



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CCT
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – DCA
PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO

APLICAÇÃO DO MODELO GR4J À BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO PARAÍBA EM CARAÚBAS

PATRÍCIA CORDEIRO DE ARAÚJO

CAMPINA GRANDE-PB

Maio de 2005

PATRÍCIA CORDEIRO DE ARAUJO

**APLICAÇÃO DO MODELO GR4J À BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO PARAÍBA EM CARAÚBAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do Grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: METEOROLOGIA DE MESO E GRANDE ESCALA

ORIENTADOR: PROF. DR. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA



A663a Araújo, Patrícia Cordeiro de.
Aplicação do modelo GR4J à bacia hidrográfica do rio
Paraíba em Caraúbas / Patrícia Cordeiro de Araújo. -
Campina Grande, 2005.
87 f.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia,
2005.
"Orientação : Prof. Dr. Francisco de Assis Salviano de
Sousa".
Referências.

1. Bacia Hidrográfica. 2. Modelos Chuva-Vazão. 3.
Dissertação - Meteorologia. I. Sousa, Francisco de Assis
Salviano de. II. Universidade Federal de Campina Grande -
Campina Grande (PB). III. Título

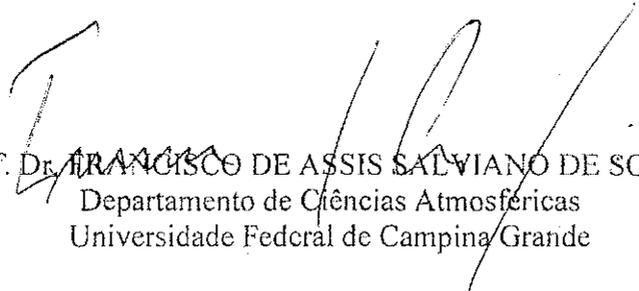
CDU 551.511.32(043)

PATRÍCIA CORDEIRO DE ARAÚJO

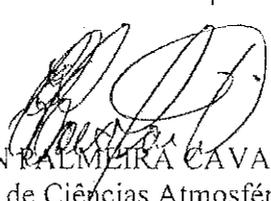
APLICAÇÃO DO MODELO GR4J À BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA EM
CARAÚBAS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/05/2005

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA
Departamento de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Departamento de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ALAIN-MARIE BERNARD PASSERAT DE SILANS
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal da Paraíba

DEDICATÓRIA

A meus queridos pais José Martins e Socorro,
as minhas irmãs Pollyana, Diana e Deise,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por Sua vida em mim, Sua fidelidade, Seu permanente cuidado e imenso amor.

Aos meus pais e irmãs, pelo apoio, carinho e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Aos amigos e irmãos da Igreja Metodista de Campina Grande que sempre tiveram uma palavra de incentivo durante esse trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa pela ajuda e compreensão ao longo de todo trabalho.

Aos professores do Departamento de Ciências Atmosféricas pela atenção e carinho com que sempre me trataram, em especial aos professores Enio Pereira de Souza e Ramano Rao.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro durante a vigência do Curso.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Atmosféricas pelo auxílio, em especial Divanete Cruz Rocha Farias, pela atenção, compreensão e palavras de Deus pra mim.

Aos colegas do curso, em especial Janne, Janduy e Sérgio.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração desta dissertação.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS.....	iv
SUMÁRIO.....	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Modelos matemáticos	4
2.2 Modelos hidrológicos	5
2.2.1 Classificação dos modelos	8
2.2.2 Modelos chuva-vazão	8
2.2.2.1 Modelo SSARR	11
2.2.2.2 Modelo Stanford IV	12
2.2.2.3 Modelo IPH	13
2.2.2.4 Modelo SMAP	13
2.2.2.5 Modelo TOPMODEL	14
2.2.2.6 Modelo ARNO	15
2.2.2.7 Modelo GR4J	15
2.2.2.8 Modelo KWM	16
2.2.2.9 TANK Model	17
2.2.2.10 Modelos do Centro de Engenharia Hidrológica (HEC).....	17
2.2.2.11 Modelo MODHAC	18
2.2.2.12 Modelo AÇUMOD	20
2.2.2.11 Modelos baseados em Sistemas de regras difusas.....	21
2.3 Discussão sobre algumas características dos modelos chuva-vazão.....	22
2.3.1 Sobre a resolução espacial.....	23

2.3.2	Sobre super-parametrização	24
2.3.3	Sobre assimilação de umidade	26
2.4	Desempenho de modelos hidrológicos	27
2.5	Aumento de desempenho do Modelo GR3J para o GR4J	31
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	Localização da bacia em estudo	33
3.2	Estrutura do modelo chuva-vazão GR4J.....	37
3.3	Equações do modelo chuva-vazão GR4J	39
3.3.1	Determinação da chuva total e da evapotranspiração potencial (EP).....	39
3.3.2	Produção armazenada	40
3.3.3	Troca de água na bacia.....	42
3.3.4	Reservatório de roteamento não-linear	43
3.3.5	Vazão total.....	44
3.4	Inicialização do sistema	48
3.5	Calibração do Modelo.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
	ANEXOS.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Principais componentes do ciclo hidrológico.....	1
Figura 2	Possível metodologia para seleção de modelos chuva-vazão.....	7
Figura 3	Estrutura geral de um modelo chuva-vazão.....	9
Figura 4	Localização da bacia no Estado da Paraíba.....	34
Figura 5	Mapa da bacia hidrográfica a montante da estação fluviométrica de Caraúbas.....	35
Figura 6	Curvas-S das hidrógrafas unitárias (a) UH1 e (b) UH2.....	37
Figura 7	Diagrama do modelo chuva-vazão GR4J.....	38
Figura 8	Ilustração do fluxo de saída Q_t do reservatório de roteamento como função do nível do estoque depois da entrada de Q_9	44
Figura 9	Percentual de 0,3 das distribuições dos resultados na simulação para 235 estruturas do modelo com 0 – 6 parâmetros (a junção das curvas mostra a melhor performance) (a) para o critério CR1 (b) para o critério CR3 (c) para o critério CR5.....	46
Figura 10	Valores diários de precipitação em mm para cada posto da bacia de Caraúbas..	54
Figura 11	Hietograma para o período de 1996-1999.....	54
Figura 12	Evolução da taxa de reabastecimento do reservatório de produção usando o primeiro critério de Nash-Sutcliffe (1996-1999).....	55
Figura 13	Evolução da taxa de reabastecimento do reservatório de roteamento não-linear (1996-1999) usando o primeiro critério de Nash-Sutcliffe.....	56
Figura 14	Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1996-1999) para o primeiro critério de Nash-Sutcliffe.....	57
Figura 15	Gráfico da correlação entre vazão observada e vazão simulada (1996-1999) para o primeiro critério de Nash-Sutcliffe.....	57
Figura 16	Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1996-1999) para o segundo critério de Nash-Sutcliffe.....	58
Figura 17	Gráfico da correlação entre vazão observada e vazão simulada (1996-1999) para o segundo critério de Nash-Sutcliffe.....	59
Figura 18	Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1996-1999) para o terceiro critério de Nash-Sutcliffe.....	60

Figura 19 Gráfico da correlação entre vazão observada e vazão simulada (1996-1999) para o terceiro critério de Nash-Sutcliffe.....	60
Figura 20 Histograma de Frequência da precipitação diária dos seis postos localizados na bacia de Caraúbas	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Desempenho médio dos modelos GR3J e GR4J e estimativa da melhoria da última versão	32
Tabela 2	Dados dos postos pluviométricos da bacia de Caraúbas.....	36
Tabela 3	Lista dos parâmetros do modelo chuva-vazão GR4J.....	47
Tabela 4	Valores médios dos parâmetros do modelo com intervalos de confiança de aproximadamente 80%.....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

$CR1$	1º critério de Nash-Sutcliffe
$CR2$	2º critério de Nash-Sutcliffe
$CR3$	3º critério de Nash-Sutcliffe
$CR4$	4º critério de Nash-Sutcliffe
EC	Erro cumulativo médio
EP	Evapotranspiração potencial
Em	Evapotranspiração total
F^2	Índice de discordância
F_0^2	Variância inicial
F	Termo de troca de água com a bacia
M	Mês onde os valores de R_o e S_o são calculados
N	Número de vazões diárias registradas
NPX	Número de parâmetros otimizados
NH	Número máximo de ordenadas em UH1
P	Precipitação
P_n	Chuva total
P_s	Parte da chuva total que vai para o estoque de produção
$Perc$	Percolação
Q	Descarga observada
Q'	Descarga calculada
\bar{q}	Média dos q 's observados
Q	Vazão total
Q_r	Componente de fluxo de saída do reservatório de nível R
Q_d	Componente de fluxo
Q_{obs}	Vazão registrada
Q_{cal}	Vazão simulada

$\overline{Q_{obs}}$	Média das vazões diárias registradas
R^2	Calcula a eficiência do modelo
r^2	Calcula a eficiência de parte do modelo
RMSE	Raiz quadrada do erro médio quadrático
S	Nível do estoque de produção
$UH1$	Hidrógrafa unitária 1
$UH2$	Hidrógrafa unitária 2
$V(1)$	Nível do reservatório de produção (mm)
$V(2)$	Nível do reservatório de roteamento (mm)
$V(3) \text{ até } V(2+NH)$	Níveis nos reservatórios correspondente às hidrógrafas unitárias $UH1$ (mm)
$V(3+NH) \text{ até } V(2+3.NH)$	Níveis nos reservatórios correspondente às hidrógrafas unitárias $UH2$ (mm)
x_1	Capacidade máxima do estoque de produção (mm)
x_2	Coefficiente de troca de água (mm)
x_3	Capacidade do reservatório de roteamento não-linear (mm)
x_4	Tempo base da hidrógrafa unitária (dia)
$X(NPX+1) \text{ até } x(NPX+NH)$	Ordenadas da hidrógrafa unitária $UH1$
$X(NPX+NH+1) \text{ até } x(NPX+3.NH)$	Ordenadas da hidrógrafa unitária $UH2$

RESUMO

A modelagem do processo chuva-vazão tem sido objeto de pesquisa por muito tempo, tendo sido desenvolvidos, até hoje, inúmeros modelos. Dos primeiros modelos baseados em simples equações empíricas até os complexos modelos atuais, esses modelos diferem em muitos aspectos, tais como, a maior ou menor habilidade para reproduzir as vazões observadas (medidas) e a sua facilidade de aplicação. Dentre as principais motivações para o desenvolvimento de modelos chuva-vazão pode-se citar a previsão de eventos extremos, a extensão de séries de vazão, dimensionamento, previsão em tempo real, bem como avaliação do uso do solo. Neste trabalho foi aplicado o modelo chuva-vazão GR4J (*Génie Rural à 4 paramètres Journalier*) concentrado, em base diária, às bacias hidrográficas do rio Paraíba, em Caraúbas e do Rio do Peixe, localizadas nas regiões do Cariri e do Sertão paraibano, respectivamente. O objetivo principal foi o de ajustar, verificar e validar este modelo para estimativa de vazões com base no conhecimento da chuva e, assim, utilizá-lo em bacias com condições climáticas similares, para estimar dados de vazões inexistentes. Foram obtidos resultados satisfatórios quando o modelo foi aplicado à bacia do Rio Paraíba, em Caraúbas para o período de 1996-1999. Nesse ajuste o valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe ultrapassou 97%, porém quando o modelo foi ajustado para a bacia do Rio do Peixe os resultados não foram satisfatórios visto que os coeficientes de Nash-Sutcliffe foram inferiores a 70%.

ABSTRACT

The rainfall-runoff modeling process has been an object of research for a long time and several models have been developed so far. From the simplest models based on empirical equations to the modern complex ones, these models differ in many aspects, among which are the greater or lower capacity to reproduce the observed (measured) rainfall runoff values and their ease of use. Prediction of extreme events, extension of runoff series, dimensioning, real-time prediction as well as evaluation of the use of land are found to be some of the main reasons for the development of rainfall-runoff models. This work was based on the GR4J (*Génie Rural à 4 paramètres Journalier*) rainfall-runoff model, concentrated, on a daily base at the hydrographic basins of the Caraúbas and Rio do Peixe Rivers, located at the Cariri and Sertão regions of the state of Paraíba, respectively. The main objective was to adjust, verify and validate this model for rainfall runoff prediction based on the knowledge about rainfall and use it in basins with similar climatic conditions to estimate inexistent runoff data. Satisfactory results were obtained when the model was applied to the Caraúbas River basin for the 1996-1999 period, at this adjustment the Nash-Sutcliffe coefficient value was higher than 97%, however results were not found to be satisfactory when the model was adjusted for the Rio do Peixe basin, in which the Nash-Sutcliffe coefficient presented values below 70%.

1 INTRODUÇÃO

Um modelo pode ser considerado como uma representação matemática simplificada da realidade, que auxilia no entendimento dos processos que estão envolvidos nessa realidade. Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso do solo e a prever alterações futuras nos ecossistemas.

Um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre. O objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos é a bacia hidrográfica ou bacia de drenagem, isso se deve ao fato da simplicidade que oferece na aplicação do balanço hídrico (VILLELA & MATTOS, 1975).

Para melhor entender os modelos hidrológicos, é necessário, então, analisar os componentes envolvidos no ciclo hidrológico. Um esquema dos principais componentes envolvidos no referido ciclo é exibido na Figura 1.

Do ponto de vista hidrológico o solo pode ser entendido como um reservatório, cujo volume de água armazenado pode ser bastante variável no tempo e no espaço, além de depender de vários outros fatores. Computando-se todas as entradas e saídas do sistema resolve-se o balanço hídrico no solo.

