.5: Trecho da série de vazão observada em B1 e resultados das simulação com os parâmetros calibrados para o 3R.

Embora constatada uma diferença visual e uma diferença nos valores dos parâmetros obtidos nas calibrações pelo *Simplex*, não houve diferenças muito significativas entre os quatro cenários de calibração. Contudo, com exceção do erro médio absoluto, a série modelada com os parâmetros calibrados pelo *Simplex* com $f2$, obteve os melhores resultados dos índices estatísticos e também de eficiência.

Tabela 4.10: Avaliação estatística para calibrações do 3R sobre série observada em B1.

Variável Estatística	<i>Simplex</i>		SCE-UA	
	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>f1</i>	0,451	0,445	0,448	0,452
<i>f2</i>	0,226	0,223	0,225	0,225
<i>EMA</i>	29,3	27,8	28,1	27,7
<i>REMQ</i>	47,1	46,5	46,9	46,9
<i>r</i>	0,769	0,775	0,768	0,769
<i>e</i>	0,587	0,598	0,590	0,591
NF	2.668	2.586	17.825	12.316

A calibração utilizando a segunda função objetivo também foi melhor pelo SCE-UA, tanto em termos estatísticos como em eficiência, pois necessitou de 5 mil cálculos a menos para convergência, que a calibração por *f1*. Quanto à comparação entre as rotinas, nota-se que o *Simplex* empregou poucos cálculos para a convergência, em torno de 2.600, enquanto que o SCE-UA utilizou mais de 12 mil cálculos nas duas calibrações.

A Tabela 4.11 mostra os valores dos parâmetros do modelo 3R, obtidos pelos quatro cenários de calibração, para os dados da sub-bacia B8. Utilizando novamente de um parecer visual e outro estatístico para comparação das séries de vazões simuladas com os parâmetros das calibrações, foi gerada a Figura 4.6 e a Tabela 4.12.

Ao oposto da situação apresentada na Figura 4.5, todas as séries modeladas apresentam hidrógrafas semelhantes à da vazão observada, conforme visualizado na Figura 4.6. Outro ponto importante é que todas as séries modeladas apresentaram resultados muito próximos entre si, embora as rotinas tenham convergido para pontos distintos. Na Tabela 4.11 observa-se que os parâmetros C_2 e C_3 , apresentam diferenças de até duas ordens de grandeza entre os valores apurados pelo *Simplex* e pelo SCE-UA. Também é possível notar uma grande diferença no parâmetro ε quanto à função objetivo utilizada na calibração. Nas calibrações com *f1*, o valor deste parâmetro foi da ordem de 10^{-1} e 10^{-2} , para o *Simplex* e o SCE-UA respectivamente, enquanto que para *f2*, ε convergiu em valores da ordem de 10^{-5} nas duas rotinas. Contudo os parâmetros de propagação em canal apresentaram valores em torno de 0,085 para β e 0,7 para η .

Tabela 4.11: Parâmetros do 3R para calibração da sub-bacia B8.

Parâmetro		Simplex		SCE-UA	
		$f1$	$f2$	$f1$	$f2$
X_1^0	(mm)	296,9	300,0	299,7	300,0
X_2^0	(mm)	53,3	50,1	50,1	50,0
C_1	(hora ⁻¹)	0,00414	0,00445	0,00481	0,00495
C_2	(hora ⁻¹)	0,00002	0,00002	0,00179	0,00200
C_3	–	5,0	5,0	160,0	237,3
m_1	–	4,963	4,967	4,862	5,000
m_2	–	3,896	3,953	3,994	4,000
m_3	–	1,784	4,843	4,881	5,000
ε	–	0,33827	0,00008	0,03481	0,00001
β	–	0,08757	0,08582	0,08472	0,08431
η	–	0,70109	0,70010	0,70062	0,70000

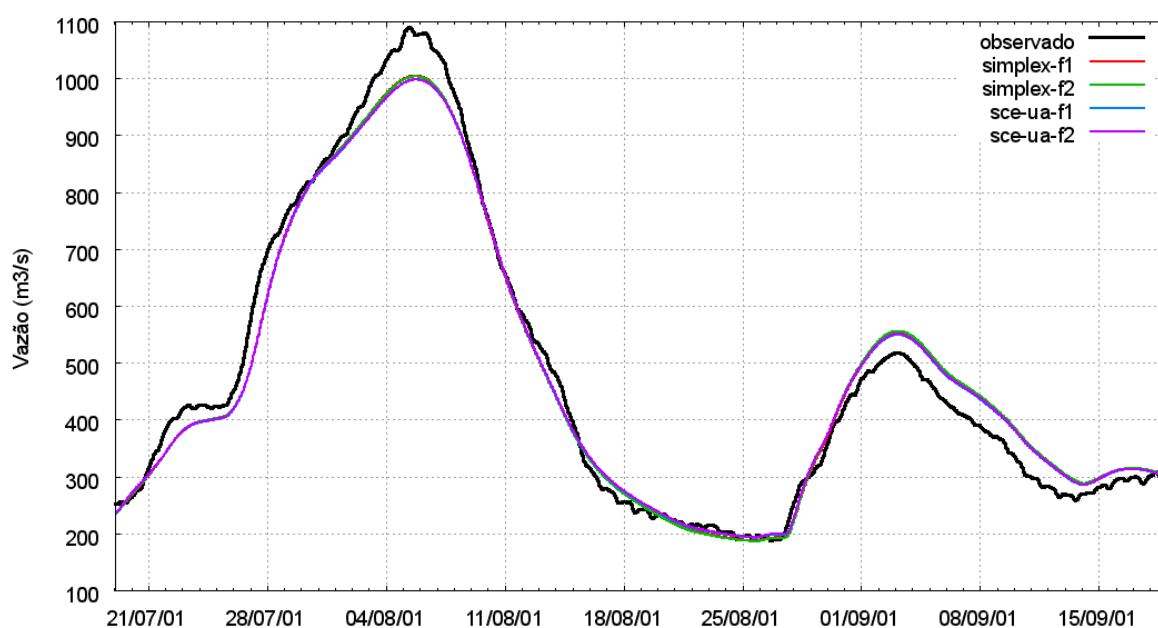


Figura 4.6: Trecho da série de vazão observada em B8 e resultados das simulações com os parâmetros calibrados para o 3R.

Tabela 4.12: Avaliação estatística para calibrações do 3R sobre série observada em B8.

Variável Estatística	Simplex		SCE-UA	
	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>f1</i>	0,110	0,111	0,111	0,111
<i>f2</i>	0,275	0,273	0,276	0,276
<i>EMA</i>	36,4	36,7	36,6	36,7
<i>REMQ</i>	57,3	57,2	57,5	57,5
<i>r</i>	0,992	0,992	0,992	0,992
<i>e</i>	0,975	0,975	0,975	0,9758
NF	2.966	3.032	3.823	16.834

Com base nos dados da Tabela 4.12, pode-se verificar que todos os cenários de calibração apresentaram valores muito próximos dos índices estatísticos avaliados. Em geral o erro médio absoluto foi de 36,5 m³/s, erro médio quadrático 57,3 m³/s, correlação linear em torno de 0,992, e coeficiente de Nash-Sutcliffe por volta 0,975. Todavia, o *EMA* alcançado pelas séries calibradas por *f1* foi ligeiramente menor que o obtido nas calibrações por *f2*, sendo que o *Simplex* também saiu-se um pouco melhor que SCE-UA em relação a este índice. Porém, os altos valores de *r* e *e* mostram que todas as calibrações apresentam bons resultados.

Neste teste ocorreu um resultado interessante. A calibração via SCE-UA utilizando a 1ª função objetivo convergiu após 3.800 cálculos da função. Número de mesma proporção ao NF das calibrações do *Simplex*, enquanto que a calibração do SCE-UA com *f2* empregou 16 mil cálculos da função. Mesmo assim, a série gerada com os parâmetros obtidos na calibração SCE-UA com *f1*, apresentou melhores resultados, em comparação ao SCE-UA com *f2*, de *f1*, *EMA* e correlação linear.

Em comparação aos valores de NF obtidos nas calibrações de B1 com o modelo 3R, houve um aumento, tanto para o *Simplex* quanto para o SCE-UA, do número de cálculos para que as rotinas convergissem durante a calibração da B8.

4.1.4 Calibração de série observada para o modelo de Sacramento

Repetindo os mesmos experimentos da seção anterior, porém utilizando o modelo de Sacramento para simular as vazões, chegou-se aos seguintes conjuntos de parâmetros, apresentados na Tabela 4.13, para a sub-bacia B1.

Para melhor avaliar os resultados obtidos pelas séries simuladas com os parâmetros calibrados sob os diferentes métodos, foi gerada a Figura 4.7, onde é possível visualizar o mesmo período das simulações para B1, representados na Figura 4.5. Além da visualização de um trecho destas séries, foram calculados os mesmos índices estatísticos empregados nas avaliações das calibrações sobre série observada para o modelo 3R, sendo que os resultados para a calibração da B1 estão disponíveis na Tabela 4.14.

Tabela 4.13: Parâmetros do Sacramento para calibração da sub-bacia B1.

Parâmetro		<i>Simplex</i>		SCE-UA	
		<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>UZTWM</i>	(mm)	45,0	57,6	53,7	58,2
<i>UZFWM</i>	(mm)	117,4	125,0	125,0	125,0
<i>LZTWM</i>	(mm)	50,0	50,1	50,0	50,0
<i>LZFPM</i>	(mm)	999,9	998,1	1000,0	1000,0
<i>LZFSM</i>	(mm)	17,7	5,8	22,4	24,4
<i>UZK</i>	(dia ⁻¹)	0,1022	0,1006	0,1000	0,1000
<i>LZPK</i>	(dia ⁻¹)	0,0044	0,0044	0,0043	0,0041
<i>LZSK</i>	(dia ⁻¹)	0,0278	0,0585	0,0232	0,0272
<i>PCTIM</i>	(fração)	0,191	0,200	0, 200	0, 200
<i>ADIMP</i>	(fração)	0,273	0,267	0,268	0,265
<i>PFREE</i>	(fração)	0,5157	0,0035	0,5646	0,0005
<i>ZPERC</i>	–	249,3	244,2	250,0	250,0
<i>REXP</i>	–	1,1012	1,1021	1,1000	1,1000
<i>RSERV</i>	(fração)	0,533	0,560	0,505	0,496
<i>RIVA</i>	(fração)	0,00079	0,00041	0,00000	0,00000
<i>SIDE</i>	–	0,00028	0,00003	0,00000	0,00004
β	–	0,00856	0,00698	0,0059	0,00724
η	–	1,12377	1,17851	1,22017	1,1701

As informações expostas nas Tabela 4.13 e 4.14 e na Figura 4.7, indica que todas as simulações, com parâmetros calibrados nos quatro cenários em teste, apresentaram resultados semelhantes quanto à tentativa de representar a série de vazão observada. Erros médios absoluto da ordem de $26 \text{ m}^3/\text{s}$, erro quadrático em torno de $44 \text{ m}^3/\text{s}$, correlação linear de 0,8 e coeficiente Nash-Sutcliffe de 0,64. Contudo as séries geradas com parâmetros calibrados por *f2* obtiveram resultados ligeiramente melhores destes indicadores estatísticos. Nestas simulações o *EMA* foi em média $1 \text{ m}^3/\text{s}$ menor que nas simulações utilizando parâmetros calibrados por *f1*, sendo que os demais índices também apresentaram pequenas melhoras.

O emprego de rotinas de calibração automática distintas também exerceu pouca influência sobre a qualidade da série simulada, contudo o *SCE-UA* obteve resultados ligeiramente melhores. Quantitativamente observa-se a redução de $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, tanto para o erro absoluto quanto para o erro quadrático, enquanto que para a correlação e Nash-Sutcliffe há melhoras da ordem de 10^{-3} unidades. Entretanto, em termos de eficiência computacional o *Simplex* foi bastante superior ao *SCE-UA*, utilizando em torno de 1/5 de cálculos da função objetivo empregados no *SCE-UA*.