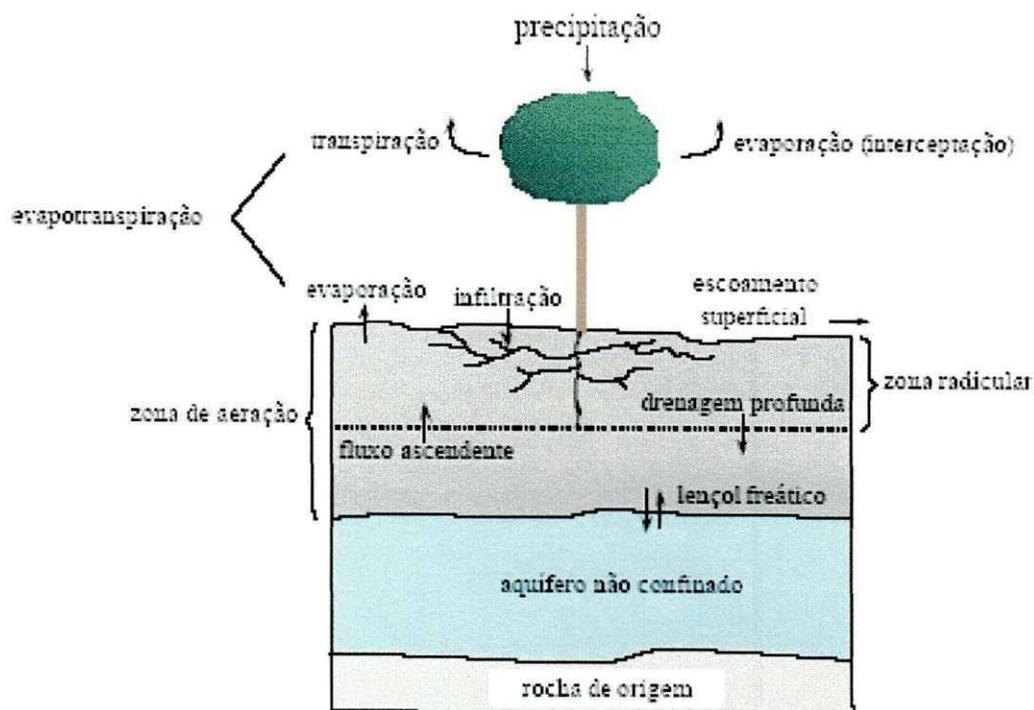


Figura 1 Principais componentes do ciclo hidrológico

A principal entrada de água no sistema é feita através da precipitação. Considerando-se a existência de cobertura vegetal sobre o solo, a água da chuva poderá ser primeiramente interceptada pelo dossel (a água poderá também atingir diretamente o solo ou corpos d'água). Essa água interceptada pode então ser evaporada, por outro lado, a água que chega até a superfície do solo, parte é infiltrada (entra no perfil de solo) e parte pode escoar superficialmente. A água infiltrada irá se redistribuir ao longo do perfil do solo. Simultaneamente à entrada de água no solo, a água pode estar sendo evaporada pela superfície ou retirada do solo pelas raízes e transpirada pelas folhas do dossel. O processo que envolve a perda de água do sistema pela evaporação do solo e transpiração das plantas é denominado evapotranspiração. A água ainda pode ser perdida por drenagem profunda (além da zona radicular) e em algumas situações específicas pode haver um fluxo

ascendente de água no solo. Em terrenos com declive pode ocorrer também um fluxo lateral subsuperficial devido à ação da gravidade.

A previsão de vazão é um dos principais desafios relacionados ao conhecimento integrado da climatologia e hidrologia. O conhecimento antecipado da vazão de uma bacia hidrográfica é usado mais comumente para previsão de cheias, para previsão de umidade de solo agricultável, para prever os níveis de água de um rio navegável e para o conhecimento da disponibilidade hídrica no abastecimento de água para irrigação e produção de energia elétrica (TUCCI *et al.* 2002).

Vários modelos hidrológicos estão em uso atualmente, modelos distribuídos ou concentrados, conceituais ou empíricos, discretos ou contínuos, etc. O modelo GR4J (*Génie Rural à 4 paramètres Journalier*) foi escolhido dentre os vários modelos existentes hoje por ser um modelo conceitual de formulação muito simples e onde não há exigência de um método complexo para otimização, além de ser um modelo que utiliza dados diários de precipitação e evapotranspiração, e essas variáveis estão disponíveis em nossa região.

O GR4J é um modelo concentrado chuva-vazão que considera a bacia hidrográfica como um sistema físico que tem como entrada os valores da variável precipitação e da evapotranspiração e como saída os valores da variável vazão. O objetivo principal deste trabalho é o de ajustar, verificar e validar o modelo hidrológico GR4J às bacias hidrográficas de Caraúbas e Rio do Peixe, localizadas no Cariri e Sertão do Estado da Paraíba, respectivamente, a fim de oferecer uma alternativa para se estimar vazões com base no conhecimento da chuva, bem como fazer uso do modelo em bacias com condições climáticas similares para estimar dados de vazão inexistentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Modelos matemáticos

Nos últimos anos, os modelos matemáticos têm tido uma significativa importância em todas as áreas do conhecimento humano, no campo científico e dos recursos naturais em geral, como na meteorologia, hidrologia, agricultura, ecologia, erosão, biologia, astronomia, medicina, física, etc.

A importância dos modelos está, entre outros aspectos, na simulação e previsão dos fenômenos físicos, sobretudo os de frequência rara, a curto, médio e longo prazos. Através dos modelos pode-se obter relações de causa-efeito, sem haver realizado interação com os sistemas reais. Os modelos matemáticos apresentam algumas vantagens no seu uso, entre elas, estes proporcionam respostas quantitativas dos fenômenos físicos, ajudando a interpolação, simulação e previsão dos mesmos, ajudam na definição de metodologias, categorizam a influência das variáveis que participam do modelo e sugerem prioridades na investigação do problema.

A construção e o desenvolvimento de um modelo matemático deve ser realizado seguindo algumas etapas, quais sejam: (i) identificação, onde é realizada uma análise da estrutura do modelo e definição do número de variáveis a ser em utilizadas, (ii) calibração diz respeito ao processo de encontrar valores para parâmetros através da

comparação entre os dados reais e os dados simulados. A calibração é um típico processo de otimização onde a função objetivo é reduzir as diferenças entre os dados reais e os simulados, (iii) verificação e análise de comportamento é uma análise qualitativa que visa verificar o quanto o comportamento do modelo está em conformidade ao do sistema real, (iv) análise de sensibilidade consiste no estudo da variação da saída do modelo quando um ou vários parâmetros variam, (v) a validação consiste em verificar se a saída do modelo se encontra suficientemente próximo dos valores observados reais. Um aspecto fundamental da validação é que ela deve ser efetuada com um conjunto de dados totalmente independente do utilizado na calibração.

2.2 Modelos hidrológicos

O modelo hidrológico pode ser considerado como uma ferramenta desenvolvida para representar o comportamento da bacia hidrográfica, prever condições futuras e/ou simular situações hipotéticas no intuito de avaliar impactos de alterações. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que muito tem contribuído para o desenvolvimento de um grande número de modelos (OLIVEIRA, 2003). Esses, no entanto, se diferenciam entre si em função dos objetivos a serem alcançados, dos dados que utilizam e das prioridades que são estabelecidas na representação dos processos físicos.

Os processos de precipitação, evaporação, infiltração, escoamento em rios, dependem de um grande número de variáveis que nem sempre podem ser medidas. Nenhuma metodologia substitui as medições de informações que permitam aferir os parâmetros do modelo utilizado. Quanto menor for a disponibilidade de informações, maiores serão as incertezas dos prognósticos, tanto que uma das limitações na utilização de

modelos hidrológicos é a disponibilidade de dados. No aspecto de quantidade, muitas séries de dados hidrológicos apresentam falhas, quanto à qualidade, muitos dados são mal medidos ou mal observados.

A escolha do modelo hidrológico, a ser utilizado na solução de problemas relacionados à gestão de recursos hídricos, depende de uma avaliação preliminar envolvendo os seguintes aspectos: objetivos do estudo para qual o modelo vai ser utilizado; características climáticas e físicas da bacia e do rio; disponibilidade de dados; e familiaridade da equipe de projeto com o modelo. PERRIN *et al.* (2002) apresentaram uma possível metodologia para seleção de modelos hidrológicos, especificamente os modelos chuva-vazão. O esquema geral é mostrado na Figura 2.

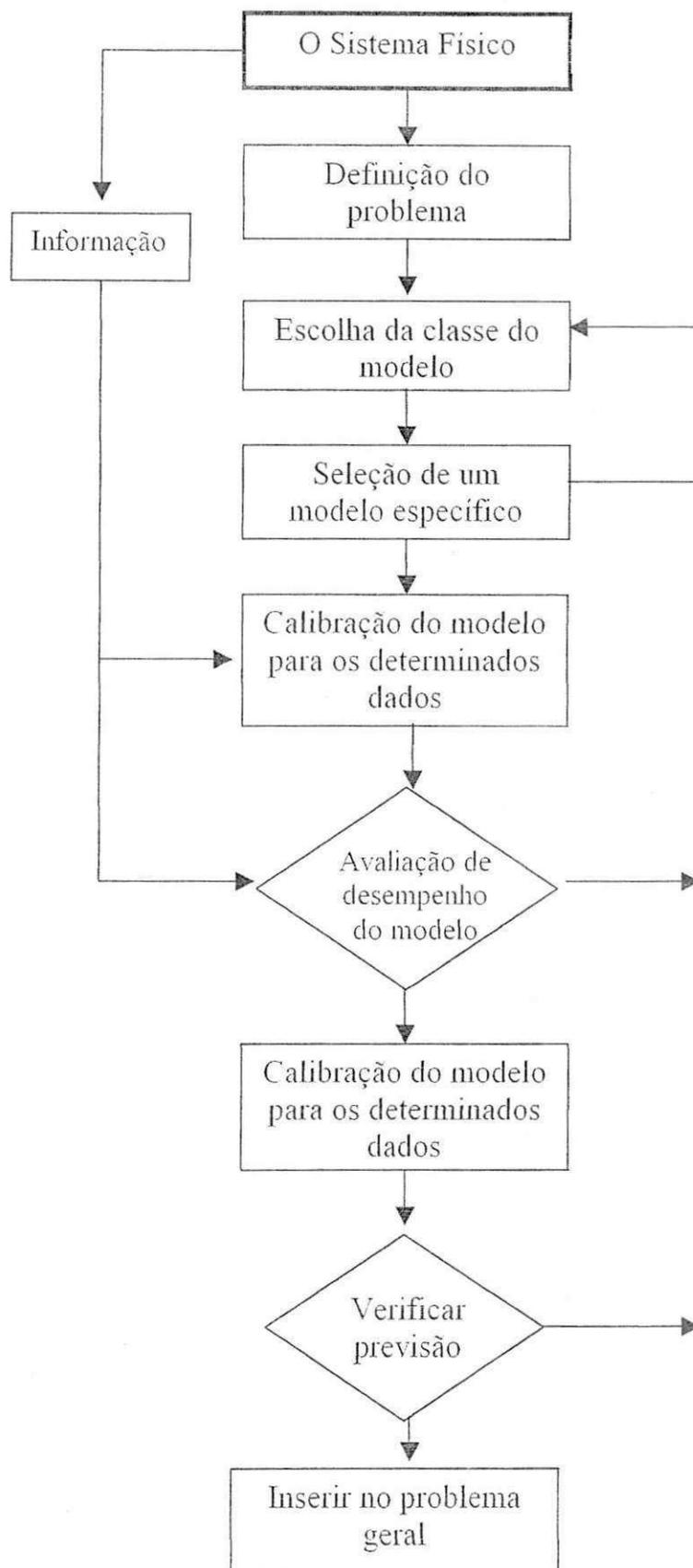


Figura 2 Possível metodologia para seleção de modelos chuva-vazão
(Fonte: PERRIN, 2002)

2.2.1 Classificação dos modelos

O comportamento de um sistema pode ser classificado segundo vários critérios, entre eles está o que se pode chamar de memória do sistema, que é o quanto uma entrada pode afetar o estado atual do mesmo, e a sua não-linearidade, que é uma característica que pode dificultar a representação do processo chuva-vazão através de modelos matemáticos. Outro critério importante é o que caracteriza o sistema como discreto (processos se dão em intervalos discretos) ou contínuo (processos contínuos no tempo). Outra classificação importante é a que nomeia um sistema como concentrado ou distribuído, um sistema concentrado (*lumped*) apresenta parâmetros e variáveis que variam somente em função do tempo, quando há variação também no espaço o sistema é dito distribuído. Modelos que apresentam o conceito de probabilidade na sua formulação são denominados estocásticos e quando esse conceito é ignorado e o modelo segue uma lei definida, diferente da lei das probabilidades, o modelo é dito determinístico. Outro conceito importante é o de conceitual e empírico, quando as funções utilizadas na elaboração de um modelo levam em consideração os processos físicos ele é considerado conceitual, já os modelos empíricos são aqueles do tipo “caixa preta”, que ajustam os valores calculados aos dados observados por meio de funções empíricas, que não estão relacionadas com os fenômenos físicos.

2.2.2 Modelos chuva-vazão

Registros de vazão no curso d'água são necessários para desenvolvimento de projetos na área de dimensionamento de reservatórios, navegação, qualidade de água e etc., todavia, a coleta de dados históricos como precipitação, evaporação e, vazão líquida e

sólida nem sempre é satisfatória e a implantação de rede de coleta nem sempre é possível. Portanto, para que esses e outros estudos possam ser realizados, faz-se necessário desenvolver técnicas que utilizem com eficiência os escassos dados existentes. Uma dessas técnicas é a utilização de modelos ditos chuva-vazão (*rainfall-runoff*) que procuram simular parte do ciclo hidrológico, ou seja, através da precipitação conhecida na bacia hidrográfica, o modelo simula a vazão na seção principal. No uso desses modelos há quatro fases distintas: a escolha do modelo, calibragem de seus parâmetros, validação do modelo calibrado e aplicação. Na fase de calibragem, são ajustados os parâmetros do modelo em uso e as séries de vazões observadas comparadas com as séries estimadas. Pressupondo-se familiaridade com o modelo escolhido, há ainda diversos fatores que pode influenciar numa boa representação do modelo pode-se citar: a qualidade dos dados disponíveis, a eficiência do processo de calibragem e o conhecimento da região onde será aplicado o modelo. Os modelos chuva-vazão devem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, sub-superficial e na calha do rio. A Figura 3 mostra um esquema geral de um modelo chuva-vazão.

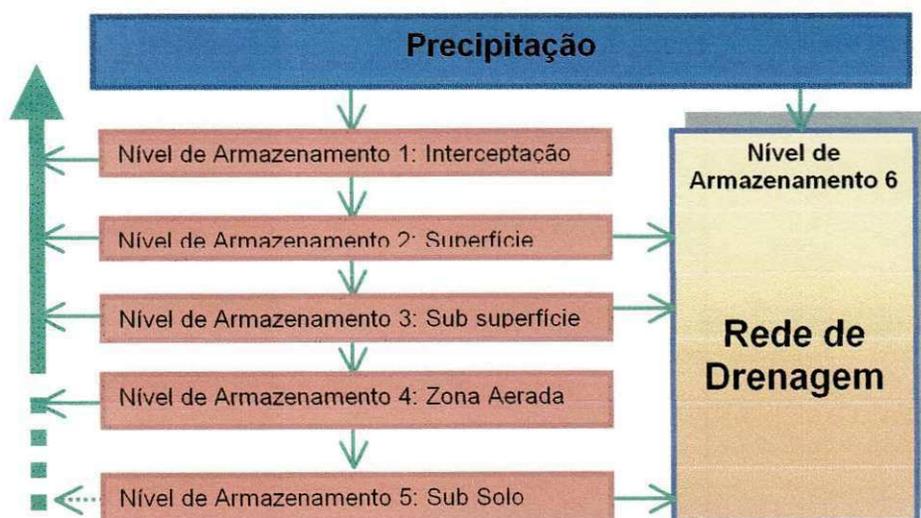


Figura 3 Estrutura geral de um modelo chuva-vazão

As principais dificuldades encontradas nos modelos chuva-vazão se devem a grande variabilidade espacial das precipitações, às incertezas dos dados de evaporação, o fator da escala entre processos pontuais e espaciais, e a homogeneidade dos parâmetros. Além disso, há simplificações na consideração da heterogeneidade física da bacia e da simultaneidade com que os fenômenos acontecem, comprometendo os resultados obtidos pelos modelos e acarretando com isso, a introdução de desvios e erros. Esta classe de modelos é denominada de semiconceitual porque mistura aspectos conceituais dos processos e equações empíricas que se ajustam ao comportamento observado. Os modelos semiconceituais podem oferecer bons resultados, mas necessitam de um bom treinamento do usuário no entendimento do modelo escolhido, para que não haja tendenciosidade no seu uso.

Com a disponibilidade de computadores no final dos anos de 1950, houve um acelerado desenvolvimento de modelos, já que assim, podiam utilizar uma grande quantidade de dados coletados em substituição aos métodos de indicadores estatísticos utilizados até então. Estes modelos, ditos semiconceituais (na época ditos conceituais), de transformação precipitação-vazão, representam os principais processos desta parte do ciclo hidrológico, utilizando funções empíricas e a equação da continuidade para cada uma das partes (TUCCI, 1998). Nas últimas décadas os modelos hidrológicos se desenvolveram em dois sentidos: modelos para grandes bacias, que tratam de forma empírica a distribuição dos parâmetros em áreas de grande extensão e modelos para pequenas bacias, que buscam representar com precisão, e de forma distribuída, os processos hidrológicos.

Exemplos conhecidos dos primeiros modelos chuva-vazão foram o SSARR e Stanford IV. Outros modelos surgiram posteriormente com modificações dos algoritmos básicos destes e de outros desenvolvidos principalmente por universidades.

O grande número de modelos surgidos deixou os hidrólogos um tanto quanto confusos, já que eles não tinham familiaridade com computadores e questionavam as vantagens de um modelo sobre o outro.

Uma revisão sem pretender esgotar o assunto sobre alguns dos principais modelos chuva-vazão surgidos e que ainda são largamente utilizados é apresentada a seguir, não se pretendendo, contudo, fazer um detalhamento sobre cada um, apenas enfatizar suas principais características.

2.2.2.1 Modelo SSARR

O SSARR (*Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*) foi desenvolvido a partir de 1956, pelo *U. S. Corps of Engineers, North Pacific Division*, com o objetivo de servir à análise de sistemas de planejamento, projeto e operações de obras hidráulicas. Posteriormente, em colaboração com a *Cooperative Columbia River Forecasting Unit*, foi modificado para permitir previsões diárias necessárias à operação e gerenciamento do sistema. Sua aplicação inicial foi na modelagem do Rio Columbia, nos Estados Unidos, em (ROCKWOOD, 1958 *apud* TUCCI, 1998). É um modelo conceitual chuva-vazão, contínuo no tempo, com parâmetros que são ajustados por calibrações e é utilizado principalmente para grandes bacias. É um modelo determinístico de simulação que permite sintetizar vazões a partir de dados de chuva, através de algoritmos que representam as várias fases do ciclo hidrológico. O modelo SSARR é formado por três módulos básicos, o primeiro representa a bacia, onde os deflúvios são determinados com base nos dados climatológicos e em suas características físicas. As bacias são subdivididas em áreas hidrológicamente homogêneas. O módulo seguinte é um módulo fluvial que simula a propagação das hidrógrafas nas calhas fluviais e nos reservatórios ou lagos

naturais. A outra parte do modelo é para reservatórios de regularização, onde as vazões efluentes podem ser analisadas de acordo com as diversas regras de operação.

2.2.2.2 Modelo Stanford IV

Modelo apresentado por Crawford e Linsley em 1966 é considerado como um dos modelos mais completos pela quantidade de algoritmos e processos representados, mas carrega consigo algumas desvantagens e a principal delas é justamente o grande número de parâmetros utilizados para o ajuste do modelo a uma bacia. O referido modelo tem sido modificado por diversas universidades americanas, resultando em versões como o OPSET (*OPTimum SETting of parameters*), onde o ajuste dos parâmetros é feito de um modo semi-automático e o HYDROCOMP, versão modificada pelos próprios autores onde o escoamento é propagado pelo método da onda cinemática.

O modelo Stanford possui duas estruturas básicas: (i) simulação na bacia (*Land Surface*) e (ii) simulação no canal (*Channel System*). A bacia hidrográfica a ser simulada é dividida em sub-bacias, o que permite separar as áreas segundo critérios de distribuição espacial da chuva e das características físicas da bacia, como cobertura vegetal, declividade e tipo de solo.

Este modelo vem sendo utilizado em diversos lugares, desde a sua criação, nas suas várias versões, porém o grande número de parâmetros e os processos empíricos já mencionados dificultam o seu uso por alguns profissionais pouco experientes com modelos, mas uma das suas grandes vantagens é que ele pode representar quase todos os processos envolvidos na transformação chuva-vazão. Adicionalmente esse modelo pode ser utilizado em bacias de características diferentes em tamanho e cobertura, em bacias urbanas e/ou rurais (TUCCI, 1987).

2.2.2.3 Modelo IPH

Os modelos IPH foram desenvolvidos no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para a simulação de partes do processo do ciclo hidrológico, recebendo numeração de acordo com a versão e são aplicáveis a diferentes situações (TUCCI, 1998). O modelo IPH vem sofrendo diversas modificações e refinamentos para adaptar-se a diversas situações. Já o modelo IPH II é um modelo conceitual concentrado de transformação chuva-vazão com grande aceitação no meio técnico-científico nacional. O modelo simula parte do ciclo hidrológico e através da alimentação dos dados de chuva obtém-se a vazão na seção principal do rio. Os algoritmos que integram o modelo são o de separação do escoamento desenvolvido por Berthelot em 1970, o de perdas por evaporação e interceptação e o de propagação do escoamento superficial e subterrâneo. Já os modelos IPH III e IV baseiam-se na discretização da bacia em sub-bacias e em trechos de canais. Esta versão utiliza a estrutura do modelo IPH II para simular cada sub-bacia e os trechos de rio.

2.2.2.4 Modelo SMAP

O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) possui uma estrutura simples constituída por três reservatórios que representam respectivamente as zonas superficial, subsuperficial e profunda (aquífero) dos solos. A separação do escoamento superficial é representada pela equação do *Soil Conservation Service* (SCS). A vazão simulada pelo modelo resulta das parcelas do reservatório da superfície e do que representa a parte profunda do solo (SILVA *et al.*, 2001). A versão mensal do modelo SMAP sofreu diversas modificações nas equações que regem os processos de fluxo,

tornando mais adequada sua aplicação no semi-árido (CIRILO *et al.*, 1992), todavia foi perdida a simplicidade que era uma de suas principais características e ponto forte do modelo.

O trabalho realizado por DINIZ (1994) utilizou-se de uma versão simplificada do SMAP para cálculo das vazões mensais e apenas para validação de um algoritmo genético de calibração automática (SCE-UA). Utilizando-se um conjunto de dados e as funções objetivo (soma dos quadrados das diferenças entre vazões observadas e simuladas e as baseadas na teoria da máxima verossimilhança) foi observado que há bastante proximidade entre os valores observados e simulados para as duas bacias hidrográficas estudadas (Bacia do Rio Mamuaba e Riacho Salobro).

2.2.2.5 Modelo TOPMODEL

Beven e Kirkby em 1979 desenvolveram um modelo hidrológico conceitual baseado em grade regular chamado TOPMODEL (*TOPographic MODEL*), amplamente utilizado na previsão de escoamentos. Este modelo baseia-se na teoria de contribuição variável para formação do escoamento e estima o déficit hídrico no solo e área fonte saturada (área de contribuição direta) a partir de características topográficas e do solo (RENNÓ e SOARES, 2000).

O modelo TOPMODEL considera o perfil de solo como uma única camada, dividindo-o apenas em duas zonas: saturada e não-saturada. A suposição de decréscimo exponencial da condutividade hidráulica é a base deste modelo, a partir da qual a profundidade do lençol freático (limite entre as zonas saturada e não-saturada) pode ser estimada. A metodologia do modelo tem sido alterada e vem evoluindo conforme as necessidades.

2.2.2.6 Modelo ARNO

O ARNO é um modelo conceitual semi-distribuído desenvolvido por E. Todini. A área é dividida em uma série de sub-bacias, onde o modelo é então, aplicado.

A escolha das sub-bacias é feita de acordo com os seus limites naturais, ou pela disponibilidade dos aparelhos de medição hidrométrica ou mesmo porque são áreas de interesse para previsão de enchente.

Os principais fenômenos físicos representados no modelo são: balanço hídrico no solo, o índice de umidade de solo presente na bacia, chuva, vazão, drenagem e percolação, perdas de água por evapotranspiração, dentre outros (TODINI, 1996). A maior vantagem apontada pelo autor do modelo é o fato que ele é totalmente governado pelo estoque de umidade do solo na bacia, que pode ser expresso por equações analíticas simples para as áreas de contribuição dinâmica, para a drenagem e para a percolação.

2.2.2.7 Modelo GR4J (*Génie Rural à 4 paramètres Journalier*)

O modelo GR4J foi desenvolvido por pesquisadores do CEMAGREF - Unidade de Pesquisa Hidrológica e Qualidade de Água na França e é uma versão melhorada do modelo GR3J (*Génie Rural à 3 paramètres Journalier*) também desenvolvido no CEMAGREF. O GR4J é um modelo chuva-vazão, concentrado em base diária, que utiliza apenas quatro parâmetros e é colocado pelos próprios autores como um dos melhores modelos concentrados. Apresenta melhores resultados do que a versão anterior, principalmente para simulação de vazões mínimas. O modelo apresenta uma estrutura simples, tendo com entrada a precipitação e a evapotranspiração e como saída à série de vazão. Apresenta como diferencial do modelo GR3J o cálculo da percolação e da

função das trocas de água. O modelo GR4J, como suas versões anteriores, tem sido desenvolvido em linhas empíricas, os autores incluem-no entre os modelos híbridos métrico-conceituais. A abordagem empírica segue a metodologia defendida por NASH & SUTCLIFFE (1970), que aconselha iniciar de modelos muito simples e ir pesquisando os melhores caminhos para melhorar sua eficiência, testando várias modificações, mantendo-o satisfatório. Foram feitos muitos testes antes de ser escolhido o esquema definitivo do modelo, cerca de 235 versões do GR3J foram testadas até chegar a versão considerada mais eficiente e mais robusta e com baixa complexidade.

O modelo tem sido utilizado com muito sucesso. Entre as principais vantagens citadas estão: a reduzida quantidade de parâmetros a serem otimizados, a robustez, eficiência e simplicidade do modelo. Toda essa estrutura do modelo será melhor especificada no capítulo posterior.

2.2.2.8 Modelo KWM

O modelo KWM (*Kentucky Watershed Model*) tenta retratar o comportamento da bacia hidrográfica desde a precipitação até a geração da vazão. Há uma divisão da resposta da bacia em componentes individuais que representam elementos do processo hidrológico e são descritos por equações analíticas, empíricas ou de base teórica. O modelo é apresentado com duas estruturas básicas: (i) fase solo, onde se calcula o escoamento na entrada do canal ou a contribuição lateral e o (ii) sistema de canais, onde é processado a translação e o amortecimento de vazões de entrada no canal. Esses são tratados separadamente no modelo para fins de simplificação.

2.2.2.9 TANK model

O princípio fundamental do modelo é bastante simples e por isso muito utilizado. Muitas tentativas de estudar a dinâmica da água têm sido realizadas e algumas produzem bons modelos hidrológicos, entre eles está o modelo chamado Tank Model, que divide a bacia em vários reservatórios e regimes de fluxos da água. Originalmente, o modelo padrão consiste em quatro reservatórios e cinco saídas. O modelo é constituído de quatro reservatórios: (i) Reservatório de superfície; (ii) Reservatório intermediário; (iii) Reservatório sub-básico; (iv) Reservatório básico. Nessa perspectiva, a água pode entrar para os reservatórios mais abaixo. A saída horizontal reflete a vazão, consistindo do Fluxo superficial, Fluxo subsuperficial, Fluxo intermediário, Fluxo sub-básico, Fluxo básico. A vazão só ocorre quando o nível de água de cada reservatório é maior que sua saída. A vazão total é o somatório das componentes de fluxo.