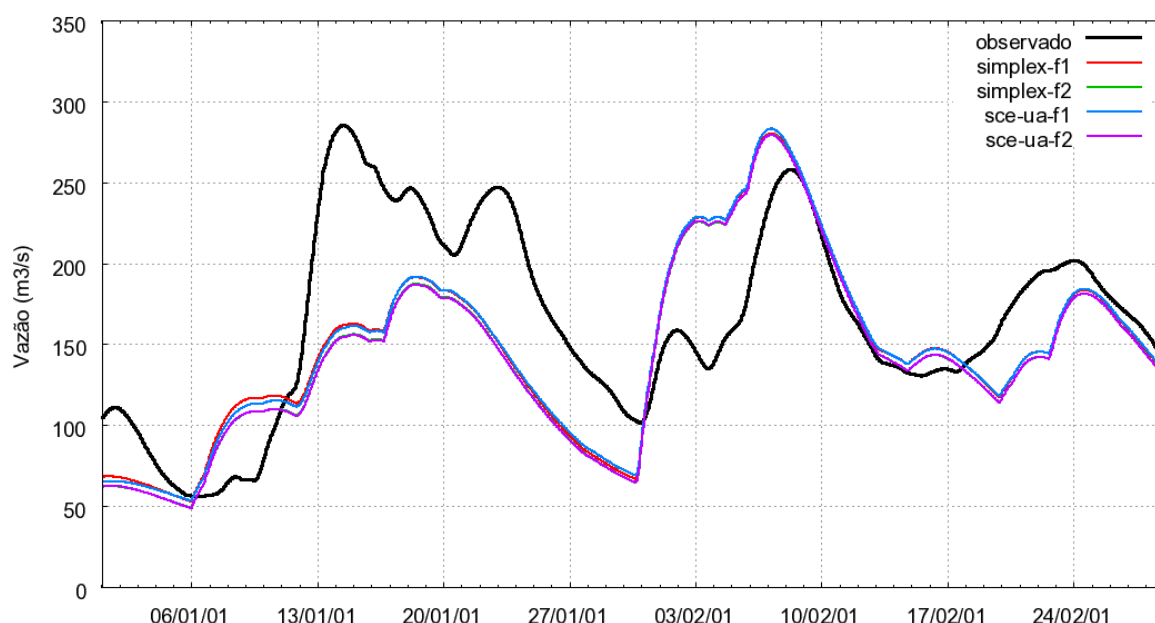


Figura 4.7: Trecho da série de vazão observada em B1 e resultados das simulações com os parâmetros calibrados para o Sacramento.

Tabela 4.14: Avaliação estatística para calibrações do Sacramento sobre série observada em B1.

Variável Estatística	Simplex		SCE-UA	
	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>f1</i>	0,422	0,428	0,421	0,428
<i>f2</i>	0,212	0,211	0,212	0,211
<i>EMA</i>	26,4	25,3	26,3	25,2
<i>REMQ</i>	44,2	43,9	44,1	43,9
<i>r</i>	0,798	0,802	0,799	0,802
<i>e</i>	0,636	0,640	0,637	0,641
NF	6.804	8.980	43.681	45.315

Testados os cenários de calibração para a 8ª sub-bacia, foi montada a Tabela 4.15 onde são exibidos os valores dos parâmetros do modelo de Sacramento, obtidos nas otimizações. Para uma avaliação melhor fundamentada foi gerada a Figura 4.8 onde foi plotado o trecho das séries de vazões, observada e simuladas, durante o mesmo período utilizado para analisar o desempenho das calibrações no modelo 3R (Figura 4.6). De posse das séries simuladas, foram calculados os índices estatísticos utilizados para avaliar as calibrações sobre séries observadas, expostos na Tabela 4.16.

Observando-se o gráfico da Figura 4.8 nota-se que novamente obtiveram-se séries simuladas próximas à série observada, também sendo possível observar uma leve diferença entre as séries calibradas por funções objetivo diferentes. Esta diferença é visualizada mais facilmente no período entre 28 de agosto e 17 de setembro. Olhando os parâmetros da Tabela 4.15 verifica-se que os parâmetros *UZTWM*, *PCTIM* e *PFREE* convergiram para valores diferentes quanto à função objetivo, enquanto que o parâmetro *LZPK* seguiu para pontos distintos conforme a rotina de calibração empregada. Contudo, todas as calibrações convergiram para um mesmo ponto quanto aos parâmetros β e η . Dado que a vazão contribuinte de montante na sub-bacia 8 é maior que a vazão gerada na própria sub-bacia, esta convergência para os mesmos parâmetros de propagação explica a semelhança nos resultados das séries simuladas.

Tabela 4.15: Parâmetros do Sacramento para calibração da sub-bacia B8.

Parâmetro		<i>Simplex</i>		SCE-UA	
		<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>UZW</i>	(mm)	37,7	26,9	38,4	27,3
<i>UZF</i>	(mm)	125,0	125,0	125,0	125,0
<i>LZW</i>	(mm)	50,1	50,0	50,0	50,0
<i>LZF</i>	(mm)	10,0	10,6	10,0	10,0
<i>LZF</i>	(mm)	294,0	299,9	300,0	300,0
<i>UZK</i>	(dia ⁻¹)	0,2284	0,5000	0,1005	0,1003
<i>LZPK</i>	(dia ⁻¹)	0,0005	0,0006	0,0500	0,0500
<i>LZSK</i>	(dia ⁻¹)	0,1241	0,1270	0,1265	0,1262
<i>PCTIM</i>	(fração)	0,045	0,071	0,041	0,064
<i>ADIMP</i>	(fração)	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>PFREE</i>	(fração)	0,4379	0,6000	0,4391	0,6000
<i>ZPERC</i>	–	245,5	245,1	229,0	248,4
<i>REXP</i>	–	1,2741	1,1170	1,1087	1,4371
<i>RSERV</i>	(fração)	0,407	0,567	0,306	0,272
<i>RIVA</i>	(fração)	0,00012	0,00003	0,00000	0,00000
<i>SIDE</i>	–	0,00036	0,00005	0,00000	0,00000
β	–	0,08253	0,08113	0,08284	0,08200
η	–	0,70001	0,70201	0,70000	0,70000

Avaliando estatisticamente percebe-se pelos dados da Tabela 4.16 que o erro médio absoluto das calibrações com *f2* foi 2,5 m³/s menor que nas calibrações por *f1*. Contudo, nos demais índices os ganhos pela calibração por *f2* foram muito pequenos. Ao oposto das simulações do Sacramento para a sub-bacia 1, nota-se uma leve superioridade da calibração por *Simplex* à calibração do SCE-UA. Porém, novamente as diferenças entre os resultados estatísticos ocorreram em uma ordem de grandeza muito pequena.

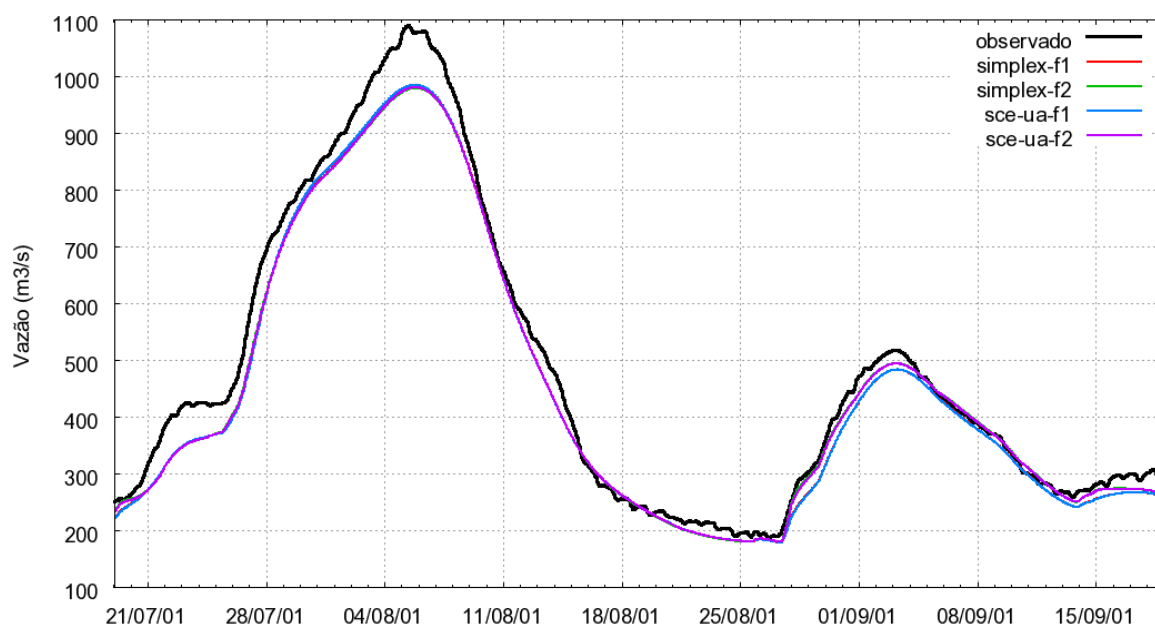


Figura 4.8: Trecho da série de vazão observada em B8 e resultados das simulações com os parâmetros calibrados para o Sacramento.

Tabela 4.16: Avaliação estatística para calibrações do Sacramento sobre série observada em B8.

Variável Estatística	<i>Simplex</i>		SCE-UA	
	<i>f1</i>	<i>f2</i>	<i>f1</i>	<i>f2</i>
<i>f1</i>	0,126	0,127	0,126	0,127
<i>f2</i>	0,308	0,305	0,308	0,305
<i>EMA</i>	43,9	41,5	43,9	41,6
<i>REMQ</i>	64,0	63,4	64,1	63,4
<i>r</i>	0,994	0,994	0,994	0,994
<i>e</i>	0,969	0,969	0,969	0,969
NF	8.679	6.863	41.115	75.287

Neste teste, do modelo de Sacramento para a sub-bacia B8, foi constatada a maior diferença de desempenho computacional entre o *Simplex* e o SCE-UA. Na calibração utilizando *f2* como função objetivo, o *Simplex* usou menos de 1/10 de cálculos que o SCE-UA. E na calibração por *f1*, o *Simplex* utilizou em torno de 1/5 de cálculos da função objetivo empregados pelo SCE-UA para convergência do ponto ótimo.

4.1.5 Escolha da rotina de calibração automática

De modo geral, tanto nas calibrações sobre série sintética quanto sobre série observada, os resultados das calibrações por ambas as rotinas de otimização ficaram próximos entre si. Porém, é importante observar que no procedimento de calibração pelo *Simplex* são realizadas quatro calibrações para cada cenário, cada uma utilizando uma matriz de pontos iniciais diferente, tomando-se o melhor resultado como o gerado pela rotina. E embora o SCE-UA utilize uma quantidade de pontos muito maior que o *Simplex*, alterações no sorteio do grupo inicial de pontos pode sim levar a resultados ligeiramente diferentes. Entretanto não foram executadas calibrações com populações iniciais diferentes nos testes apresentados neste trabalho.

Nas calibrações sobre as séries observadas notou-se que, para B1, a rotina SCE-UA obteve índices estatísticos ligeiramente melhores que os obtidos pelo *Simplex*, enquanto que nas calibrações de B8 ocorreu o contrário, embora a diferença no modelo de Sacramento para esta sub-bacia tenham sido praticamente insignificantes. Os resultados das calibrações pelo SCE-UA foram obtidos às custa de um número elevado de cálculos da função objetivo. Esta diferença do desempenho computacional entre as rotinas é suavizada pelo fato do *Simplex* necessitar de quatro execuções, devido ao uso de quatro matrizes iniciais diferentes. A troca destas matrizes é feita manualmente, sendo que duas das quatro matrizes são fixas, fornecidas igualmente nas calibrações de todas as sub-bacias, enquanto que as outras duas são matrizes construídas pela perturbação do melhor ponto obtido nas calibrações com as matrizes fixas. Esta perturbação também é realizada manualmente. Assim, o processo de troca e geração de duas matrizes iniciais, realizada pelo operador da rotina, soma um tempo considerável no processo total de calibração dos modelos hidrológicos.