2.2.2.10 Modelos do Centro de Engenharia Hidrológica (HEC)

O pacote de modelos especialistas em simulação de recursos hídricos do Centro de Engenharia Hidrológica dos Estados Unidos, HEC, denominados por suas siglas desde o HEC-1 ao HEC-6. Entre as múltiplas aplicações desses modelos podem ser destacados os estudos de gestão das planícies de inundação e a simulação das multifuncionalidades dos reservatórios ao longo dos rios.

O modelo HEC-1 é um modelo hidrológico com variáveis e parâmetros físicos. Projetado para simular a resposta de escoamento superficial de uma bacia à precipitação mediante a representação da bacia como um sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos, onde cada um reflete um aspecto do processo

chuva-vazão dentro de cada sub-bacia, que constitui um sistema agregado (ponto). A representação de cada um dos componentes requer um conjunto de parâmetros que especifiquem as características particulares dos mesmos, e as relações matemáticas que descrevam o processo chuva-vazão, incluindo os processos meteorológicos, hidrológico e hidráulico e contemplando os subprocessos de precipitação, transformação do excesso de precipitação em escoamento superficial na saída de cada sub-bacia, adição de escoamento básico e o curso do hidrograma de saída. Algumas funcionalidades do HEC-1 são: (i) a estimativa automática dos parâmetros do hidrograma unitário, da interceptação e infiltração, a partir de dados de entrada do programa; (ii) a simulação do escoamento e do fluxo em toda a bacia, representada como um conjunto interconectado de sub-bacias, a partir de dados históricos de chuva ou utilizando-se uma função que relacione a superfície da bacia com a altura da precipitação. Essa é a principal função de todo modelo e a base de todas as outras. Algumas limitações podem ser destacadas também, entre elas estão: (i) os parâmetros utilizados representam médias espaciais e temporais, portanto, para a adequada representação das sub-bacias deve-se considerar essa circunstância; (ii) é um modelo válido para episódios isolados, que apenas considere o escoamento superficial direto e que não leve em conta nem a redistribuição da água no solo em períodos não chuvosos nem a evapotranspiração. RENNÓ & SOARES (2000)

2.2.2.11 Modelo MODHAC

Este modelo tem obtido grande aceitação no país, particularmente na região Nordeste, pela qualidade dos ajustes obtidos, pela relação que seus parâmetros tem com as características climato-fisiográficas das bacias e pela facilidade de calibração.

O MODHAC é um modelo matemático de simulação da fase terrestre do ciclo hidrológico. Conhecidas séries simultâneas das variáveis motoras desse processo, chuva e evapotranspiração potencial, o modelo computa o armazenamento e a abstração da água na bacia. Trata-se do que é chamado no jargão hidrológico de modelo globalizado e que tem como mais notável característica a possibilidade de ter seus parâmetros calibrados automaticamente de forma a aprimorar um índice de aderência entre as vazões observadas e calculadas.

A característica que mais diferencia o MODHAC dos demais modelos é que sua operação é realizada sobre dois intervalos de tempo, denominados de computação e de simulação. Nos intervalos de computação os cálculos anteriormente descritos são realizados. Um típico exemplo é o intervalo diário. Os escoamentos gerados ao longo dos intervalos de computação são acumulados em intervalos de simulação, por exemplo, em intervalos mensais.

Isto possibilita a análise da propagação das vazões na bacia, atributo dos modelos com largos intervalos de tempo, sem deixar de considerar a distribuição temporal das chuvas, já que as computações podem ser realizadas em pequenos intervalos. A consideração desta distribuição temporal das chuvas é particularmente relevante em climas semi-áridos e de transição para o semi-árido, onde as chuvas de natureza convectiva respondem por parte substancial dos eventos pluviais.

Uma particularidade também notável do MODHAC é que seus parâmetros mais sensíveis, e que respondem pela parte substancial do ajuste das vazões calculadas às observadas, podem ser relacionados a características climatológicas e fisiográficas da bacia. Isto permite a extrapolação dos parâmetros a bacias próximas da região de ajuste, propriedade que deve ser utilizada no estudo.

2.2.2.12 Modelo AÇUMOD

AÇUMOD é um modelo hidrológico distribuído. O modelo pode estimar vazões, nível de água dos reservatórios, entre outras coisas. Isso é especialmente interessante em condições semi-áridas de processos chuva-vazão (PASSERAT DE SILANS *et al.*, 2000).

Baseado em uma rede de grade construída para bacia, o modelo calcula a quantidade de água para cada célula e toda a transferência de água entre as células. Cada célula é caracterizada por parâmetros hidrológicos e geográficos, a distribuição heterogênea pode ser visualizada por mapas. A rede de grade pode ser aumentada, começando com um comprimento de 10 km, 5 km e até 2.5 km, dependendo da informação existente quanto à geologia, solo e hidrologia. O local dos reservatórios e estações de medições nos rios são implementadas como pontos específicos.

Os dados de entrada do modelo são os seguintes: mapa digitalizado da bacia, mapa das zonas homogêneas hidrológicas, vazão diária, evapotranspiração, parâmetros hidráulicos dos reservatórios, regras de operação de reservatórios, dados de fornecimento de água de grupo de usuários, troca com outras sub-bacias.

O primeiro passo é a implementação de toda a informação da bacia para as células. Essa parte é conectada pela superposição com as zonas de Thiessen das estações de medidas da bacia e as unidades hidrológicas homogêneas. O segundo passo é a calibração do modelo chuva-vazão é feita pelo uso de dados de vazão observados e níveis de água dos reservatórios.

Depois da validação do modelo os resultados são usados para gerar séries simuladas de vazão pela simulação estocástica. Normalmente no nordeste do Brasil não existem longas series de vazão.

A calibração e a geração são feitas de estações de medição ao longo da bacia. O AÇUMOD permite a transferência dos resultados de vazão para pontos críticos selecionados da bacia, por exemplo, pontos de referência municipais. Nesses pontos de referência os recursos hídricos disponíveis, calculado na bacia de uma série de dados de vazão e a demanda de água para um tempo futuro pode ser comparado.

2.2.2.13 Modelos baseados em Sistemas de regras difusas

Os modelos baseados em sistemas de regras difusas têm-se apresentado como instrumentos adequados para representar incertezas e imprecisões de conhecimento e de dados. Esses modelos podem representar aspectos qualitativos do conhecimento e dos processos de inferência humana, sem empregar análise quantitativa precisa. São, portanto, menos precisos do que os modelos numéricos convencionais. Entretanto, o ganho em simplicidade, velocidade computacional e flexibilidade que resultam do uso desses modelos, podem compensar uma possível perda de precisão (BÁRDOSSY, 1996). Os sistemas baseados em regras difusas têm sido utilizados com sucesso para modelar sistemas dinâmicos em vários campos da ciência e da engenharia, e há algum tempo vêm sendo aplicados para modelar os processos chuva-vazão com bons resultados. ÖZELKAN e DUCKSTEIN (2001) apresentaram uma estrutura chuva-vazão, conceitual difusa, para resolver as incertezas dos parâmetros de modelos chuva-vazão conceituais. O que eles observaram foi que a calibração de modelos chuva-vazão conceituais difusos, usando técnicas de regressão dos mínimos quadrados difusos, resultou em estimativas de parâmetros mais estáveis do que aquelas obtidas assumindo as regras não-difusas. Outro ponto observado é que esses modelos difusos necessitam de mais parâmetros para serem estimados do que os modelos tradicionais chuva-vazão, embora eles não acreditem que

isso seja uma grande desvantagem para o modelo. Voltado para aplicações na área de recursos hídricos, um dos primeiros trabalhos foi apresentado por BÁRDOSSY e DUCKSTEIN (1992) *apud* (BARBALHO, 2001), propondo um modelo difuso para apoio à decisão em um problema de recursos hídricos com múltiplos objetivos.

2.3 Discussão sobre algumas características dos modelos chuva-vazão

Um dos primeiros trabalhos a discutir sobre toda a estrutura de modelos chuva-vazão e sua perspectiva para o futuro foi o de TODINI (1998), ele fez um histórico dos modelos desenvolvidos até a década de oitenta e observou que até os anos setenta os modelos apresentavam muitos parâmetros, que acabavam por não expressarem as circunstâncias reais da bacia, geralmente incorporando muitos erros nos dados e nas descrições dos processos envolvidos em toda extensão da bacia. Segundo o autor, a partir dos anos oitenta surgiram os modelos de previsão em tempo real, principalmente pela grande preocupação com os eventos extremos, tais como as enchentes.

Devido à grande quantidade de modelos sendo desenvolvidos, Todini sugeriu a introdução de uma classificação adicional, para os modelos chuva-vazão dividindo-os em quatro classes, baseada no nível de conhecimento prévio sobre os fenômenos representativos para o modelo. Já os parâmetros, que dependem de métodos para suas estimativas, foram divididos em duas classes. Segundo o autor as classes dos modelos são:

(i) Puramente estocástico → é aquele modelo em que as variáveis de saída não têm nenhuma relação de causa-efeito com as variáveis de entrada. O nível de informação introduzida neste modelo é mínimo e os resultados são sempre uma média dos valores;

(ii) Concentrado integral \rightarrow é um modelo onde as dinâmicas do sistema são representadas de forma integral e descreve a bacia e sub-bacias como um todo e os parâmetros geralmente são estimados usando técnicas estatísticas;

(iii) Distribuído integral \rightarrow essa classe de modelos que inclui muito dos modelos “conceituais” complexos como o Stanford, por exemplo, é baseada na idéia de representar todos os fenômenos na escala da sub-bacia usando fórmulas empíricas. Um ponto a ser considerado é que esses modelos não conseguem produzir uma saída realmente distribuída, a menos que o modelo subdivida a bacia em subunidades extremamente pequenas, o que é geralmente impraticável devido ao grande número de parâmetros usado por este tipo de modelo em cada subunidade;

(iv) Distribuído diferencial \rightarrow representa o comportamento das bacias em termos de todas as equações diferenciais discretizadas no tempo e no espaço, expressando o balanço de momentum e massa para cada subsistema e os unindo pelas suas condições limite.

2.3.1 Sobre a resolução espacial

Alguns modelos considerados distribuídos, associados a estimativas da precipitação com o uso de satélites e radares meteorológicos, podem melhorar a precisão dos resultados da previsão de vazão, embora o uso desses modelos ainda levante alguns questionamentos quanto a sua eficácia, devido ao grande número de parâmetros exigidos. TUCCI (1994) afirma que: “*Também, nem sempre existe ganho expressivo no uso de*

modelo distribuído para previsão, se a precipitação varia pouco espacialmente. Portanto, deve-se examinar cuidadosamente se existe ganho em utilizar um modelo distribuído na previsão contra um modelo concentrado com poucos parâmetros que permita sua atualização ao longo do evento.”

NIEL *et al.* (2003) em uma aplicação do modelo concentrado GR2M em bacias da África Oeste e Central, simulando a descarga mensal usando estimativas da precipitação média da bacia, perceberam que os parâmetros são mantidos estáveis mesmo diante de grande mudanças climáticas. Ainda hoje, muitos pesquisadores acreditam que um modelo concentrado seja a melhor maneira de representar a bacia como um todo, visto que ainda não se conhecem, claramente, todos os processos envolvidos na escala da bacia, principalmente os processos do subsolo. Além disso, a superioridade prática dos modelos distribuídos e semi-distribuídos, sobre os modelos concentrados, para a simulação de fluxo de corrente não tem sido claramente demonstrada.

2.3.2 Sobre super-parametrização

A super-parametrização dos modelos é outra preocupação de muitos cientistas. Muitos acreditam que um reduzido número de parâmetros é suficiente para conseguir um modelo eficiente e robusto. PERRIN *et al.* (2001a) fizeram estimativas com base em 19 modelos diários chuva-vazão com vários níveis de complexidade e observaram que a estrutura do modelo seria peça-chave para a sua confiabilidade, e que três a cinco parâmetros livres são suficientes para obter performances satisfatórias para um modelo. Outra observação relevante apresentada pelos autores é a de que para aperfeiçoamento de modelos é necessário que seja feito exercícios comparativos, partindo de estruturas mais simples até chegar as mais complexas.

O trabalho de PERRIN *et al.* (2001a) é muito interessante pelo fato de ser um dos poucos que analisaram comparativamente modelos conceituais diários usando um esquema de teste automático para os 19 modelos e aplicando-os em 429 bacias na França, Estados Unidos, Austrália e Brasil, e suas condições climáticas variavam do tropical úmido ao semi-árido, ou seja, houve uma preocupação em trabalhar com uma alta variabilidade hidroclimática. Para os autores, um modelo é considerado seguro quando se pode trabalhar bem sob condições climáticas variadas. Os 19 modelos testados na comparação estimada precisavam de poucos dados e poderiam ser usados nesse estudo já que se adequavam ao contexto operacional, ou seja, foram excluídos da comparação os modelos distribuídos espacialmente e os baseados em dados físicos, porque esses necessitam de medidas de campo. É importante citar que, um modelo hidrológico deve ser eficiente e robusto, visto que suas saídas podem ser utilizadas como entrada de outras aplicações e essas qualidades influenciam consideravelmente na performance de um modelo.

XIONG e GUO (1999) aplicaram um modelo mensal de dois parâmetros em setenta bacias do sul da China e obtiveram resultados satisfatórios. Eles puderam concluir que o modelo de dois parâmetros foi capaz de simular séries mensais de vazão com resultados muito bons. Fizeram comparações com o modelo de cinco parâmetros desenvolvido por Guo em 1992 e observaram que o modelo com menos parâmetros apresenta uma performance tão boa, na simulação de vazão, quanto o modelo com mais parâmetros, segundo os termos do coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Segundo PERRIN *et al.* (2003), quando se pensa em melhorar um modelo deve-se pensar inicialmente em dois problemas básicos: estrutura do modelo – conjunto de funções matemáticas – deve seguir critérios adequados para bem representar o comportamento da bacia e nível de complexidade que deve ser escolhido adequadamente à estrutura proposta para o modelo de modo que garanta uma performance ótima.

Para eles, a estrutura do modelo e a complexidade devem andar sempre juntas quando o modelo está para ser escolhido. A estrutura do modelo (robustez, versatilidade e etc.) é algo muito defendido por PERRIN *et al.* (2001a). Eles são categóricos ao dizer que a qualidade da metodologia dos modelos chuva-vazão está essencialmente na sua estrutura, ou seja, no centro da ligação entre chuva e vazão. Eles citaram o exemplo do trabalho feito por Chiew e McMahon em 1994, que analisaram o modelo MODHYDROLOG, e viram que os seus dezenove parâmetros não são necessários, e que, em muitos casos, a calibração de apenas nove desses parâmetros é o suficiente para dar uma adequada estimativa da vazão.

ANDRÉASSIAN *et al.* (2002), em seus estudos para detectar as tendências no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, precisavam de um modelo chuva-vazão que tivesse poucos parâmetros para facilitar a calibração e que fosse robusto e versátil para os testes que seriam aplicados. A escolha deles foi por um modelo parcimonioso com apenas quatro parâmetros, o GR4J, que já havia sido testado comparativamente no estudo de PERRIN *et al.* 2001a, citado anteriormente, e considerado um modelo que apresenta a mesma performance dos melhores modelos existentes que usam uma grande quantidade de parâmetros. Como nesse estudo, outros pesquisadores têm preferido a utilização de modelos mais simples, conceituais, com reduzido número de parâmetros, e que apresentem robustez, segurança e facilidade no uso.

2.3.3 Sobre assimilação de umidade

O estado hídrico do solo é considerado um parâmetro chave do processo chuva-vazão, apesar de muitas vezes não ser evidenciado em modelos desse tipo. AUBERT *et al.* (2003) avaliaram duas questões importantes quanto à assimilação da

umidade pelos modelos hidrológicos chuva-vazão: 1) Dados de umidade do solo podem melhorar a previsão de vazão? 2) As técnicas de assimilação de umidade estão bem adaptadas ao contexto da previsão de vazão? Eles utilizaram na pesquisa o modelo GR4J e incorporaram funções de umidade de solo para responder as questões acima, utilizando um procedimento de assimilação seqüencial junto com o modelo citado para atualizar os estados internos do modelo (reservatórios r e s) pela assimilação diária de umidade e vazão para com isso melhorar o ajustamento desses aos dados observacionais. Os resultados obtidos com o trabalho são interessantes. A primeira conclusão obtida pelos autores é que a integração de informações de umidade do solo permite uma melhora significativa na previsão e simulação de vazão, principalmente durante eventos de cheia quando a máxima eficiência é obtida. Baseado nos resultados obtidos, a segunda conclusão a que chegaram os autores é que um procedimento de assimilação de umidade pode claramente melhorar a performance do modelo no modo de simulação. No estudo eles avaliaram que a assimilação de vazão é particularmente eficiente em condições hidrológicas normais e a assimilação de umidade em condições hidrológicas extremas (cheias). Pesquisas existentes já haviam estudado essas duas assimilações individualmente, já esse estudo de AUBERT *et al.* (2003) mostra a avaliação dessas duas técnicas em conjunto.

2.4 Desempenho de modelos hidrológicos

É evidente a necessidade de avaliar a eficiência de modelos hidrológicos, visto que muitos vêm sendo desenvolvidos e apresentam resultados que não possibilitam um julgamento da sua eficiência relativa. Muitos desses nem apresentam concordância quanto ao método de desenvolvimento e teste para uma bacia ou grupo de bacias.

Um trabalho pioneiro sobre esse assunto é o de NASH & SUTCLIFFE (1970). Eles apresentaram um estudo que é usado por muitos hidrologistas para verificar a performance de seus modelos.

Nash e Sutcliffe criticam o empirismo como são tratados muitos modelos hidrológicos. O processo que relaciona chuva à vazão é determinístico e governado por leis físicas definidas, logo, para determinar a solução de um problema é necessário à aplicação dessas leis físicas para a chuva medida e as condições limite, porém, para muitos hidrologistas isso seria impraticável, o temor é quanto à complexidade das condições limite e não tanto quanto as leis físicas. Algumas simplificações são necessárias, porém, o que acontece é que apesar de, muitas vezes, o empirismo ser inevitável, poucos querem usar leis de estabilidade física, preferem adotar uma aproximação empírica, analítica, etc. Para Nash e Sutcliffe, embora a simplificação da operação da bacia seja necessária, principalmente em termos de variabilidade sobre a bacia, é desejável que o modelo possa refletir a sua realidade física. Os autores consideram que se uma ou mais funções do modelo puderem ser isoladas e parâmetros relevantes otimizados, obter-se-á maior eficiência do que se o modelo for otimizado como um todo.

Para ajuste do modelo, os pesquisadores sugerem a otimização automática proposta por O'Donnell em 1996. Essa otimização envolve mudanças sucessivas nos valores dos parâmetros de acordo com algumas regras de incremento e indica se houve ou não mudança com o ajuste. A otimização necessita de um índice de concordância ou discordância entre o valor observado e o calculado. A análise de regressão linear sugere o critério da soma dos quadrados, dada por:

$$F^2 = \sum (q' - q)^2 \quad (2.1)$$

em que q é o valor observado, q' é o valor calculado, F^2 a variância residual e F_0^2 a variância inicial, definida por:

$$F_0^2 = \sum (q - \bar{q})^2 \quad (2.2)$$

em que \bar{q} é o valor médio observado.

Com uma proporção dessa variância inicial, pode-se definir a eficiência do modelo através de R^2 pela seguinte fórmula:

$$R^2 = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2} \quad (2.3)$$

Para medir a eficiência de partes do modelo, tem-se a seguinte fórmula:

$$r^2 = \frac{F_1^2 - F_2^2}{F_1^2} = \frac{R_2^2 - R_1^2}{1 - R_1^2} \quad (2.4)$$

Nash e Sutcliffe propuseram, para uma modificação progressiva em modelos, um procedimento que será transposto a seguir:

- (1) Assumir um modelo simples, mas que possa ser detalhado posteriormente;
- (2) Otimizar os parâmetros e analisar sua estabilidade;
- (3) Medir a eficiência R^2 ;
- (4) Modificar o modelo, se possível com a introdução de uma nova parte, repetir o passo (2) e (3), medir r^2 e decidir a aceitação ou rejeição da modificação;
- (5) Escolher a próxima modificação;

(6) Pode ser necessário comparar dois ou mais modelos de complexidade similar, visto que, nem todos os modelos podem ser arranjados em ordem crescente de complexidade. Esse procedimento pode ser feito comparando R^2 .

Sobre eficiência dos modelos hidrológicos chuva-vazão, pode-se citar ainda, o trabalho de ANDREASSIAN *et al.* (2004) que discute o problema do uso de dados imprecisos na estimativa da evapotranspiração (ET). O destaque foi o fato de que os modeladores se preocupam mais com os estudos de sensibilidade do modelo aos dados de chuva e pouca atenção é dada aos dados de ET. A explicação para tal fato está em três pontos, dizem os autores. O primeiro é que os modelos chuva-vazão necessitam de uma estimativa de evaporação na escala da bacia e isso é bastante complicado, visto que, no caso da evaporação, além dos problemas normais durante a estimativa regional, a determinação num ponto local é outro problema a ser enfrentado. O segundo ponto é a indisponibilidade de dados que, muitas vezes, impede a análise e o estudo de sensibilidade da ET. A última questão está no fato de muitos modeladores acreditarem que não é tão importante fazer estimativa de evaporação, visto que muitos modelos chuva-vazão, numericamente, conseguem trabalhar com imperfeições na estimativa da ET.

Um fato interessante levantado na pesquisa é que a estimativa imperfeita da ET pode impedir a calibração dos parâmetros do modelo ou modificar seus valores ótimos e ter uma influência determinante na simulação do mesmo. Logo, foi feito pelos autores um estudo da sensibilidade do modelo a estimativas imperfeitas de ET, e o fizeram usando a formulação de Penman, que é considerada uma das mais satisfatórias por muitos hidrologistas. Esse foi um estudo de regionalização da ET realizado numa região montanhosa da França em 62 bacias onde essa variável varia muito rapidamente com a altitude, latitude e longitude. Foram usados dois modelos, uma versão modificada do

TOPMODEL (modelo com 8 parâmetros) e o GR4J (modelo com 4 parâmetros) para analisar as mudanças na eficiência com a melhora na qualidade dos dados de ET e também para uma análise no comportamento dos parâmetros. Foi observado o impacto desse aperfeiçoamento com cinco diferentes entradas de ET (alto, baixo, média, clássica, e regionalização), e ambos os modelos apresentaram comportamento similar, ou seja, os dois mostraram-se insensíveis aos diferentes dados de evapotranspiração, então os autores concluíram que há uma superestimativa sobre a ET, que independe da complexidade do modelo. Só que os autores levantaram uma questão importante: esses modelos são mesmo pouco sensíveis aos dados de evapotranspiração ou eles são adaptáveis aos diferentes cenários desses dados? Usando apenas o GR4J (apresenta simplicidade para trabalhar), os autores observaram que o modelo respondeu às entradas de ET através de seus parâmetros, que foram ajustados para cada entrada. Portanto, a conclusão que eles chegaram, é que o modelo acaba se adaptando às entradas de evapotranspiração. Um dos autores do modelo GR4J, Charles Perrin, afirma que isso é o que se tem observado, na prática, com o uso dos modelos chuva-vazão. Para ele, os valores de ET acabam por não atrapalharem a simulação dos modelos, principalmente aqueles ditos parcimoniosos, apenas os dados de chuva e vazão podem trazer alguns problemas para a performance do modelo.

2.5 Aumento de desempenho do Modelo GR3J para o GR4J

O modelo GR4J apresenta modificações significativas quando comparado ao modelo de que foi originado, o GR3J. Os autores afirmam que testaram cerca de 235 versões do modelo e acreditam ter chegado naquela que une a robustez com uma baixa complexidade.

As principais mudanças em relação a modelos anteriores e principalmente ao GR3J é a adição de mais um parâmetro (x_1) e da função de percolação. Na versão anterior a capacidade do reservatório de produção tinha um valor fixo de 330 mm.

Os autores do modelo GR4J fizeram uma análise da melhora de desempenho do GR3J para o GR4J, levando em conta os cinco critérios levantados anteriormente, e para quantificar a melhora utilizaram a estatística r^2 proposta por Nash-Sutcliffe (1970) (ver equação 2.4). Os valores de r^2 são mostrados na Tabela 1 e mostram uma significativa melhora, para todos os critérios, do modelo GR3J para o seu sucessor.

Tabela 1 – Desempenho médio dos modelos GR3J e GR4J e estimativa da melhoria da última versão

<i>Critérios</i>	<i>GR3J</i>	<i>GR4J</i>	r^2
CR1(%)	47.0	51.0	7.5
CR2(%)	58.6	69.1	7.8
CR3(%)	52.6	57.5	10.3
CR4(%)	50.0	52.2	4.4
CR5(%)	78.4	79.0	2.9

Pode-se observar que houve melhora significativa, de acordo com os três primeiros critérios, especialmente o terceiro ($r^2 = 10.3$), o que significa, portanto, que a versão do modelo mais recente simula melhor as baixas vazões. Isso se deve à inclusão da função de percolação e a calibração do parâmetro x_1 (capacidade do reservatório de produção).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização da bacia em estudo

A bacia de Caraúbas tem uma área em torno de 5.065 km² e está localizada na região do Cariri paraibano entre as latitudes de 7° 24' e 8° 12' sul e longitude de 36° 12' e 37° 24' a oeste de Greenwich, como mostrado na Figura 4. É caracterizada por um clima semi-árido e na sua vegetação há o predomínio de caatingas arbustivas e cactáceos. As principais cidades que fazem parte da bacia são: Caraúbas, Coxixola, Congo, Sumé, Amparo, Ouro Velho, Prata, Monteiro, Zabelê, São Sebastião do Umbuzeiro, São João do Tigre e Camaláu. (Figura 5)

A maioria das cidades supracitadas tem sua economia baseada em atividades como a pecuária e a agricultura de subsistência. Temos como exemplos a cidade de Caraúbas que tem uma área territorial de aproximadamente 446 km² e sua população está em torno de 3.501 pessoas. A atividade de destaque na região é a pecuária, com uma extensa criação de ovinos, caprinos, bovinos e galináceos. Uma outra cidade que faz parte da bacia de Caraúbas é Congo, que tem uma população estimada em torno de 4.674 habitantes e extensão territorial de 274 km². Sua população vive economicamente em torno da pecuária com criação de ovinos e caprinos e na agricultura a maior produção concentra-

se na goiaba, banana e manga. Sumé é também uma das importantes cidades do interior da Paraíba e tem uma população em torno de 14.743 habitantes e base territorial de 838 km². Sua principal atividade econômica é o cultivo de produtos como a castanha de caju, a manga, o sisal e a banana. Monteiro é uma das mais destacadas cidades do cariri paraibano com uma população em torno de 28.000 habitantes, que vive economicamente da criação de bovinos e caprinos, bem como do cultivo do sisal, com uma produção em torno de 55 toneladas por ano e um rendimento médio de R\$ 500.000. São João do Tigre, com uma população de quase 5.000 pessoas, também, destaca-se na produção de caprino e ovinos. Camalaú tem população de 5.500 pessoas e área territorial de 603 km², o destaque econômico da cidade é a criação de caprinos e galináceos.