Contudo, o tempo de integração dos modelos hidrológicos 3R e Sacramento são bastante diferentes. Em calibrações via SCE-UA, que não necessita de intervenções durante o processo de calibração, foi cronometrado o tempo gasto pela rotina durante toda a sua execução através de funções específicas do compilador FORTRAN 90. Dados os tempos das execuções do SCE-UA, em segundos, foi estimada a quantidade de cálculos da função objetivo por segundo, sendo que na realidade este valor informa o tempo necessário para integrar o modelo ao longo do período de calibração, uma vez que a função objetivo é calculada com base na série simulada. Utilizando de um mesmo *hardware*, nas calibrações com o modelo 3R foram obtidos números em torno de 0,96 funções por segundo, enquanto que pelo Sacramento são calculadas 10,3 funções por segundo. Tamanha diferença está

provavelmente ligada ao método de integração dos modelos. O modelo 3R utiliza o método de runge-kutta de 4ª ordem com número de passos de integração variado, descrito em Press *et al.* (1992), enquanto que o Sacramento realiza uma integração direta dos armazenamentos, também com número de passos variados. O fato de o modelo de Sacramento levar um décimo do tempo de integração do modelo 3R fez com que o tempo necessário para realizar as trocas das matrizes do *Simplex* compensasse o tempo total empreendido pelo SCE-UA. Entretanto, na calibração do modelo 3R, o tempo gasto na troca das matrizes, mais a execução das quatro rodadas do *Simplex*, é bastante inferior ao tempo utilizado na execução completa do SCE-UA para este modelo.

Assim, optou-se por fixar a rotina SCE-UA na calibração das nove sub-bacias dos sistemas de previsões propostos com o modelo de Sacramento, enquanto que para os sistemas com modelo 3R os parâmetros foram obtidos pela rotina *Simplex*.

4.2 Avaliação dos sistemas de previsão propostos

Após identificar a rotina de calibração automática mais indicada para cada modelo, serão avaliadas as propostas de alterações no sistema de previsão, seja pelo modelo hidrológico, ou pela função objetivo utilizada na calibração.

Conforme exposto no capítulo anterior, a análise destes resultados será feita pela comparação de índices estatísticos e também pela comparação visual de um período da simulação hidrológica. Tal comparação é realizada não somente entre os cenários propostos, mas principalmente com o ambiente que visa à simulação mais fiel ao atual sistema de previsão hidrológica em operação. Assim, os resultados obtidos pelos cenários podem ser classificados como melhor ou pior em relação ao sistema semelhante ao operacional.

4.2.1 Resultados do sistema de referência

O sistema denotado como “sistema de referência” é o que está configurado da forma mais semelhante ao sistema de previsão hidrológica em atual operação no SIMEPAR. Diz-se semelhante, e não idêntico, porque a aquisição de dados para o modo operacional ocorre de modo diferente, dado que é preciso atualizar os dados de entrada do modelo a cada execução do mesmo. Em síntese a aquisição periódica dos dados hidro-meteorológicos não chega a ser

uma diferença entre os dois sistemas, entretanto os métodos de identificação e preenchimento de falhas não são idênticos. Como não é possível utilizar informações futuras para identificar e preencher falhas, em um sistema de execução sistemática, nem sempre é possível garantir que todas as falhas serão minimizadas. Entretanto, nas séries de dados utilizados neste trabalho, entre 1998 e 2006, houve um trabalho bastante intensivo no sentido de garantir dados com a melhor qualidade possível.

A utilização de uma série de dados com boa consistência é importante principalmente na contabilidade dos índices estatísticos que serão utilizados para realizar comparações entre os cenários de sistemas de previsão.

Basicamente, a principal característica do sistema de referência é que este utiliza o modelo 3R com parâmetros calibrados pela rotina *Simplex*, guiada pela função objetivo 1 (equação (3.4)), porém fixando-se o expoente do termo de propagação, η , no valor 1,0, sendo posteriormente realizadas algumas modificações manuais nos valores dos demais parâmetros.

Dadas estas informações, foi realizada a simulação do sistema de referência de previsão para os anos de 2003 a 2006, sendo que os erros médios e os coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe obtidos neste período estão representados no gráfico da Figura 4.9.

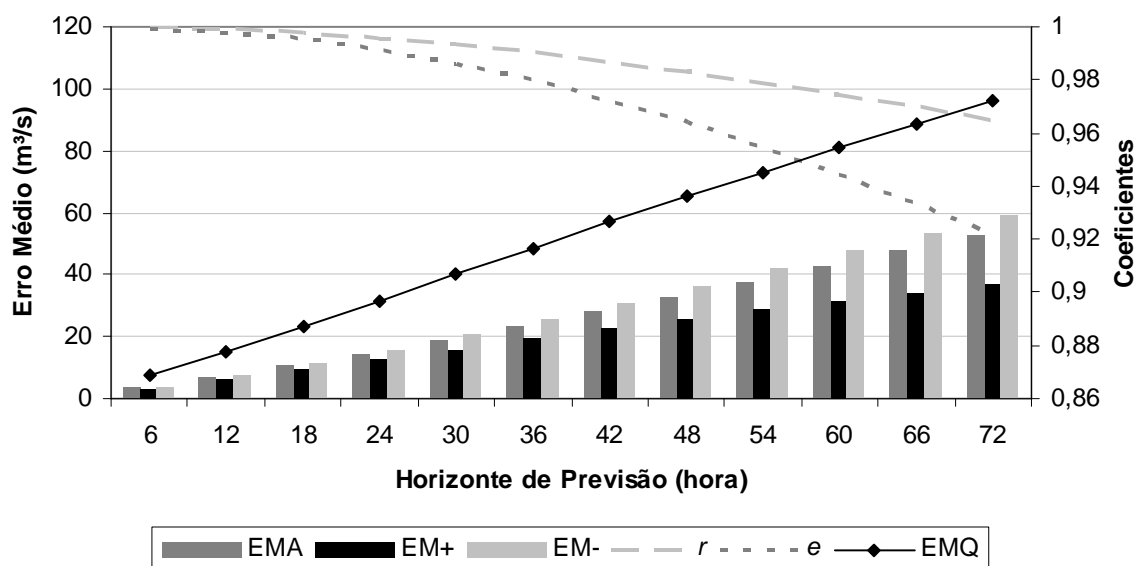


Figura 4.9: Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – modelo 3R, parâmetros de referência.

Observando o gráfico da Figura 4.9, nota-se que os valores de erro médio aumentam de forma linear com o aumento do horizonte de previsão. Quantitativamente, o erro médio absoluto sobe para um valor próximo de $15 m^3/s$ na previsão de 24 horas à frente, aumentando

para aproximadamente $30 \text{ m}^3/\text{s}$ e $50 \text{ m}^3/\text{s}$ nos horizontes de 48 e 72 horas. Os erros negativos e positivos permaneceram em valores próximos ao do erro absoluto durante as primeiras 24 horas. Entretanto no 2º e 3º dia o erro positivo ficou abaixo do erro absoluto, enquanto que o erro negativo apresentou um valor acima desse. Contudo, no 2º dia, a diferença entre os erros polarizados e o erro médio era praticamente de mesma ordem, sendo que no 3º dia o erro negativo ficou um pouco acima do erro absoluto, enquanto que erro positivo ficou bastante abaixo desse. O erro médio quadrático também manteve uma mesma proporção em relação ao erro absoluto para todos os horizontes de previsão, sendo que o *REMQ* foi sempre o dobro do *EMA*. Isto indica que devem existir muitas situações em que o erro entre a vazão prevista e a vazão observada ficou bastante acima do valor médio, de modo que deve ser bastante freqüente a ocorrência de erros de maior magnitude que a apresentada pelo valor do *EMA*.

Quanto aos coeficientes calculados para a simulação do sistema de referência, nota-se que mesmo para a previsão de 72 horas, a correlação linear é alta, enquanto que o coeficiente Nash-Sutcliffe demonstra uma queda maior com o aumento do horizonte de previsão, porém ainda manteve-se na ordem de 0,92 para a previsão de três dias à frente, o que indica que o modelo ainda é capaz de reproduzir o comportamento da vazão com uma certa fidelidade.

Avaliando visualmente o desempenho do sistema de referência, foi plotado na Figura 4.10 as previsões realizadas no período de 24 de agosto a 31 de setembro do ano de 2005, época em que houve um grande evento de cheia, de modo que é possível avaliar a previsão para um período de grande interesse.

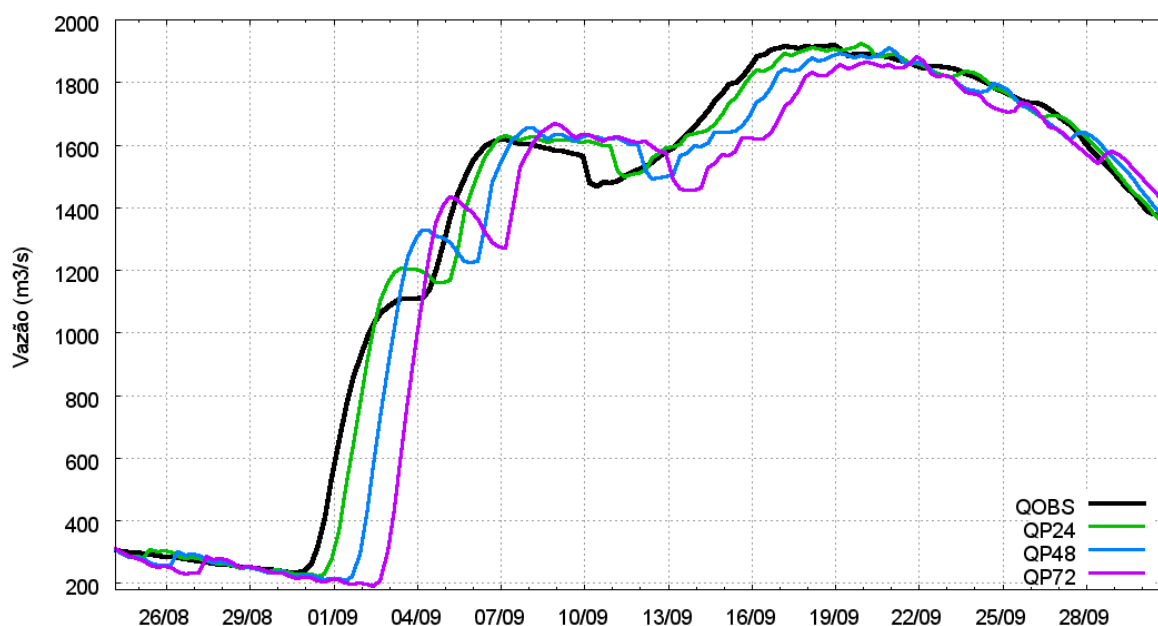


Figura 4.10: Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – modelo 3R, parâmetros de referência, previsão sem chuva.

Na situação exposta na Figura 4.10, observa-se que o sistema apresentou maiores erros nas subidas intensas da hidrógrafa, em especial no período entre 31 de agosto e 3 de setembro. Todavia, a previsão de 24 horas ficou muito próxima ao observado entre 24 e 31 de agosto e depois do dia 7 de setembro em diante. Já os horizontes de 48 e 72 horas só apresentaram bons resultados nos períodos de recessão. A previsão do rápido aumento da vazão que ocorreu entre 31 de agosto e 7 de setembro deixou a desejar, pois no dia 2 de setembro, por exemplo, a vazão observada de $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$, foi prevista como aproximadamente $400 \text{ m}^3/\text{s}$ e $200 \text{ m}^3/\text{s}$ há dois e três dias antes, respectivamente. Entretanto no momento do maior pico de vazão, próximo de $1900 \text{ m}^3/\text{s}$ em 19 de setembro, a previsão realizada nos três dias anteriores indicaram um valor próximo ao ocorrido.

4.2.2 Resultados dos sistemas propostos

Os sistemas propostos são quatro ao todo, diferenciados quanto ao modelo utilizado na simulação hidrológica, e quanto à função objetivo utilizada na etapa de calibração dos parâmetros das 9 sub-bacias do sistema. Sendo eles: (i) modelo 3R com parâmetros calibrados pela 1ª função objetivo (3R- $f1$); (ii) modelo 3R com parâmetros calibrados por $f2$ (3R- $f2$); (iii) emprego do modelo de Sacramento calibrado por $f1$ (SAC- $f1$); (iv) modelo de Sacramento calibrado pela 2ª função objetivo (SAC- $f2$).

Assim como na avaliação do sistema de referência, serão utilizados dois gráficos. No primeiro são exibidos os valores de erro médio absoluto, positivo, negativo e quadrático, juntamente com os valores dos coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe. Tais índices foram calculados com base no resultado das previsões realizadas entre 2003 e 2006, sendo que foram avaliados somente os horizontes de previsão múltiplos de 6 horas. A segunda figura representa as séries de vazões que foram previstas, a 24, 48 e 72 horas, do período entre 24 de agosto e 31 de setembro de 2005, para a sub-bacia B9. Neste período houve o maior registro da vazão observada durante os quatro anos simulados e, portanto, representa uma situação em que a previsão hidrológica para alerta de enchentes seria de grande valia.