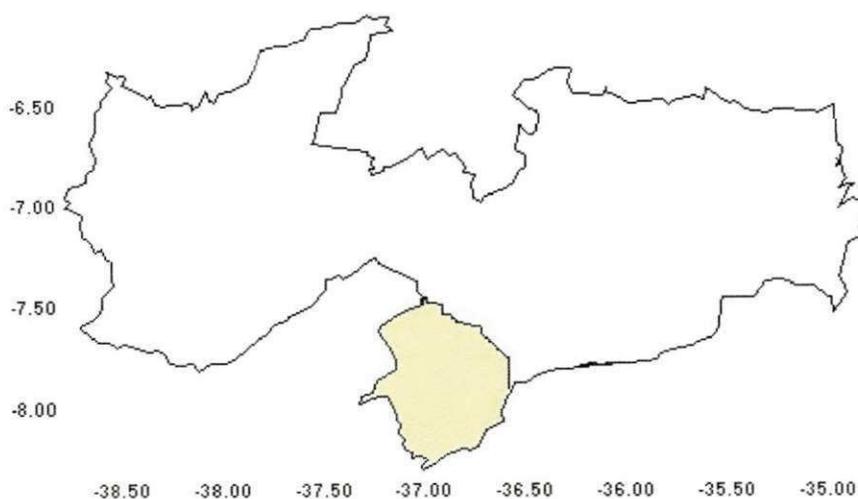


Figura 4 Localização da bacia no Estado da Paraíba.
Fonte: Bacias Hidrográficas (SEMARH/PB, 2004)

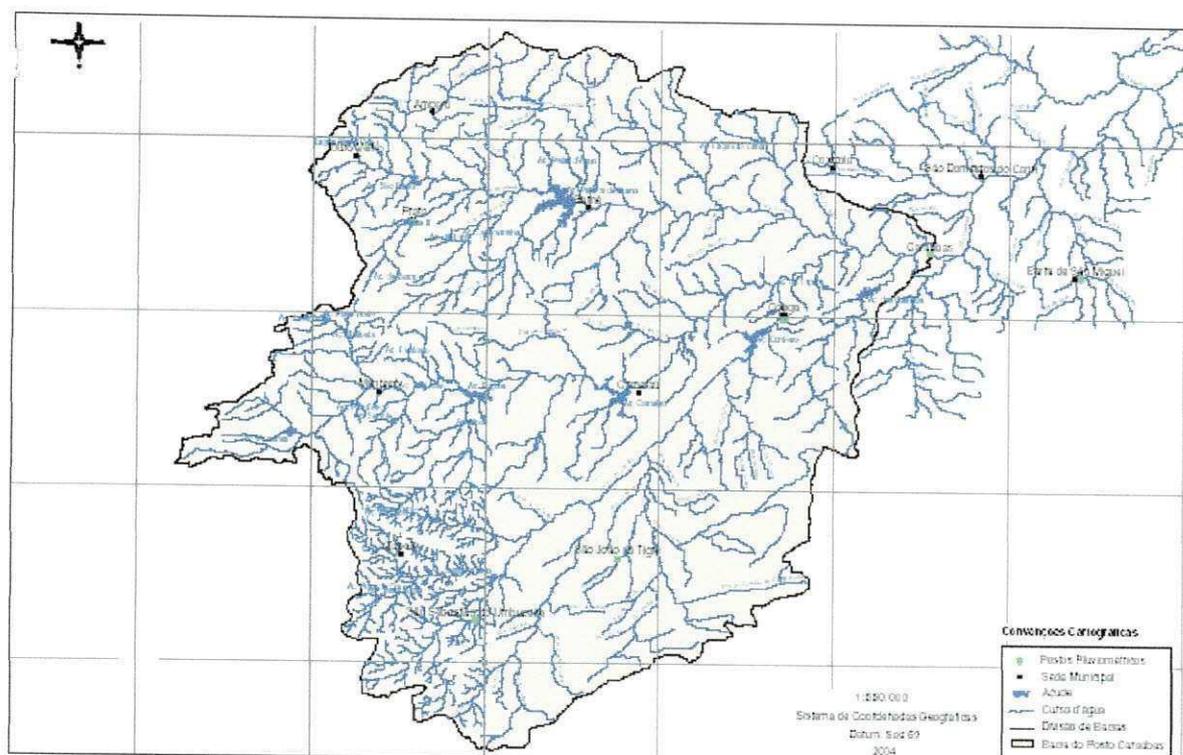


Figura 5 Mapa da bacia hidrográfica a montante da estação fluviométrica de Caraúbas.
 Fonte: Bacias Hidrográficas (SEMARH/PB, 2004)

Os postos pluviométricos da bacia de Caraúbas utilizados para simulação no modelo, suas longitudes e latitudes, são mostrados na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 Dados dos postos pluviométricos da bacia de Caraúbas

<i>Número do Posto</i>	<i>Nome do Posto</i>	<i>Latitude(graus)</i>	<i>Longitude(graus)</i>
3855383	Prata	-7,695	-37,0842
3856498	Caraúbas	-7,7253	-36,4903
3856667	Congo	-7,8022	-36,6586
3857534	Barra de São Miguel	-7,7517	-36,3181
3865397	São Sebastião do Umbuzeiro	-8,1517	-37,0097
3866128	São João do Tigre	-8,08	-36,8472

A bacia hidrográfica do Rio do Peixe (ver Anexos – Figura A), localizada no alto sertão paraibano, foi outra bacia escolhida a fim de fazer novos ajustes como o modelo GR4J e avaliar sua performance. A bacia possui uma área de 3.720 km² e a região onde ela está localizada é caracterizada por um clima semi-árido, com uma vegetação de caatinga.

O período de 1999-2001 foi utilizado para realização das simulações e os resultados são apresentados nos anexos. Os postos utilizados foram: Aparecida, Santa Cruz, Bom Jesus, Sousa, São Francisco, Uiraúna, Santa Helena, Lastro, Cajazeiras, Triunfo e São José do Rio do Peixe. (ver Anexos – Tabela A)

3.2 Estrutura do modelo chuva-vazão GR4J

O modelo está escrito em Fortran 75 e possui uma versão disponível para simulação no Microsoft® Excel. O diagrama do modelo está apresentado na Figura 7 e o código com as rotinas necessárias para o cálculo da vazão é mostrado nos anexos.

As sub-rotinas UH1 e UH2 também apresentadas nos anexos calculam as ordenadas das hidrógrafas unitárias UH1 e UH2, uma vez que o tempo base $x4$ é fixado. Essas rotinas chamam respectivamente as rotinas SS1 e SS2 para calcular as curvas-S das hidrógrafas (Figura 6), que representam a proporção cumulativa da unidade de entrada com o intervalo de tempo. A ordenada UH no tempo i é calculada como a diferença da curva-S nos passos $i-1$ e i e C é o valor do parâmetro $x4$.

(a)

(b)

Figura 6 Curvas-S das hidrógrafas unitárias (a) UH1 e (b) UH2

3.3 Equações do modelo chuva-vazão GR4J

A vazão envolve processos extremamente complexos de transferência de água, portanto faz-se necessário selecionar apenas certos componentes para simplificar o modelo matemático. Dentre esses componentes estão o escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo, além da infiltração e da percolação. O modelo matemático apresentado abaixo envolve um conjunto de equações diferenciais dependentes do tempo e que determinam a taxa de transferência de água em cada reservatório nas diversas fases do modelo. O modelo apresentado por PERRIN *et al.* (2003) tem como entrada a chuva (P) e a evapotranspiração potencial (EP) ou evaporação, no qual P é a precipitação regional na bacia e a evapotranspiração é um valor médio.

Todas as equações descritas abaixo são formuladas para um dado intervalo de tempo, ou seja, correspondem a uma formulação discreta.

3.3.1 Determinação da chuva total e da evapotranspiração potencial (EP)

Para determinarmos a chuva total P_n ou a capacidade de evapotranspiração total E_n , subtrai-se E de P segundo o algoritmo abaixo:

Deve-se observar que a operação a seguir é feita considerando-se a capacidade de armazenamento por interceptação igual a zero.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Se } P \geq E \text{ então } P_n = P - E \text{ e } E_n = 0 \\ \text{Do contrário, } P_n = 0 \text{ e } E_n = E - P \end{array} \right. \quad (1)$$

$$(2)$$

3.3.2 Produção armazenada

No caso da chuva total ser diferente de zero, parte dela (P_s) vai para o reservatório de produção.

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)} \quad (3)$$

P_s é determinado em função do nível S do reservatório de produção e x_1 é sua capacidade máxima.

Por outro lado, se E_n não for nulo, a taxa de evaporação é determinada como função do nível do reservatório de produção para cálculo da quantidade de água (E_s) que evaporará desse reservatório.

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)} \quad (4)$$

O conteúdo total do reservatório de produção será, portanto, dado por:

$$S = S - E_s + P_s \quad (5)$$

Uma das principais características do GR4J, que o diferencia do seu antecessor GR3J, é a percolação, que foi introduzida nessa versão e é dada com uma função potência do conteúdo do reservatório de produção. A percolação acontece quando a capacidade máxima do reservatório alcançou $9/4$ de x_1 .

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S}{9 x_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (6)$$

A quantidade total de água (P_r) que chega as funções de roteamento é:

$$P_r = Perc + (P_n + P_s) \quad (7)$$

P_r é então dividida em duas componentes de fluxo, em uma delas 90% de P_r é roteada para hidrógrafa unitária 1 (UH1) e os outros 10% para a hidrógrafa unitária 2 (UH2). Com UH1 e UH2 o modelo pode simular o retardo entre o evento de chuva e o pico de vazão resultante.

UH1 e UH2 dependem do mesmo parâmetro de tempo (x_4) e suas ordenadas são usadas para distribuição da chuva efetiva sobre os sucessivos intervalos de tempo. SH1 e SH2 são as curvas que representam a proporção cumulativa da entrada. SH1 é definida ao longo do tempo t como segue:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Para } t \leq 0, SH1(t) = 0 \quad (8) \\ \text{Para } 0 < t < x_4, SH1(t) = \left(\frac{t}{x_4} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (9) \\ \text{Para } t \geq x_4, SH1(t) = 1 \quad (10) \end{array} \right.$$

SH2 é definido similarmente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Para } t \leq 0, \text{ SH2}(t) = 0 \\ \text{Para } 0 < t < x_4, \text{ SH2}(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{x_4} \right)^{\frac{5}{2}} \\ \text{Para } 0 < t < 2x_4, \text{ SH2}(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{x_4} \right)^{\frac{5}{2}} \\ \text{Para } t \geq x_4, \text{ SH2}(t) = 1 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (11) \\ (12) \\ (13) \\ (14) \end{array}$$

As ordenadas SH1 e SH2 são então calculadas por:

$$\text{UH1}(j) = \text{SH1}(j) - \text{SH1}(j-1) \quad (15)$$

$$\text{UH2}(j) = \text{SH2}(j) - \text{SH2}(j-1) \quad (16)$$

Onde j é um inteiro.

3.3.3 Troca de água na bacia

O termo de troca de água, que atua nas duas componentes de fluxo (Q_r e Q_d), é calculado como segue:

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (17)$$

Onde R é o nível do reservatório de roteamento, x_3 a capacidade desse reservatório e x_2 o coeficiente de troca de água. O valor de x_2 pode ser negativo se houver

saída de água, positivo se houver entrada de água ou zero quando não há troca de água com a bacia.

3.3.4 Reservatório de roteamento não-linear

O nível do reservatório de roteamento é modificado pela saída de Q_9 de UH1 e de F como mostrado a seguir:

$$R = \max(0; R + Q_9 + F) \quad (18)$$

A saída do fluxo Q_r do reservatório é então calculado como:

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (19)$$

Q_r é sempre menor que R , a Figura 6 ilustra essa afirmação.

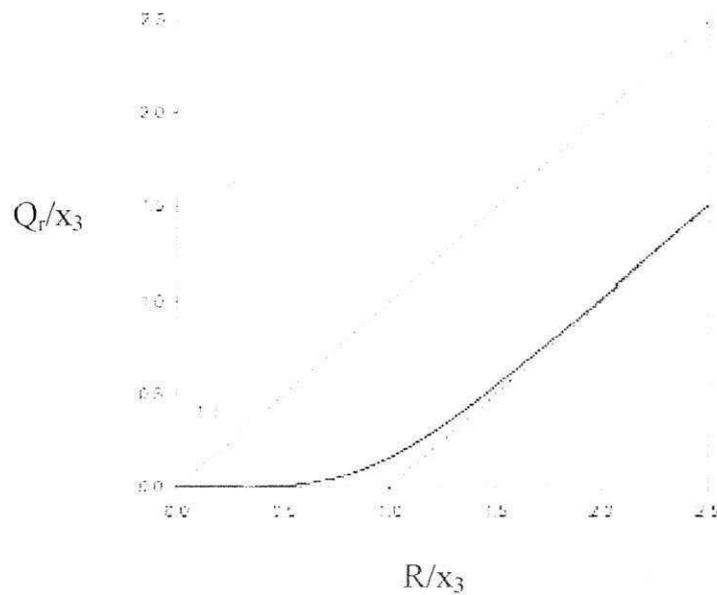


Figura 8 Ilustração do fluxo de saída Q_r do reservatório de roteamento como função do nível do reservatório depois da entrada de Q_9 .

O nível do reservatório agora é então dado por:

$$R = R - Q_r \quad (20)$$

3.3.5 Vazão total

A saída Q_1 de UH2 sofre a mesma troca de água com a bacia para resultar na componente de fluxo Q_d , que é apresentado a seguir:

$$Q_d = \max(0; Q_1 + F) \quad (21)$$

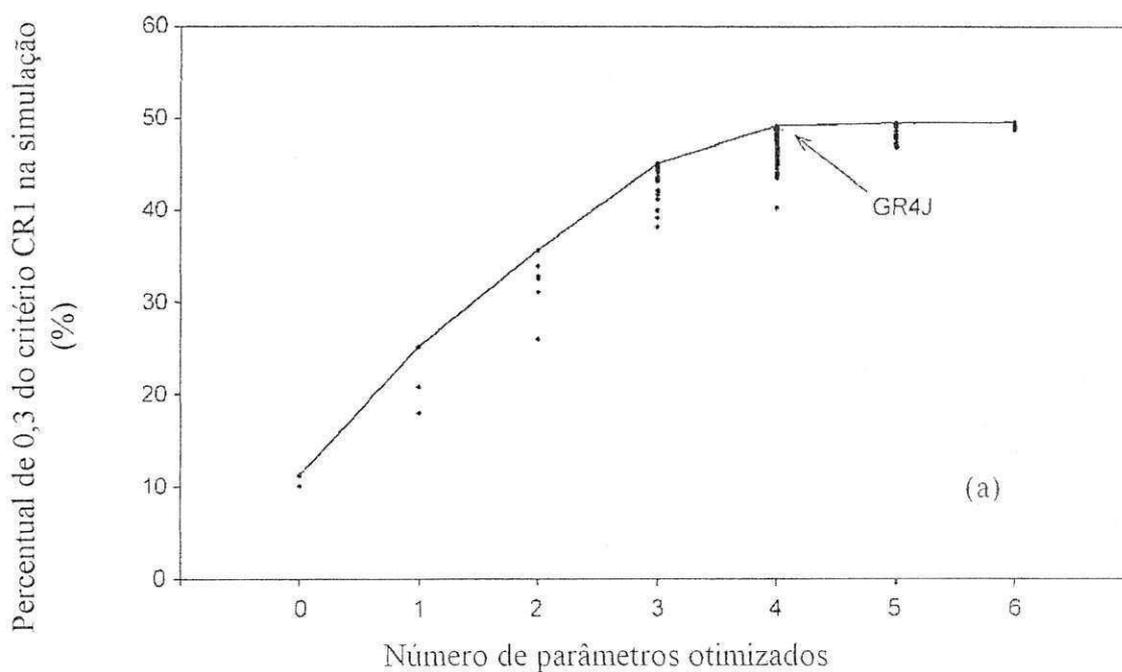
A vazão total é então obtida como segue:

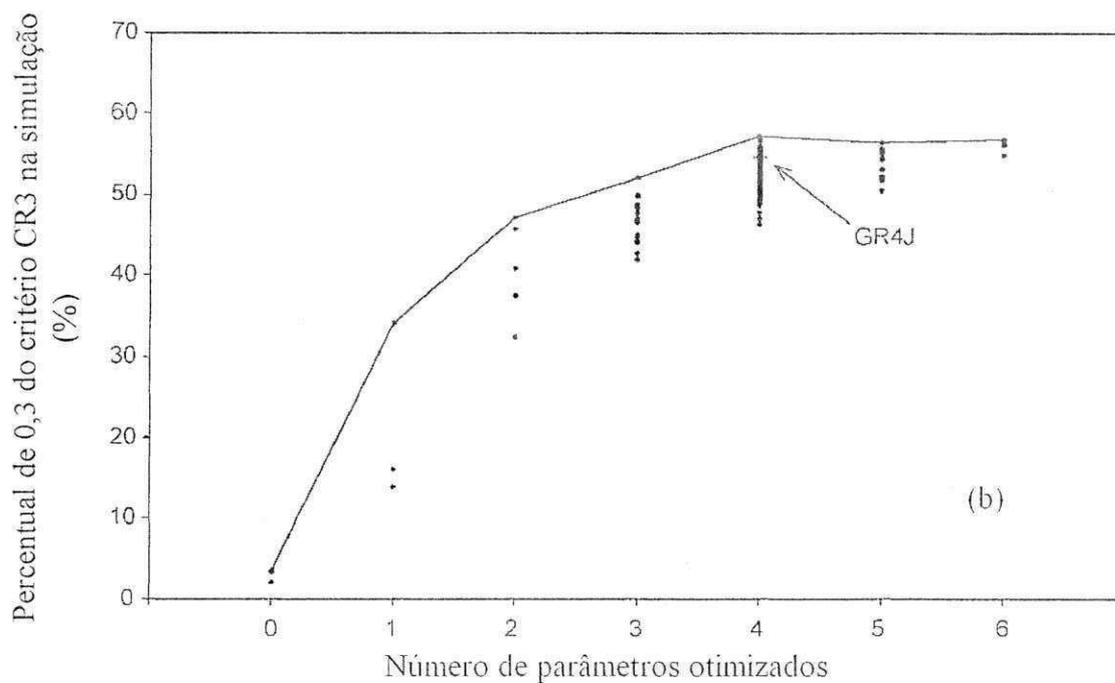
$$Q = Q_r + Q_d \quad (22)$$

O GR4J e suas versões anteriores têm sido desenvolvidos mais ao longo de linhas empíricas e para os autores, isso significa combinar corretas operações matemáticas para render os melhores resultados na saída dos modelos de transformação chuva-vazão.

O modelo GR4J apresenta versatilidade satisfatória e robustez no estudo comparativo proposto por PERRIN *et al.* (2001a). Com o uso de apenas quatro parâmetros para otimização (Tabela 3), bons resultados têm sido encontrados em vários países, além do uso por vários autores em diversos estudos hidrológicos.

A seguir são mostrados os gráficos apresentados por PERRIN *et al.* (2003) que demonstra que os quatro parâmetros escolhidos para calibração resultam em melhor desempenho do modelo.





Percentual de 0,3 do critério CR5 na simulação (%)

(c)

Número de parâmetros otimizados

Figura 9 Percentual de 0,3 das distribuições dos resultados na simulação para 235 estruturas do modelo com 0 – 6 parâmetros (a junção das curvas mostra o melhor desempenho) (a) para o critério CR1 (b) para o critério CR3 (c) para o critério CR5.

Tabela 3 Lista dos parâmetros do modelo chuva-vazão GR4J

<i>Parâmetro</i>	<i>Significado do Parâmetro</i>
x1	Capacidade do reservatório de Produção (mm)
x2	Coefficiente de troca de água (mm)
x3	Capacidade do reservatório de roteamento não-linear (mm)
x4	Tempo base da hidrógrafa unitária (dia)

Todos os parâmetros possuem valores reais. Os parâmetros x1 e x3 são positivos, x4 deve ser maior que 0,5 e x2 pode ser negativo, positivo ou zero.

A divisão de 10% e 90% da chuva efetiva, a potência usada na equação 3.6, entre outros, foram alguns dos parâmetros fixados pelos autores e essa escolha originou-se do fato desses terem manifestado os melhores resultados diante de uma variedade de testes feitos com o modelo. Se esses parâmetros não tivessem sido fixados, não afetaria os resultados, só aumentaria a complexidade do modelo.

Os algoritmos usados para otimização geralmente pedem um conjunto inicial de parâmetros. Esse conjunto pode ser de valores médios obtidos de uma grande variedade de bacias. A Tabela 4 mostra, com um intervalo de 80% de confiança, os valores médios dos quatro parâmetros obtidos pelos autores:

Tabela 4 Valores médios dos parâmetros do modelo com intervalos de confiança de aproximadamente 80%.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor médio</i>	<i>Intervalo de confiança de 80%</i>
x1 (mm)	350	100 - 1200
X2 (mm)	0	-5 a 3
X2 (mm)	90	20 - 300
X4 (mm)	1,7	1,1 - 2,9

3.4 Inicialização do sistema

O modelo requer para ser iniciado: a área da bacia, dados diários de evapotranspiração e precipitação, além dos dados diários de vazão para fins de otimização e verificação da correlação entre vazão simulada e observada. Os dados de precipitação para os anos de 1996 a 1999 foram obtidos de postos existentes ao longo da bacia de Caraúbas, sendo o mesmo procedimento realizado para a bacia do Rio do Peixe.

Visto que o modelo só trabalha com valores médios diários, calculou-se, inicialmente, a precipitação média ao longo bacia através da média aritmética simples, porém os resultados não foram satisfatórios e decidiu-se, então, utilizar o método de Thiessen para obtenção dessa precipitação média, já que esse método considera a não-uniformidade da distribuição espacial dos postos, delimitando geometricamente a área da bacia em que cada aparelho de medição exerce influência. Em relação a evapotranspiração só havia estimativa a partir de 10 de outubro de 1998, e pelos testes feitos para todos os períodos, não houve alteração na qualidade dos mesmos quando se utilizou um valor médio

igual a 5,0 mm para todos os anos. Tomou-se essa decisão porque o modelo é pouco sensível aos dados de evapotranspiração.

Um dos principais problemas enfrentados por quase todos os modelos, sejam eles conceituais ou baseados em dados físicos, é definir as condições iniciais para executá-lo. No modelo GR4J, para os valores iniciais de R_o e S_o (conteúdo dos reservatórios R e S, respectivamente) são sugeridas duas equações baseadas no dia do ano e que também foram adotadas na versão anterior do modelo, quais sejam:

$$R_o \approx X_3 \left\{ 0,40 + 0,20 \sin \left[\frac{\pi}{6} (5 - m) \right] \right\} \quad (23)$$

$$S_o \approx X_1 \left\{ 0,65 + 0,20 \sin \left[\frac{\pi}{6} (5 - m) \right] \right\} \quad (24)$$

Onde m é o mês quando R_o e S_o são calculados, x_1 a capacidade do reservatório de produção e x_3 a capacidade do reservatório de roteamento não-linear.

Para a bacia em estudo, substituindo o valor de m por um mês do ano qualquer, os dados iniciais da taxa de reabastecimento dos reservatórios apresentam aproximadamente os seguintes resultados: $R_o/x_3 \approx 0,40$ e $S_o/x_1 \approx 0,65$.

3.5 Calibração do Modelo

Devido à sua extrema parcimônia, a calibração do modelo não apresenta grandes problemas, ou seja, a otimização pode ser feita por qualquer método que se tenha disponível. Nesse trabalho foi utilizada uma ferramenta do Excel chamada Solver para otimizar os valores dos parâmetros x_1 , x_2 , x_3 e x_4 . O Solver utiliza o método conjugado ou o de Newton para achar o valor ótimo de cada parâmetro através da quantidade de

iterações escolhida. Foi escolhido sempre o segundo ano do período para calibração do modelo, pois o primeiro está reservado para o que se chama de aquecimento do modelo.

Quatro critérios foram usados para calibrar o modelo. O primeiro é o critério clássico de Nash-Sutcliffe (1970), que foi chamado de CR1. Os outros três são variações do mesmo.

$$CR1 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \right) \quad (25)$$

em que:

$Q_{obs,i}$ e $\overline{Q_{cal,i}}$ são as vazões diárias registradas e simuladas, respectivamente,

$\overline{Q_{obs}}$ é a média das vazões diárias registradas, n é o número de vazões diárias registradas.

Quando os valores dos parâmetros do modelo tendem aos valores ótimos, o termo $\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2$ tende a zero e o coeficiente de Nash-Sutcliffe tende para a unidade.

Esse primeiro critério tem ênfase na simulação dos eventos de cheia. O segundo critério de Nash-Sutcliffe (CR2) calcula a raiz quadrada da vazão transformada e é o caminho médio entre o critério CR1 e o CR3. Geralmente, esse critério é utilizado para calibração de modelos chuva-vazão.

$$CR2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{cal,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}})^2} \right) \quad (26)$$

$$CR3 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n |\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{cal,i}}|}{\sum_{i=1}^n |\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}}|} \right) \quad (27)$$

RECIBO BIBLIOTECA

O CR3 calcula o logaritmo da vazão transformada e sua ênfase está na qualidade da simulação de vazões mínimas.

O quarto critério (CR4) é baseado no erro cumulativo médio (EC) do modelo, que é definido por:

$$EC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i}) \quad (28)$$

Esse erro pode também ser escrito em termos relativos:

$$CR4 = \left[1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_{cal,i}}{i=1}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{i=1}}} - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{i=1}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_{cal,i}}{i=1}}} \right] \quad (29)$$

Esse critério avalia a habilidade do modelo para corretamente reproduzir o volume de vazão sobre o período estudado. O CR4, diferente dos outros critérios, não pode ser utilizado sozinho como critério de calibração já que ele não faz as medidas das vazões observadas em cada intervalo de tempo. Vale ressaltar ainda que os critérios não são totalmente independentes um do outro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão mostradas as figuras obtidas durante os vários ajustes do modelo GR4J para o período de 1996 a 1999. A série diária de precipitação apresentou alguns picos de cheia que perturbaram o modelo. Para minimizar seus efeitos durante o ajuste do modelo foram retirados as observações dos postos de Caraúbas e de São João do Tigre. A Figura 10 mostra os valores diários de precipitação dos postos da bacia de Caraúbas utilizados no trabalho e a Figura 11 o hietograma para o período de 1996 a 1999.

Apenas o ajuste feito na bacia de Caraúbas, durante o período de 1996-1999 apresentou bons resultados. Foram feitos ajustes usando-se os três primeiros critérios de Nash-Sutcliffe. O primeiro e o terceiro critérios foram usados para analisar os casos de vazões mínimas e de cheias, respectivamente, e o segundo critério foi usado para analisar situações mais gerais, já esse modelo não é tão usado para situações particulares como as vazões mínimas e de cheias.

Um fator importante a ser analisado nesse trabalho é que o modelo GR4J foi exaustivamente testado em áreas úmidas da Europa e até em regiões semi-áridas da Austrália, porém com características bem diferentes das apresentadas no semi-árido

paraibano. Especificamente, a bacia de Caraúbas possui rios efêmeros e que são, usualmente, bastante difíceis de modelar.

Estudos feitos no CEMAGREF (Unidade de Pesquisas Hidrológicas e Qualidade da Água – França) por PERRIN *et al.* (2003) com bacias da França, no verão e na primavera, do ano de 1976 (período de seis meses de seca) para testar a eficiência do modelo GR4J, mostraram que o modelo se comporta bem em regiões semi-áridas, pois o ajuste foi feito em condições semelhantes às apresentadas em zonas tropicais. Em trabalho realizado pelos mesmos autores em 2001 para avaliar o desempenho de diversos modelos com complexidade variada (TOPMODEL, TANK, IHACRES, ARNO, GR3J, entre outros) foram feitos testes em 429 bacias da Austrália, Estados Unidos, França, Costa do Marfim e Brasil. No Brasil foram feitos testes em quatro sub-bacias da bacia do Rio São Francisco, em Minas Gerais, onde predomina o clima úmido com média anual de chuva de cerca de 1500mm. Na França, onde foram testadas 26 bacias, temos um quadro mais parecido com o do semi-árido paraibano, as condições climáticas variam do tropical úmido ao semi-árido. Em todos os ajustes com o modelo GR3J se mostrou consistente mesmo diante de condições climáticas diversas.