O sistema 3R-*fl* apresentou erros médios absolutos praticamente iguais aos verificados no sistema de referência, como visto na Figura 4.11. Contudo, também se pode perceber que logo nos horizontes de previsão do 2º dia, o erro médio positivo já está mais distante do erro absoluto que o erro negativo, o que mostra que o sistema tem uma maior tendência a subestimar a vazão observada. Ao longo do 3º dia a diferença é ainda maior, sendo que o *EM* apresenta valores próximos ao *EMA*, podendo-se concluir que a subestimação da vazão é muito mais freqüente que a superestimação. Quanto ao *REMQ*, a proporção de duas vezes o valor do *EMA* em praticamente todos os horizontes de previsão, indica que normalmente a diferença entre a vazão prevista e observada fica distante do valor médio.

Em proporção à vazão média da sub-bacia B9, que é de aproximadamente 528 m³/s (Tabela 3.5), os *EMA* obtidos nos horizontes diários de previsão correspondem a 2,8 % para a previsão de 24 horas, 5,7 % na de 48 horas e 9,5 % em 72 horas. Nessa comparação pode-se dizer que os erros são relativamente baixos, entretanto essa estimativa mostra uma situação média dos resultados, e não algo constante. Ou seja, diz-se que, em média, a previsão realizada 72 horas atrás do ponto de interesse subestima – pois o sistema tem maior tendência a subestimar – a vazão observada em 9,5%. Mas isso não significa que na maioria das previsões o erro será dessa ordem.

Os valores obtidos do coeficiente de correlação e do coeficiente de Nash-Sutcliffe também não mostraram alterações perceptíveis quanto ao sistema de referência. Portanto, quanto aos índices estatísticos calculados para as previsões simuladas entre 2003 e 2006, pode-se concluir que o sistema 3R-*fl* não apresentou melhorias significativa, apesar de ter maior tendência em realizar previsões que subestimam a vazão observada.

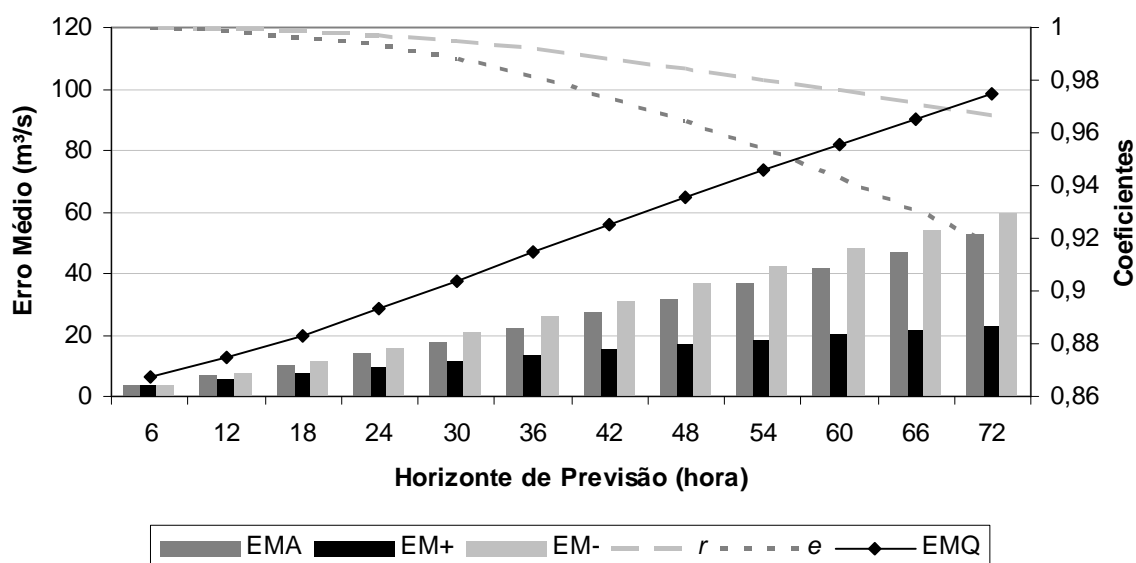


Figura 4.11: Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – modelo 3R, parâmetros calibrados por *f1*.

A Figura 4.12 mostra as previsões geradas pelo sistema 3R-*f1* durante a simulação de previsão para a cheia ocorrida em setembro de 2005. Nessa figura se constata o fato deste sistema superestimar a vazão com menor intensidade, em especial no período de 2 a 5 de setembro. Em comparação ao sistema de referência, as vazões previstas nesse período pelo 3R-*f1* são menores que as visualizadas na Figura 4.10. Outra diferença é quanto à previsão de 24 horas no período entre 6 e 16 de setembro, sendo que o resultado do 3R-*f1* ficou mais próximo à vazão observada que o resultado do sistema de referência. As previsões de 48 e 72 horas também foram ligeiramente melhores, contudo, no geral, este sistema também apresentou erros grandes nas subidas intensas da hidrógrafa, mas bons resultados nas recessões. Já no pico de vazão em 19 de setembro, os três horizontes de previsão do 3R-*f1* apresentaram erros levemente maiores que os simulados pelo sistema de referência. Em torno de 20 m³/s, aproximadamente.

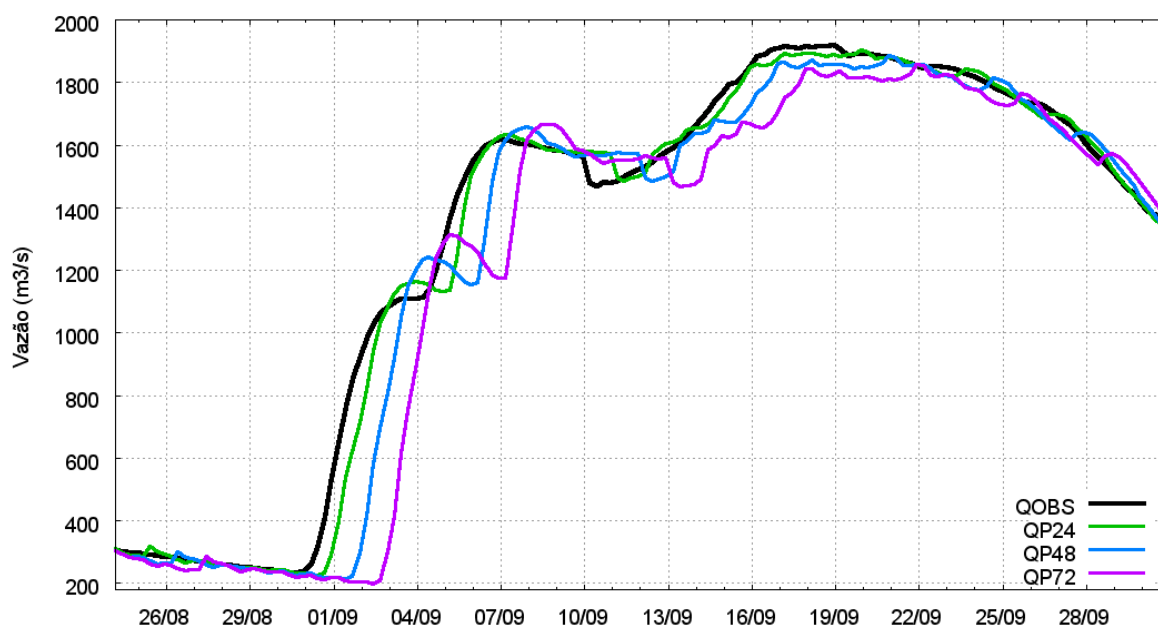


Figura 4.12: Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – modelo 3R, parâmetros calibrados por $f1$, previsão sem chuva.

Trocando a função objetiva na calibração dos parâmetros do modelo 3R, foi realizada nova etapa de simulação de previsão do período em análise. Os resultados estatísticos para este sistema, 3R- $f2$, foram calculados e plotados na Figura 4.13.

Com o apoio da linha de grade de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ da Figura 4.13, verifica-se que nos horizontes de previsão de 48 e 54 horas, o erro médio positivo do 3R- $f2$ foi ligeiramente maior que o do 3R- $f1$. Olhando atentamente é possível verificar que na realidade todos os erros médios expostos em barras tiveram um pequeno aumento. Em valores aproximados, o *EMA* nos horizontes de 24, 48 e 72 horas foram de 15, 30 e $55 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. Também para este sistema nota-se uma grande diferença na distância dos erros médios polarizados em relação ao erro médio absoluto. Portanto o 3R- $f2$ também tende a subestimar a vazão observada de forma mais intensa e freqüente que o sistema de referência.

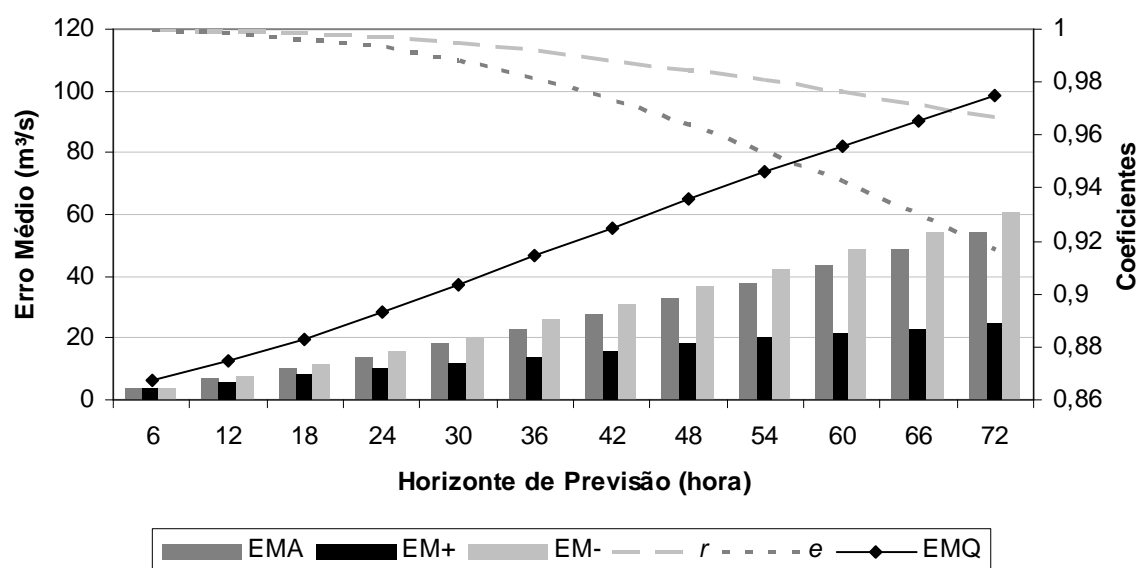


Figura 4.13: Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – modelo 3R, parâmetros calibrados por $f2$.

O *REM* manteve-se praticamente o mesmo do calculado nos horizontes de previsão do sistema de referência e do 3R- $f1$, de modo que novamente, conclui-se que são várias as ocasiões em que a previsão erra com uma intensidade muito maior ao erro médio. Quanto aos coeficientes de correlação e eficiência, não é possível visualizar alguma diferença em relação aos sistemas anteriores. Portanto, a mudança da função objetivo na calibração dos parâmetros do modelo 3R, foi responsável por apenas um aumento muito pequeno nos índices de erro médio absoluto, positivo e negativo.

Este fato é evidenciado na visualização das previsões geradas para a cheia de 2005 (Figura 4.14). Entre as simulações com parâmetros calibrados pela função objetivo $f1$ e pela $f2$, há diferenças muito sutis, só percebidas em visualizações de maior resolução das Figura 4.12 e 4.14. Logo, todas as diferenças entre a simulação do sistema de referência e do sistema 3R- $f1$, aplicam-se ao sistema 3R- $f2$.

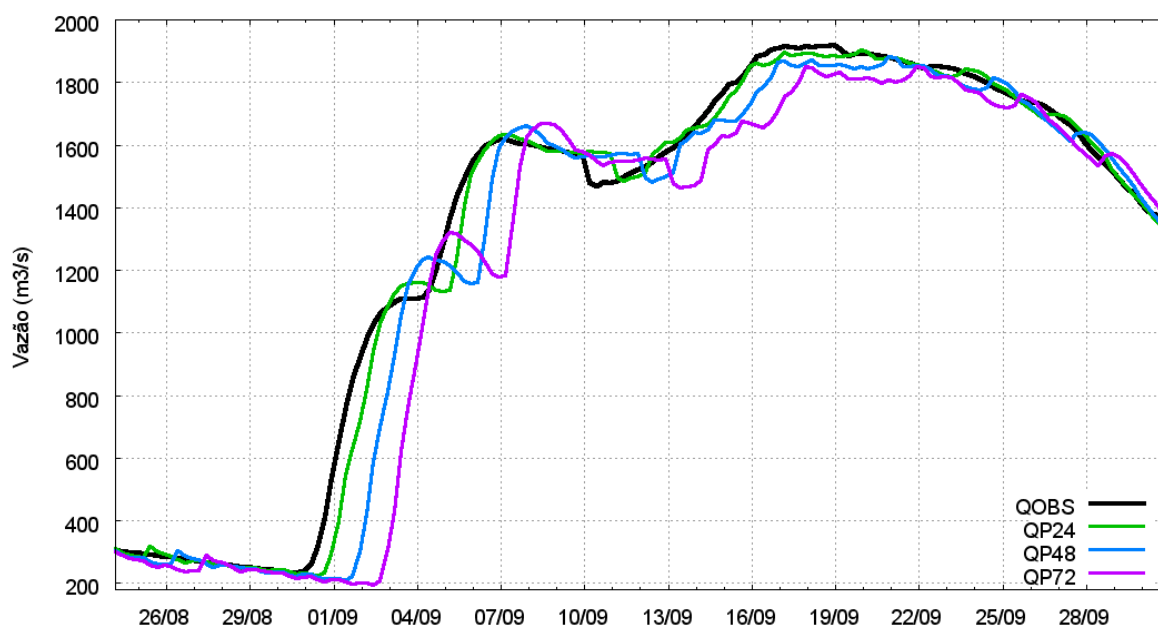


Figura 4.14: Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – modelo 3R, parâmetros calibrados por f_2 , previsão sem chuva.

Os próximos dois sistemas avaliados foram simulados pelo modelo de Sacramento, utilizando-se dos mesmos procedimentos, avaliação de erros médios e coeficientes, além de parecer visual da cheia de 2005, para analisar a qualidade dos resultados obtidos.

Na simulação com parâmetros calibrados pela 1ª função objetivo, os índices estatísticos contabilizados ao longo do período de 2003 a 2006 foram expostos no gráfico da Figura 4.15. Erro médio absoluto cresce com o aumento do horizonte de previsão num padrão aproximadamente linear. A previsão de 24 horas tem um EMA próximo de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, a de 48 horas, $35 \text{ m}^3/\text{s}$, e a de 72 horas, $55 \text{ m}^3/\text{s}$. Em comparação ao sistema de referência houve um aumento de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ nos erros das previsões realizadas 48 e 72 horas antes. O erro médio negativo ficou muito próximo ao erro absoluto, sempre ligeiramente à cima deste. Entretanto, do horizonte de previsão de 30 horas em diante, o erro médio positivo postou-se sempre em um valor abaixo da metade do erro absoluto. Esta diferença entre o erro positivo e negativo em relação ao erro absoluto, mostra que o sistema *SAC- f_1* também apresenta forte tendência a gerar previsões subestimadas da vazão com o aumento do horizonte de previsão.

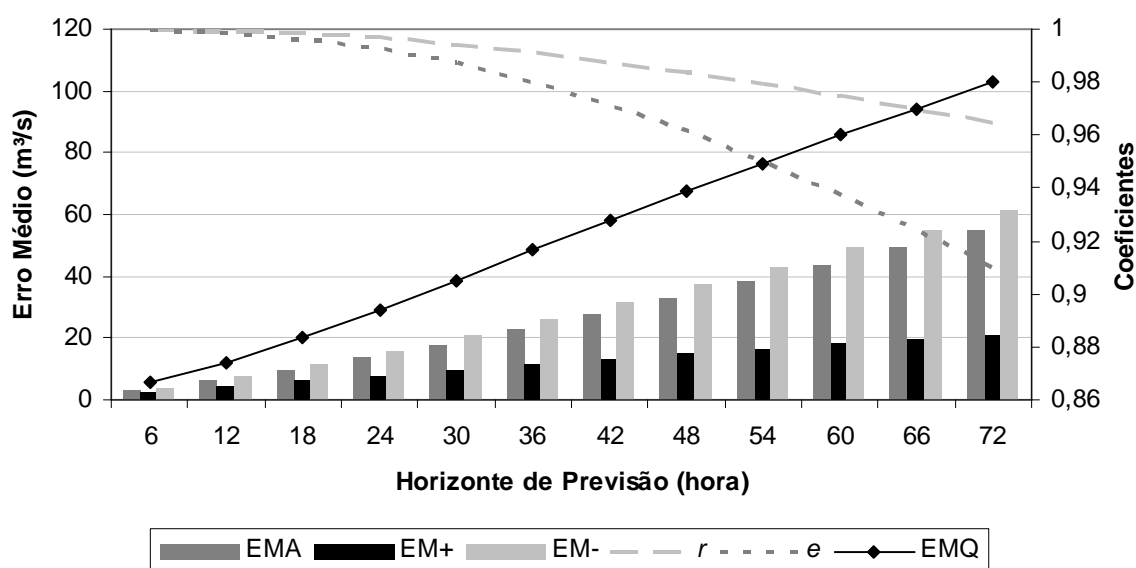


Figura 4.15: Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – modelo Sacramento, parâmetros calibrados por *f1*.

O erro médio quadrático também ficou acima do estimado no sistema de referência, sendo que chegou a ultrapassar os 100 m³/s no horizonte de previsão de 72 horas. Entretanto, como os demais erros também aumentaram, a proporção do *REM*Q em relação ao *EMA* continuou por volta do dobro desse valor. Semelhante aos demais sistemas, essa proporção indica que erros de magnitude maior que a do valor médio devem ocorrer corriqueiramente. Neste sistema não se notou diferença significativa aos demais quanto ao coeficiente de correlação linear. Entretanto é fácil verificar que o coeficiente de Nash-Sutcliffe declinou mais intensamente ao longo dos horizontes de previsão. No horizonte de 72 horas esse coeficiente foi contabilizado em 0,91, enquanto que nos sistemas utilizando o modelo 3R e no sistema de referência, o valor era de 0,92.

A Figura 4.16 mostra as previsões realizadas pelo SAC-*f1* na cheia de 2005. Assim como os demais sistemas, ele errou bastante nas subidas mais íngremes da hidrógrafa, enquanto que nos períodos mais estáveis, todos os horizontes de previsão foram satisfatórios. Em relação ao sistema de referência, evidenciam-se novamente os baixos valores e baixas ocorrências de superestimções da vazão, no SAC-*f1*. Considerando somente a previsão de 72 horas, enquanto que no dia 4 de setembro o sistema de referência acertou a vazão ocorrida, ele superestimou em 200 m³/s a vazão no dia seguinte. Neste intervalo o SAC-*f1* subestimou a vazão de 4 de setembro, também em 200 m³/s, mas acertou a vazão do dia seguinte. No ponto de maior vazão, em 19 de setembro, o SAC-*f1* gerou previsões acusando aproximadamente 50 m³/s a menos que as previsões geradas pelo sistema de referência.

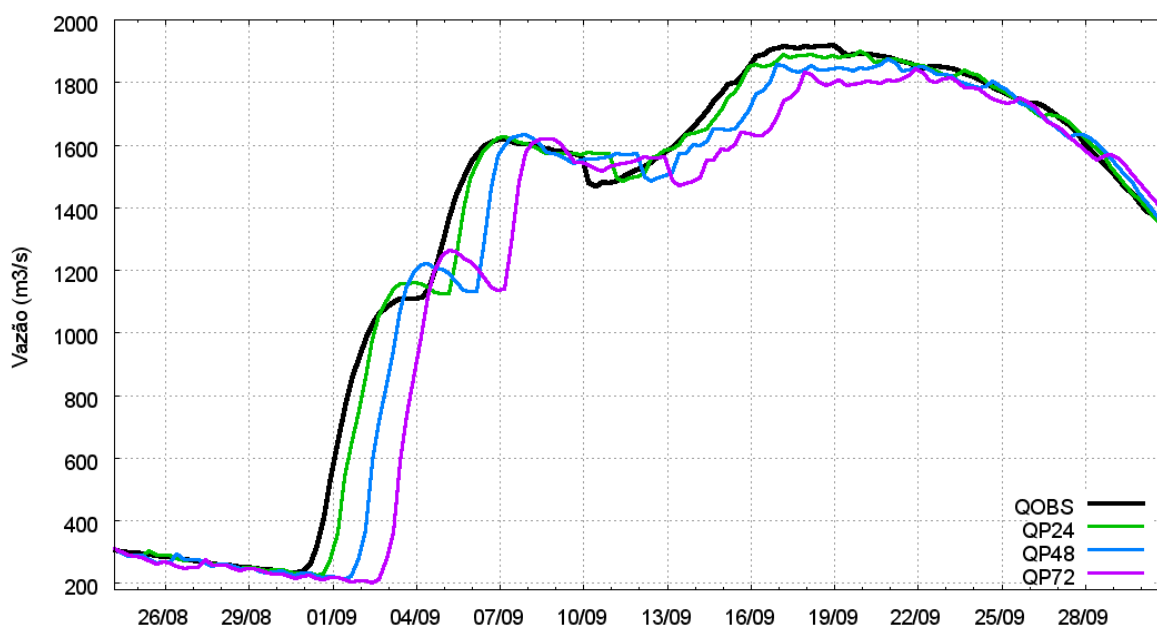


Figura 4.16: Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – modelo Sacramento, parâmetros calibrados por fI , previsão sem chuva.

Em comparação ao sistema $3R-fI$ também se notam séries de previsões ligeiramente subestimadas pelo $SAC-fI$, porém perceptível somente no 3º dia de vazão prevista, o que confirma o pequeno aumento nos valores dos erros médios calculados para esse sistema. No dia 19 de setembro, o $3R-fI$ previu com três dias de antecedência uma vazão por volta de $1820 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que o $SAC-fI$ ficou mais próximo dos $1800 \text{ m}^3/\text{s}$. Dado que a vazão ocorrida nesse dia foi um pouco acima de $1900 \text{ m}^3/\text{s}$, em termos percentuais o erro do $3R-fI$ foi de 4,2 %, e do $SAC-fI$, 5,3 %. Ou seja, uma diferença pequena para um erro relativamente pequeno em horizonte de previsão de 72 horas.

O último sistema proposto é o composto pela simulação hidrológica com o modelo de Sacramento, tendo seus 18 parâmetros calibrados com a 2ª função objetivo. A Figura 4.17 exhibe os índices estatísticos utilizados para avaliar o desempenho desse sistema, em relação ao período simulado de 2003 a 2006.

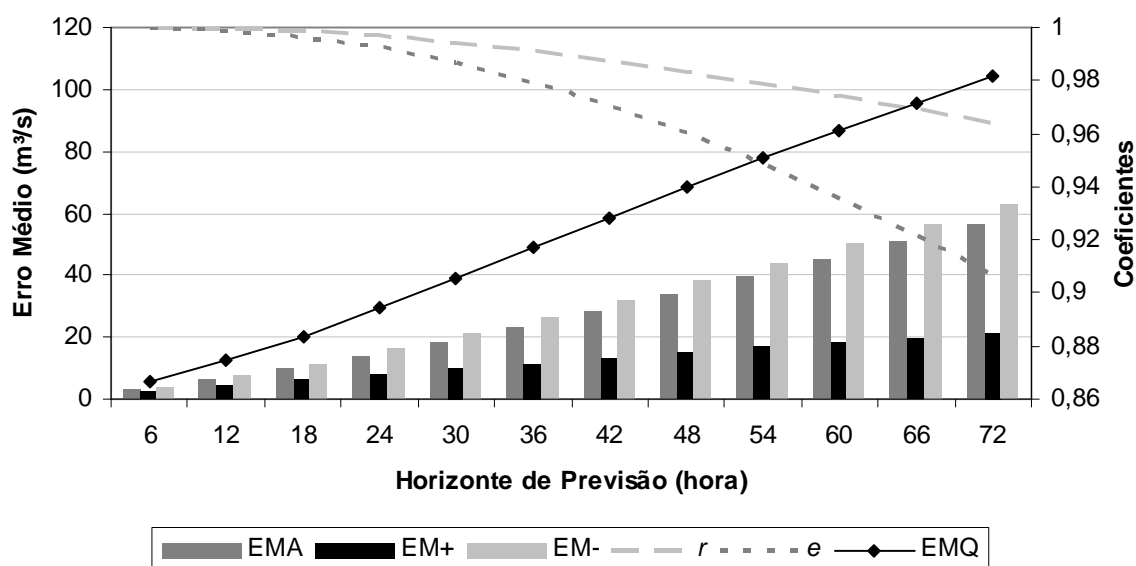


Figura 4.17: Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – modelo Sacramento, parâmetros calibrados por *f2*.

A troca da função objetivo utilizada na calibração dos parâmetros do modelo Sacramento surtiu mesmo efeito à troca realizada nos parâmetros do modelo 3R, ou seja, os resultados do SAC-*f2* foram levemente deteriorados em relação ao SAC-*f1*. Porém, nos horizontes de previsão inferiores a 48 horas a diferença é imperceptível. Tanto que, mesmo para o horizonte de 72 horas, é preciso olhar atentamente ao gráfico das Figura 4.15 e 4.17 para perceber que houve um leve aumento em todos os erros médios. O coeficiente de Nash-Sutcliffe também teve uma ligeira redução. Utilizando a linha de grade de erro médio de 20 m³/s para fazer uma comparação, nota-se que na Figura 4.17 a linha deste índice encosta na linha de grade, enquanto que na Figura 4.15 o valor do coeficiente está levemente acima dessa linha. Entretanto quanto ao coeficiente de correlação não se observa diferença significativa em relação ao sistema anterior.

Como todos os sistemas propostos neste trabalho, o SAC-*f2* também apresentou erros médios negativos ligeiramente acima dos erros absolutos, enquanto que os erros médios positivos figuram-se abaixo da metade deste valor nos últimos quatro horizontes de previsão. Portanto este sistema também tende a subestimar a vazão observada. O *REM*Q que também aumentou em relação ao estimado no SAC-*f1*, manteve-se como um valor próximo do dobro do *EMA* para cada horizonte, reforçando a semelhança aos demais sistemas, agora quanto a ocorrência freqüente de previsões com erros muito maiores ao erro médio.

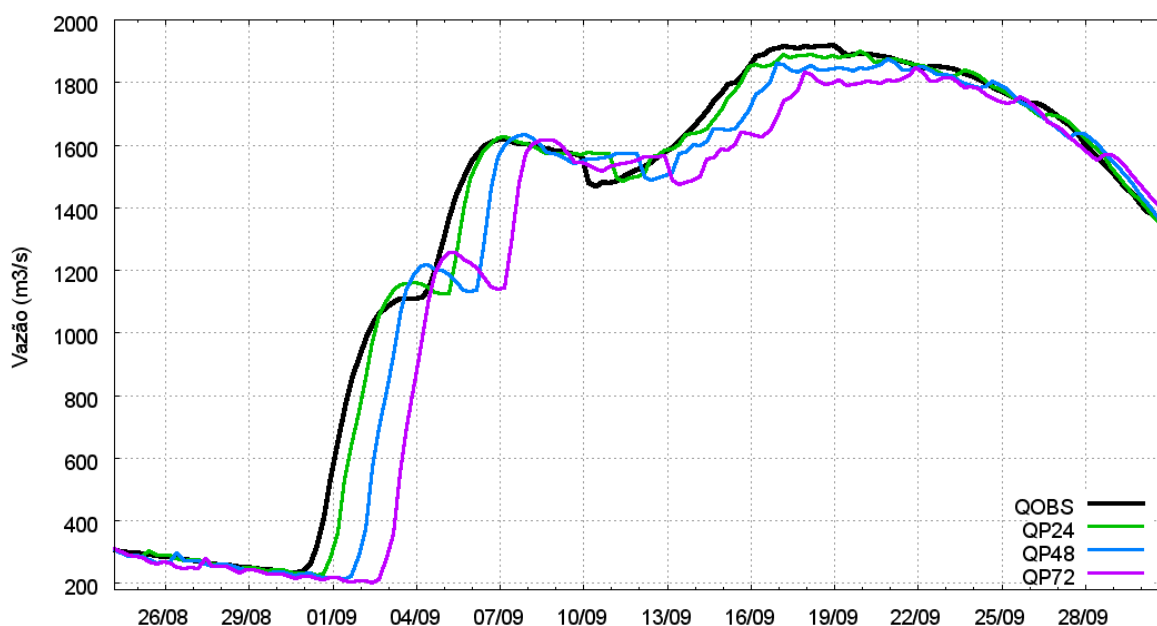


Figura 4.18: Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – modelo Sacramento, parâmetros calibrados por $f2$, previsão sem chuva.

As séries de vazões previstas para o SAC- $f2$ foram muito semelhantes às do SAC- $f1$, igual ao ocorrido entre os sistemas 3R- $f1$ e 3R- $f2$. Portanto, a menos que se sobreponham-se as séries previstas por um sistema e outro, não é possível destacar algum ponto que diferencie as curvas apresentadas nas Figura 4.16 e 4.18.

De modo geral, o resultado apresentado para a previsão da cheia ocorrida em 2005 mostrou as mesmas características dos demais sistemas propostos. Boa estimativa em períodos de pouca variação da vazão, contra erros de grandes proporções nas inclinações mais acentuadas da hidrógrafa. Contudo, somada a depleção da qualidade da previsão pela troca de função objetiva, com a deterioração do resultado pela troca do modelo hidrológico, o sistema SAC- $f2$ representou a pior situação na tentativa de simular vazões futuras para a sub-bacia de União da Vitória.

4.3 Discussão dos resultados dos sistemas de previsão

Em tese, a previsão hidrológica focada no alerta de enchente deve indicar quando o nível de um rio irá chegar a patamares que ofereçam algum perigo à população, com a maior antecedência possível. Para União da Vitória, as vazões que correspondem a cheias com tempo de retorno de 2 e 5 anos, respectivamente, são de $1.418 \text{ m}^3/\text{s}$ e $2.070 \text{ m}^3/\text{s}$,

correspondente às cotas de 744,7 m e 745,9 m (Tucci e Villanueva, 1997). Ambas as cotas estão acima do nível de 744,5 m, que foi a cota utilizada pela COPEL para delimitar as áreas até onde haveriam desapropriações. Contudo, pode-se supor que uma cheia com tempo de retorno de 5 anos, ative um estado de alerta entre leve e moderado.

Dentro deste contexto, o melhor sistema proposto, *3R-fl*, conseguiu prever vazões acima de 1800 m³/s com aproximadamente 6 horas de antecedência que o sistema de referência (ver intervalo entre 16 e 19 de setembro das Figuras 4.10 e 4.12). Entretanto o *3R-fl* fez estimativas em torno de 20 m³/s abaixo do estimado pelo sistema de referência. Acusar uma vazão de 1830 m³/s ao invés dos 1850 m³/s, que foi de fato observado, resulta em uma elevação de nível da ordem de 4 centímetros para o posto de União da Vitória, dada as relações cota-vazão apresentadas acima. Uma elevação desta magnitude é muito pouco relevante para mudar a condição de um estado de alerta.

Todavia, prever uma subida intensa da vazão de um rio pode ser muito importante para preparar um alerta de enchente. Mas neste quesito todos os sistemas foram muito insatisfatórios. Pode-se perceber pelas figuras que apresentavam as simulações da cheia de 2005, que houve duas rápidas elevações da vazão, entre 31 de agosto e 3 de setembro, e depois entre 5 e 7 de setembro. A primeira subida passou praticamente despercebida pelas previsões realizadas com 48 e 72 horas de antecedência de todos os sistemas. Mas no caso da previsão de 24 horas, os sistemas apontavam valores em torno da metade da vazão que ocorreu de fato, contudo mesmo essa pequena melhora deve estar mais relacionada ao procedimento de ancoragem da vazão, que à capacidade do sistema em simular a vazão do rio no dia posterior.

Na segunda subida houve duas situações distintas. No primeiro dia dessa subida apenas a previsão realizada 72 horas atrás é que indicava um aumento da vazão, sendo que o sistema de referência a previu com antecedência até o patamar de 1400 m³/s, enquanto que o *3R-fl* apontou o momento correto, mas até 1300 m³/s. Contudo, tanto para o sistema de referência quanto para o *3R-fl*, estas previsões eram na realidade um atraso da previsão para a primeira subida. Quanto aos horizontes de 24 e 48 horas, para o 1º dia da segunda subida, a previsão do dia anterior indicava uma estabilização do nível do rio, enquanto que as previsões realizadas em dois dias anteriores indicavam uma queda da vazão. Isto também para os dois sistemas em discussão. No segundo dia da segunda subida, as séries de previsões do horizonte de 24 horas foram melhores que os demais. Contudo, as superestimativas de vazão realizada pelo sistema de referência nos dias anteriores, ajudaram os horizontes de 48 horas e 72 horas a

não apresentarem previsões tão baixas quanto as do 3R-*fI*, embora ambos os sistemas apresentassem redução da vazão enquanto que a vazão observada subia.

Para investigar os equívocos foram investigados os eventos que mais interferem em um modelo chuva-vazão, para simulação de sub-bacia interna: a estimativa da precipitação média e a propagação da vazão contribuinte de montante.

A importância de empregar estimativas de chuva futura ao modelo pode ser medida pelo tempo de concentração da bacia. Em tese, o tempo de concentração de uma bacia representa o tempo necessário para que toda a área de drenagem passe a contribuir para a vazão na exutória da mesma. Para o caso da sub-bacia incremental de União da Vitória, o tempo de concentração é por volta de 24 horas, segundo os métodos de Kirpich e de Dooge para a estimativa do tempo de concentração de bacias hidrológicas (descritos em Mine, 1998). Entretanto, através do método de Kirpich, obteve-se um tempo de concentração em torno de 18 horas, para a resposta da vazão em União da Vitória proveniente do escoamento gerado na sub-bacia de Santa Cruz do Timbó. Portanto, é aceitável supor que chuvas ocorridas algumas horas após o horário de previsão, principalmente sobre a sub-bacia de Santa Cruz do Timbó, possam aumentar significativamente a vazão em União da Vitória.

Nenhum dos sistemas considerou qualquer cenário de ocorrência de precipitação durante o período de previsão da vazão, o que pode ter gerado as subestimativas apresentadas nas subidas das hidrógrafas. Para verificar o impacto da presença da informação da precipitação ocorrida durante o período de previsão, o sistema 3R-*fI* foi novamente executado para o período de 2003 a 2006, fornecendo-se a precipitação ocorrida no período de previsão. Os mesmos índices estatísticos utilizados para avaliar os sistemas de previsão foram calculados para esta nova rodada do 3R-*fI*, e os resultados expostos no gráfico da Figura 4.19.

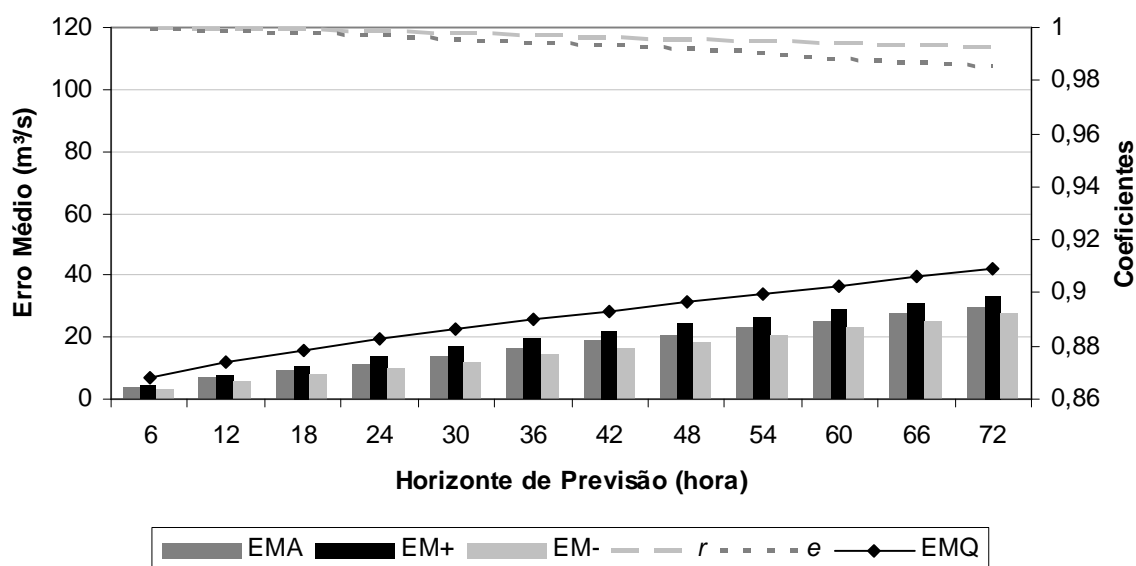


Figura 4.19: Erros médios e coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe, dos horizontes de previsão na B9 – sistema 3R-f1 com precipitação na previsão.

Houve grandes ganhos na qualidade dos resultados ao empregar a chuva média durante o período de previsão. Apesar de o *EM+* ter aumentado cerca de 50%, o *EMA* e o *EM-* reduziram praticamente pela metade. Quantitativamente o erro absoluto nos horizontes de 24, 48 e 72 horas foram respectivamente de 10, 20 e 30 m³/s. Ao contrário das previsões realizadas sem precipitação na previsão, o erro médio positivo foi maior que o erro médio negativo em todos os horizontes de previsão. Todavia ambos os erros apresentaram valores próximos ao do *EMA*, de modo que pode-se supor que previsões superestimadas ocorreram com mesma frequência das previsões subestimadas.

O *REMQ* apresentou reduções mais bruscas, sendo que na média dos horizontes, seu valor ficou em torno de 50% acima do erro médio absoluto, indicando que erros muito aquém do valor médio devem ocorrer com uma frequência relativamente baixa, em comparação da simulação sem precipitação no período de previsão. Os coeficientes de correlação e de Nash-Sutcliffe também confirmaram os ótimos resultados obtidos pelo sistema, sendo que a correlação linear não baixou de 0,99, enquanto que o outro coeficiente desceu a no máximo 0,98, no último horizonte de previsão.

Porém, novamente verifica-se uma influência do procedimento de ancoragem da vazão prevista ao último dado de vazão observada utilizado na simulação. Pois a medida que os horizontes de previsão aumentam, há um aumento dos erros e queda dos coeficientes. Entretanto não foi gerada uma simulação sem o processo de ancoragem, pois é pouco

provável que o sistema gerasse melhores previsões de 48 e 72 horas, se modelado sem total intervenção da vazão medida na exutória da bacia.

As séries de previsões do 3R-*f1* com chuva no período de previsão foram plotadas na Figura 4.20. Quanto à questão de prever um nível alto de vazão com bastante antecedência, nota-se que o patamar de 1800 m³/s atingido em 15 de setembro foi corretamente previsto em todos os horizontes de previsão. Assim, um alerta dado com três dias de antecedência seria efetivamente observado para a data prevista. Analisando as previsões para as duas subidas mais íngremes da hidrógrafa, percebe-se que a primeira subida no primeiro dia foi corretamente prevista em todos os horizontes de previsão. Entretanto nos dois dias seguintes houve uma mudança brusca dos resultados, e as previsões não indicaram corretamente a continuação da cheia.

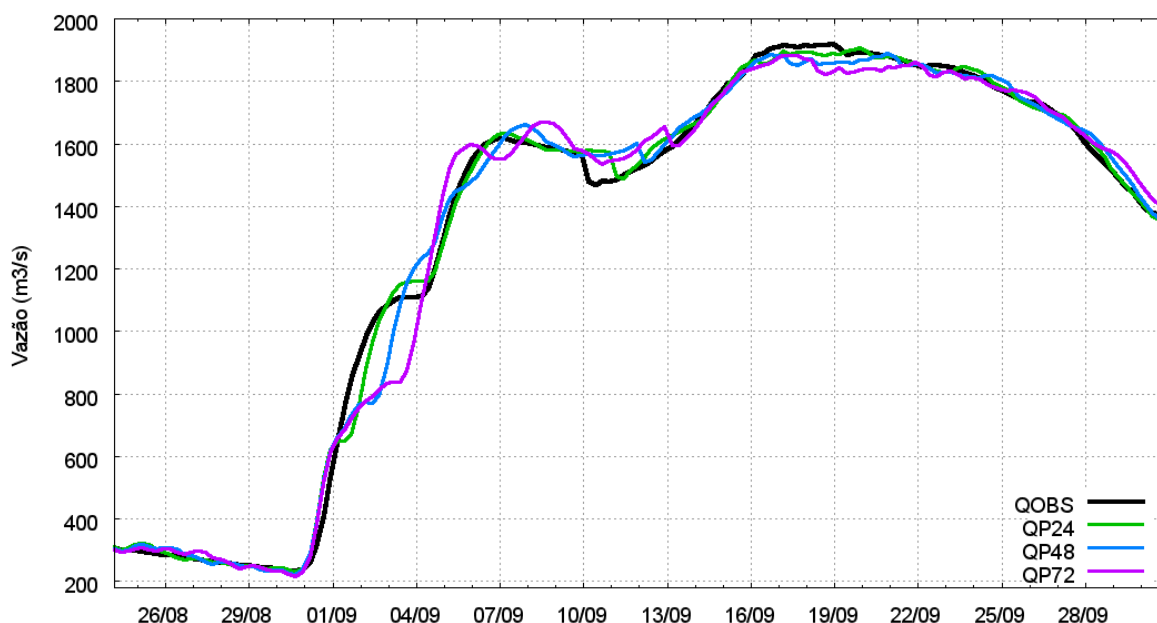


Figura 4.20: Vazões previstas na cheia de 2005 em União da Vitória – sistema 3R-*f1*, previsão com chuva observada.

Na subida que ocorreu entre os dias 5 e 7 de setembro, a previsão gerada no dia anterior foi bastante fiel ao observado. Porém as previsões realizadas a dois e três dias atrás já acusavam este aumento como ocorrendo antes ao observado, embora sejam previsões atrasadas do fim da primeira subida.

De modo geral, o emprego da chuva ocorrida no período de previsão melhorou os resultados das séries de previsões realizadas 48 e 72 horas, enquanto que a série de 24 horas não se beneficiou tanto. Este é um resultado bastante lógico, pois como a maior parte da vazão da B9 é oriunda da propagação da vazão à montante, é aceitável supor que boa parte do volume previsto para as próximas 24 horas seja originado da propagação do volume de água

presente no canal, no momento logo anterior à previsão. Só posteriormente a previsão se beneficiaria do escoamento proveniente da fase bacia.

O erro gerado em todas as previsões para os dois últimos dias da 1ª subida da hidrógrafa, ainda precisa ser esclarecido. A Figura 4.21 exibe a precipitação média, a vazão observada e a vazão contribuinte de montante, observada e modelada, para a sub-bacia B9 no período da cheia de 2005.

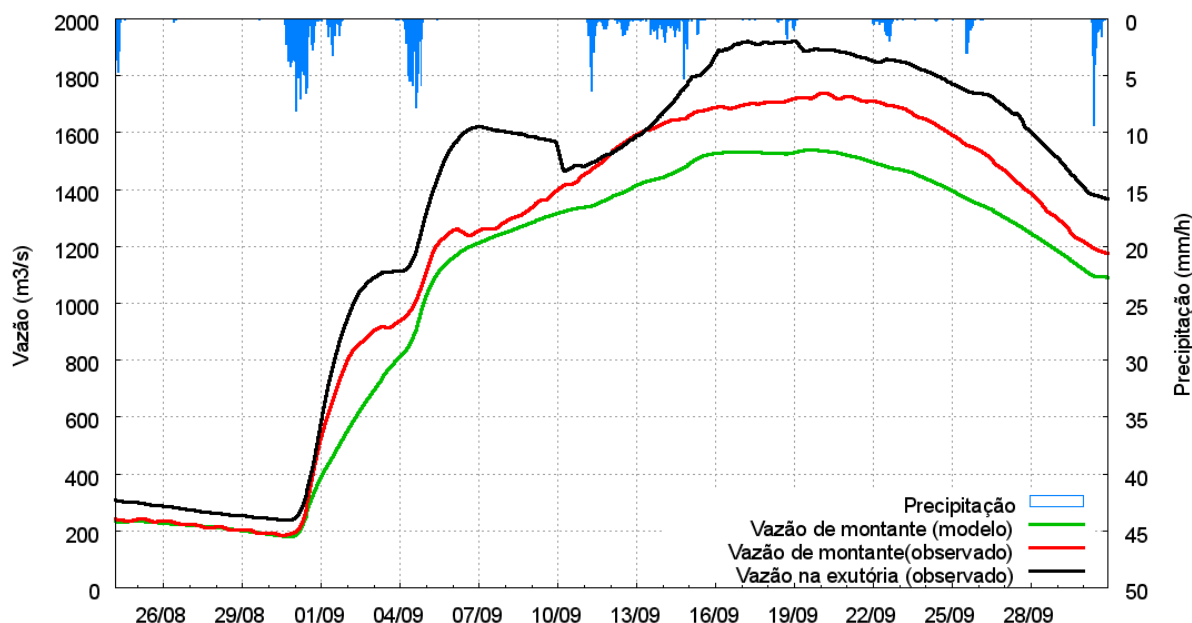


Figura 4.21: Precipitação média horária e vazões da exutória e de montante durante a cheia de 2005 em União da Vitória.

A diferença entre a resposta do modelo nas sub-bacias B8 e B5, que geram a vazão contribuinte da B9, e a vazão observada nestas sub-bacias, pode ser a causa da má estimativa da previsão da vazão em B9. A simulação hidrológica é realizada em um intervalo que vai desde 1500 horas antes do horário de previsão, até as 72 horas posteriores, que corresponde ao período previsto. Nestas 1500 horas, o *input* de vazão contribuinte é a soma das vazões observadas nas exutórias das sub-bacias que contribuem para a sub-bacia em questão. No período de previsão o dado de vazão contribuinte é gerado pelas previsões das vazões nas sub-bacias à montante. Assim, fazendo uma analogia, as simulações de previsões que representaram a cheia ocorrida em 2005, utilizaram como vazão de montante a série representada pela linha vermelha da Figura 4.21 no período anterior à previsão, e a linha verde no período da previsão.

Portanto, ao visualizar o comportamento das previsões ocorrida entre 31 de agosto e 4 de setembro, na Figura 4.20, pode-se supor que o bom desempenho nos primeiros dias esteja ligado a uma boa estimativa da conversão da precipitação ocorrida momentos antes e à baixa

diferença entre a vazão de montante observada e modelada. Porém, nas horas seguintes, a vazão contribuinte ficou bastante subestimada, o que implicou em previsões mais amenas em todos os sistemas de previsão analisados neste trabalho.

Da análise dos métodos de otimização automática de parâmetros, pode-se concluir qual rotina era melhor para qual modelo hidrológico. Na seqüência verificaram-se os resultados de quatro propostas de sistemas de previsão hidrológica, utilizando-se de um quinto sistema, semelhante ao modo operacional do SIMEPAR, para comparar os resultados. E encerrando este capítulo, foram investigados os principais fatores que contribuem na deterioração das séries de previsão de vazão. As conclusões sobre estes tópicos são apresentadas no capítulo seguinte, juntamente com pareceres relativos a vários outros aspectos deste trabalho.

5 Conclusões

O principal objetivo deste trabalho, que era de implementar um sistema semelhante ao atual sistema de previsão hidrológica em operação no SIMEPAR, o SISPSHI, foi alcançado por completo, de tal modo que fora possível também realizar comparações para o desempenho deste sistema (sistema de referência) frente a novas configurações da implementação computacional do sistema.

Quatro configurações deste sistema foram avaliadas, sendo que elas diferenciavam-se quanto ao modelo hidrológico e quanto à função objetivo utilizada na calibração dos parâmetros. Dentre estes quatro sistemas, os melhores índices estatísticos foram obtidos pelo que estava configurado para utilizar o modelo 3R com parâmetros calibrados com a função objetivo que pondera o erro médio e o desvio padrão da série de vazão calculada, função *f1*. Porém os resultados obtidos nos demais sistemas foram semelhantes ao do sistema 3R-*f1*. Tanto que muitas comparações foram realizadas sobre pequenos detalhes dos gráficos que representavam os resultados dos sistemas. Mas destas minuciosas comparações foi verificado que a utilização do modelo de Sacramento, e a calibração de parâmetros pela média da raiz do erro quadrático (função *f2*), deterioraram os resultados. Principalmente nos horizontes de previsão próximo de 72 horas.

Averiguando os resultados das previsões para a cheia ocorrida em setembro de 2005, notou-se que o sistema 3R-*f1* teve uma leve vantagem sobre o sistema de referência quanto à antecedência da previsão de um alto valor de vazão. Todavia ele foi pior na previsão de períodos em que houve um intenso aumento da vazão. Observou-se que tanto o sistema de referência quanto o 3R-*f1* apresentaram erros grandes e atrasos consideráveis nas previsões de maior horizonte, de dois e três dias de antecedência. Mas uma investigação sobre as causas destes erros apontou que a ausência de precipitação no período de previsão é o grande responsável pelos atrasos das previsões. No caso específico da cheia de 2005, também constatou-se que uma incoerência entre a série de vazão observada, em União da Vitória, e a série de vazão contribuinte para a sub-bacia B9 provou parte dos erros relacionados aos períodos de intenso aumento da vazão.

Este trabalho também proporcionou a coleção em um único documento de várias informações importantes para a avaliação sob aspectos hidrológicos da região de estudo. Dentro destes aspectos estão a caracterização do clima entre 1998 e 2006, a correlação do tipo

de solo e relevo com aspectos dos processos hidrológicos das sub-bacias, e a descrição da rede telemétrica, para monitoramento de dados hidro-meteorológicos, presente na região.

Posteriormente foi descrito um processo de identificação e preenchimento de falhas dos dados monitorados, que garantissem a consistência destes dados sobre os quais foram gerados os resultados deste trabalho. Contudo, para os dados de vazão, foi indispensável uma verificação visual das séries de dados, pois muitos períodos foram considerados de consistência duvidosa, preferindo substituí-los por interpolações entre dados consistentes próximos. Foram utilizados dois métodos de interpolação, uma simples interpolação linear e a interpolação *spline* cúbica. A combinação destes dois métodos garantiu vazões reconstituídas mais próximas ao que possivelmente seria observado. Pois se verificou qualitativamente, através de simples observação do gráfico da série de vazão, que havia situações em que um procedimento era mais recomendado que o outro.

Neste trabalho também foram avaliadas duas rotinas de calibração automática dos parâmetros dos modelos hidrológicos utilizados neste trabalho. A comparação da rotina *Simplex* com a rotina SCE-UA, avaliou suas capacidades em convergir para o melhor conjunto possível de parâmetros que satisfaçam uma determinada função objetivo. Em testes sobre séries sintéticas para uma bacia de cabeceira e para uma bacia interna, ambos os métodos foram eficazes na convergência ao conjunto de parâmetros utilizados para gerar as próprias séries sintéticas. Contudo a rotina SCE-UA apresentou uma maior necessidade de iterações para encerrar a busca.

Posteriormente, comparando os métodos para calibrações sobre as séries observadas, notou-se que a rotina *Simplex* apresentou melhores resultados para o modelo 3R, sendo ainda enaltecida pelo seu baixo custo computacional. Já para o modelo Sacramento, a rotina SCE-UA obteve melhores resultados, embora os resultados obtidos pelo *Simplex* não possam ser considerados como nitidamente inferiores ao do SCE-UA. Todavia como o modelo Sacramento é integrado de forma mais rápida que o 3R, a diferença entre o tempo gasto para realizar as calibrações pelo *Simplex* não é muito inferior ao gasto pela outra rotina.

5.1 Propostas para trabalhos futuros

De princípio já se tem em mente que possíveis melhorias no sistema de previsão podem ser obtidas através de quatro pontos:

- Utilização de modelos hidrológicos distribuídos, de modo que a espacialização da chuva sobre a bacia possa ser melhor usada para gerar respostas mais fieis ao comportamento temporal das séries de vazões;
- Utilização de um modelo de propagação separado para a vazão proveniente da fase bacia e a vazão proveniente das contribuições das bacias à montante;
- Utilização de estimativas de chuva média na bacia por um sistema híbrido que utiliza os dados dos postos pluviométricos conjuntamente com informações de radar e satélites;
- Emprego de modelos meteorológicos para previsão de chuva durante o período de previsão de vazão.

Estes dois últimos pontos merecem uma ênfase de importância, pois como foi investigado na seção 4.3, a estimação da precipitação exerce enorme influencia sobre os resultados de um sistema de previsão de vazão.

Dentre as comparações entre as rotinas de calibração automática, somente na etapa da calibração sobre a série de vazão observada da sub-bacia de Rio Negro, Figura 4.5 e 4.7, é que houve uma diferença notável. Portanto, talvez a utilização de métodos de otimização diferentes só seja mais perceptível em sub-bacias de cabeceira, ou em sub-bacias internas em que a vazão contribuinte de montante não seja muito relevante. Assim, a comparação entre o *Simplex* e o SCE-UA para a calibração das sub-bacias 1 a 5, poderia mostrar maiores diferenças entre estas rotinas.

Por fim, um outro ponto que necessita de verificação são os limites, máximos e mínimos, dos parâmetros dos modelos hidrológicos utilizados neste trabalho. As calibrações realizadas na seção 4.1 mostraram que, em várias ocasiões, alguns parâmetros convergiram para um dos limites permitidos. Assim, testes de calibrações com limites mais abrangentes deveriam ser realizados para verificar se haveriam ganhos significativos dos resultados das simulações.

Referências

- BAE, D. H.; GEORGAKAKOS, K. P.: **Hydrological modeling for flow forecasting and climate studies in large drainage basins**. Iowa City: The University of Iowa, 241 p. Relatório Técnico nº 360, 1992.
- BODMAN, G. B.; COLEMAN, E. A.: **Moisture and Energy Conditions During Downward Entry of Water into Soils**. Soil Science Society of America Proceedings 8, 116-122, 1994.
- BRAGA, S. M.: **Análise do potencial de utilização de sensores automáticos hidroambientais: Estudo de caso da bacia do rio Barigui**. Dissertação (Mestrado em Eng. de Recursos Hídricos e Ambientais) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- BRAGA, S. M.; DELARIZZA, R. A.; SANTOS, I.; FERNANDES, C. V. S.: **Avaliação da performance de pluviômetros de báscula: Técnicas para a realização de ensaios pluviométricos em laboratório**. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007.
- BURNASH, R. J. C.: **The NWS River Forecast System - catchment modeling**. Em: SINGH, V. P. (Ed.). Computer Models of Watershed Hydrology. Colorado, USA: Water Resources Publications, p. 311-366, 1995.
- BURNASH, R. J. C.; FERRAL, L.: **Conceptualization of the sacramento soil moisture accounting model**. Jul. 1996. Disponível em: http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/part2/_pdf/23sacsm.pdf. Acesso em: setembro, 2007.
- COLLISCHONN, W.; E 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. Disponível em: www.iph.ufrgs.br/corpo docente/tucci/publicacoes/otimizaiph2.PDF. Acesso em: março, 2007.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil: **Definição da planície de inundação da cidade de Governador Valadares. Relatório Final**. Belo Horizonte, 128 pg. Junho de 2004.
- CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T.: **Geomorfologia do Brasil**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.
- CUNHA, L. K.: **Sistemas avançados de previsão hidrológica e operação hidráulica em tempo real**. Dissertação (Mestrado em Eng. de Recursos Hídricos e Ambientais) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; E GUPTA, V.: **Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models**. Water Resources Research, v. 28, nº 24, p. 1015-1031, 1992.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; E GUPTA, V.: **Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models**. Journal of Hydrology, nº 158, p. 265-284, 1994.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária: **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informações; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.

FLEMING, G.: **Computer Simulation Techniques in Hydrology**. 1ª ed. New York: American Elsevier Publishing Company, Inc, 1975.

GAN, Y. T.; DLAMINI, M. E.; E BIFTU, G. F.: **Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling**. Journal of Hydrology, nº 192, p. 81-103, 1997.

GEORGAKAKOS, K. P.; BRAS, R. L.: **A statistical linearization approach to real time nonlinear flood routing**. Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics Report nº 256. Cambridge: MIT. 1980

GEORGAKAKOS, K. P. *et al.*: **On improved operational hydrologic forecasting of streamflow**. IIHR Report no. 525. Iowa City: University of Iowa. 1988.

GONÇALVES, J. E.; GUETTER, A. K.; ARAÚJO, A.: **Sistema de Previsão e Simulação Hidrológica do Iguaçu em Escala Horária – SISPSHI-HOR: Análise dos Dados Hidrometeorológicos Horários para Calibração do Modelo Hidrológico**. Relatório Técnico nº 014/2003. Curitiba, SIMEPAR, 2003.

GREEN, D. W.; DABRI, H.; WEINANG, C. F.; PRILL, R.: **Numerical Modeling of Unsaturated Groundwater Flow and Comparison of the Modeling of Unsaturated Groundwater Flow and Comparison of the Model to a Field Experiment**. Water Resources Research 6, 862-874, 1970.

GUETTER, A. K. *et al.*: **Hydrologic applications of satellite data: 2. Flow simulation and soil water estimates**. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, nº D21, 26.527-26.538. 1996.

HANKS, R. J.; KLUTE, A.; BRESTER, E.: **A Numerical Method for Estimating Infiltration, Redistribution, Drainage and Evaporation of Water from Soil**. Water Resources Research 5, 1064-1069, 1969.

HOLLAND, J. H.: **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

KRAUSKOPF NETO, R.: **Atualização de modelos chuva-vazão-propagação com estimadores de estado**. Dissertação (Mestrado em Eng. de Recursos Hídricos e Ambientais) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

KRAUSKOPF NETRO, R.: **Descrição e orientações de calibração dos modelos hidrológicos chuva x vazão sacramento e sacramento modificado**. Divisão de estudos hidrológicos e energéticos, Itaipu Binacional, 2006.

LINSLEY, R. K.; CRAWFORD, N. H.: **Computation of a synthetic streamflow record on a digital computer**. Pub. nº 51, International Association of Scientific Hydrology, p. 526-538, 1960.

MAIDMENT, D. R.: **Handbook of hydrology**. 1ª ed. McGraw-Hill, Inc., 1992.

NELDER, J. A.; E MEAD, R.: **A simplex method for function minimization**. Computer Journal, v. 7, p. 308-313, 1965.

NWS – National Weather Service: **Fortran routine of SAC-SMA**. Disponível em: <http://www.nws.noaa.gov/iao/sacsma/fland1.f>. Acesso em: julho, 2007.

MACHADO, F. W.: **Modelagem chuva-vazão mensal utilizando redes neurais artificiais**. Dissertação (Mestrado em Eng. de Recursos Hídricos e Ambientais) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MINE, M. R. M.: **Modelos estocásticos lineares para previsões de cheia em tempo real**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1984.

MINE, M. R. M.: **Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias**. Tese (Doutorado em Eng. de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ONS (Operador Nacional do Sistema). **Procedimentos de rede – Módulo 9 – Hidrologia Operacional**. Disponível em: www.ons.org.br/ons/procedimentos/index.htm. Acesso em: 10 dez. 2003.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; Flannery, B. P.: **Numerical recipes in fortran 77, the art of scientific computing**. 2ª ed. Cambridge University Press, p. 107-110, 402-406, 1992.

PRICE, W. L.: **Global optimization algorithms for a CAD workstation**. J. Optim. Theory Appl., 55, 133-146, 1987.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V.: **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf. Acesso em: 06 ago. 2003

SIMON, E.; DISKIN, M. H.: **A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models**. Journal of Hydrology, nº 34, p. 129-149, 1977.

SINGH, V. P.: **Computer Models of Watershed Hydrology**. Colorado, USA: Water Resources Publications, 1995.

THIMOTTI, T. C. M.: **Concepção e avaliação de um sistema de previsão de vazões de longo termo**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

TUCCI, C.E.M.; CAMPANA, N.: **Simulação distribuída com IPH II, Nova versão**. In: X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Gramado. Anais, v.3, p. 495-504. 1993.

TUCCI, C.E.M.; VILLANUEVA, A. O.: **Controle de enchentes das cidades de União da Vitória e Porto União**. Comissão Regional Permanente de Prevenção contra Enchentes do Rio Iguaçu, CORPERI, 1997.

TUCCI, C. E. M.: **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS, p. 232-235, 1998.

TUCCI, C.E.M.; **Hidrologia, ciência e aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS / ABRH, 2002.

VALENÇA, M.: **Aplicando redes neurais – Um guia completo**. 1ª ed. Olinda: Editora Livro Rápido – Elógica, 2005.

YAPO, P. O.; GUPTA, V.; SOROOSHIAN, S.: **Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data**. Journal of Hydrology, nº 181, p. 23-48, 1996.