AUBERT *et al.* (2003) ao analisar a assimilação seqüencial da umidade e dados de vazão no modelo GR4J na bacia do Rio Seine na França para os anos de 1999-2000, avaliaram que o critério de Nash-Sutcliffe chegou a 92,2% e que o valor da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) chegou a 0,29 mm/dia. Ou seja, o modelo apresentou resultados satisfatórios.

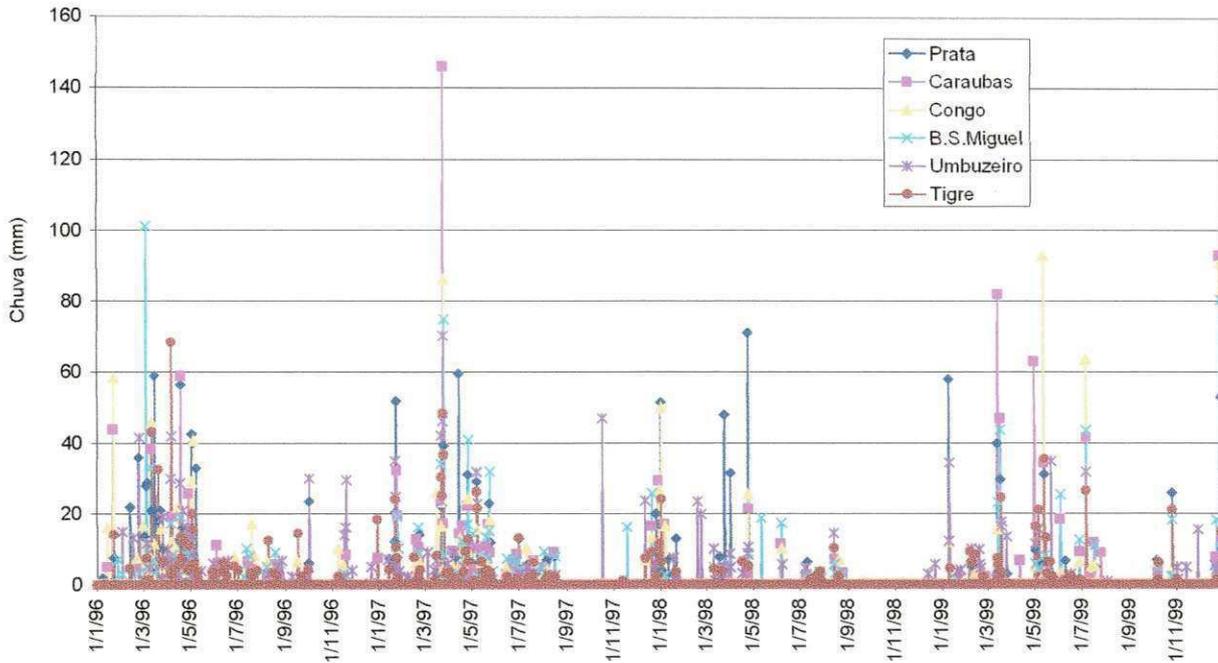


Figura 10 Valores diários de precipitação em mm para cada posto da bacia de Caraúbas.

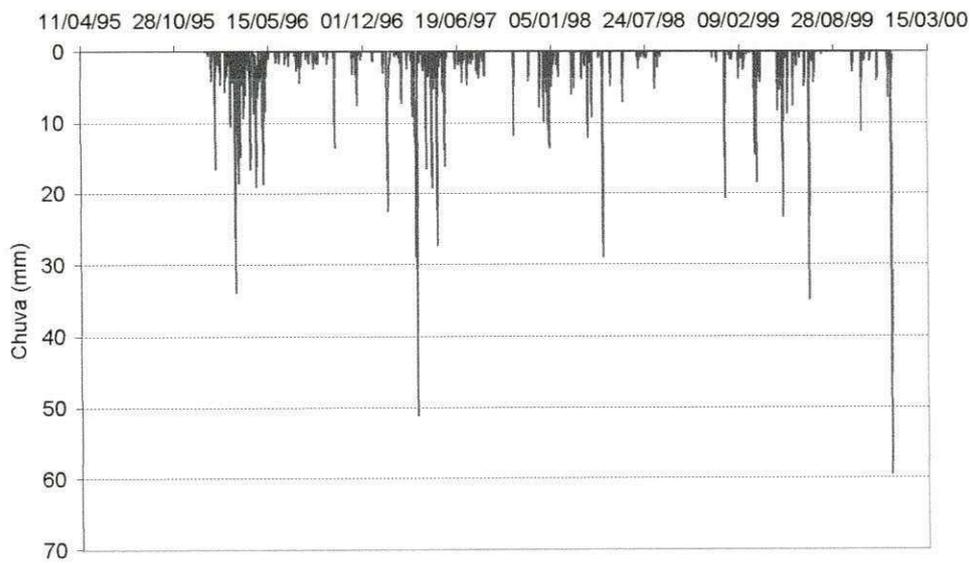


Figura 11 Hietograma para o período de 1996-1999

Para o período de 1996 a 1999, com otimização segundo o método de Newton, utilizou-se o critério de Nash-Sutcliffe para avaliar a performance do modelo. As Figuras 12 e 13 mostram a evolução na taxa de reabastecimento dos reservatórios de produção e roteamento não-linear. Os gráficos da taxa de evolução dos reservatórios, bem como os hidrogramas das vazões observadas e simuladas, quando se utiliza o segundo e o terceiro critérios de Nash-Sutcliffe, não sofrem grandes alterações.

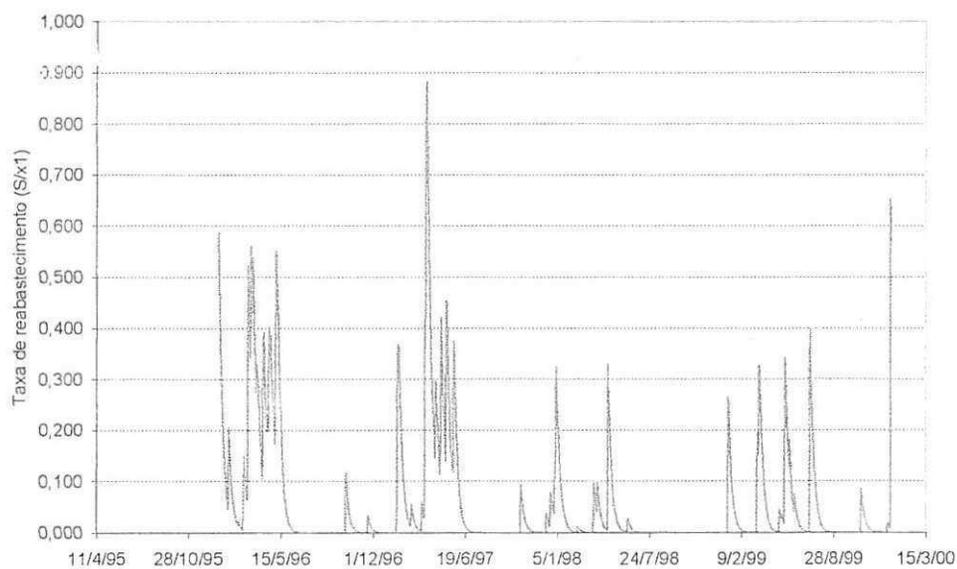


Figura 12 Evolução da taxa de reabastecimento do reservatório de produção usando o primeiro critério de Nash-Sutcliffe (1996-1999)

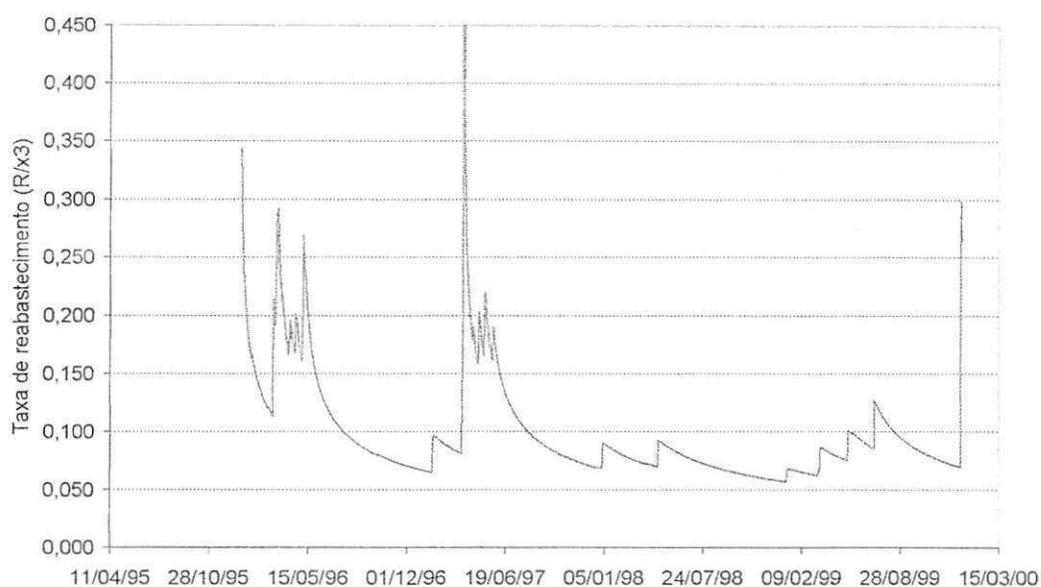


Figura 13 Evolução da taxa de reabastecimento do reservatório de roteamento não-linear (1996-1999) usando o primeiro critério de Nash-Sutcliffe.

A Figura 14 mostra os hidrogramas gerados das vazões simuladas e observadas para o período 1996-1999, utilizando-se o primeiro critério de Nash-Sutcliffe. Como mencionado no início deste capítulo o dia 26 de março de 1997 apresentou um pico de cheia de 64,55 mm, depois de retirado os postos que perturbavam o modelo, esse valor chegou a aproximadamente 51 mm. O modelo conseguiu fazer uma boa simulação nesse período. O valor da vazão observada para o dia em questão foi de 4,299 mm/dia e a vazão simulada pelo modelo foi de 4,302 mm/dia. O desempenho satisfatório do modelo pode ser observado pelo valor de R^2 mostrado na Figura 15, que foi de aproximadamente 75%, porém, uma melhor avaliação do desempenho do modelo é feita observando-se o critério de Nash-Sutcliffe, que no período simulado chegou a 97%.

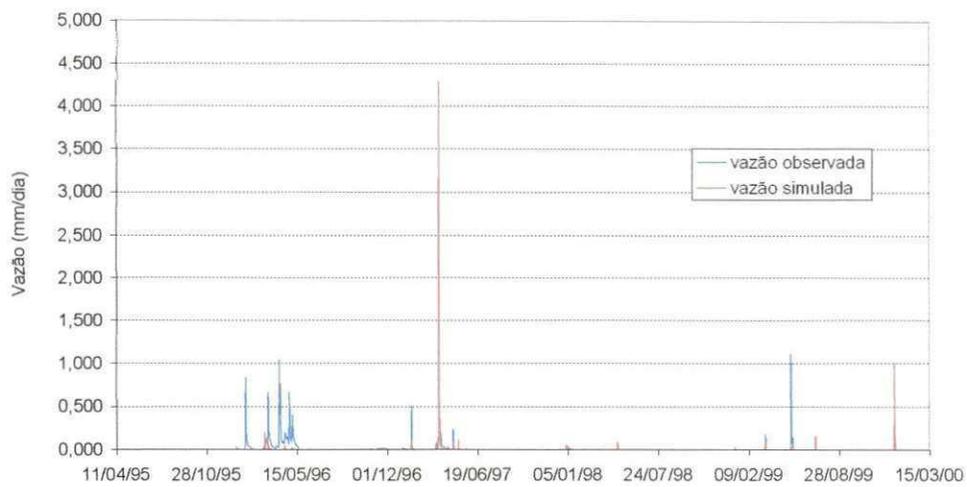


Figura 14 Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1996-1999) para o primeiro critério de Nash-Sutcliffe.

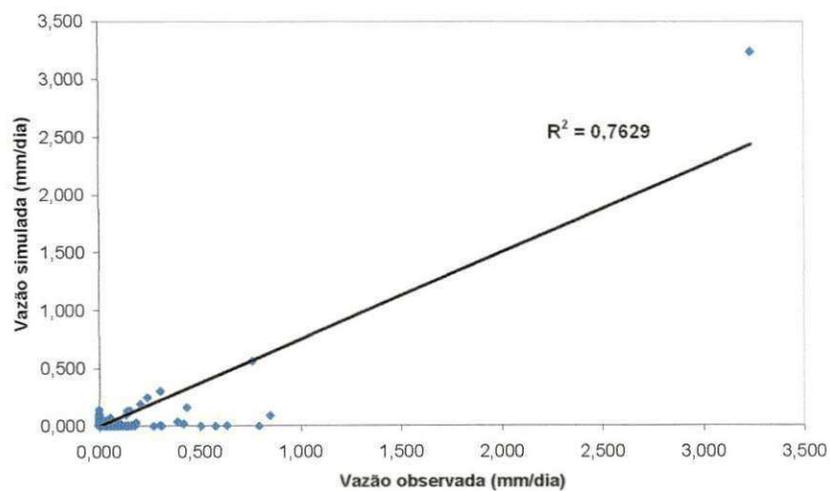


Figura 15 Gráfico da correlação entre vazão observada e vazão simulada (1996-1999) para o primeiro critério de Nash-Sutcliffe.

Para o mesmo período, 1996 a 1999, usando método de otimização de Newton, utilizou-se o segundo critério de Nash-Sutcliffe para avaliar a performance do modelo. A Figura 16 apresenta os hidrogramas de vazão observada e simulada e na Figura 17 a correspondente correlação entre elas. Pode-se observar o discreto aumento no valor do coeficiente de correlação ($R^2 \approx 75\%$) em relação ao apresentado quando o primeiro critério de Nash-Sutcliffe foi utilizado ($R^2 \approx 74\%$). Esses valores de R^2 indicam que os dados de vazão observada se aproximam razoavelmente dos dados de vazão simulada.

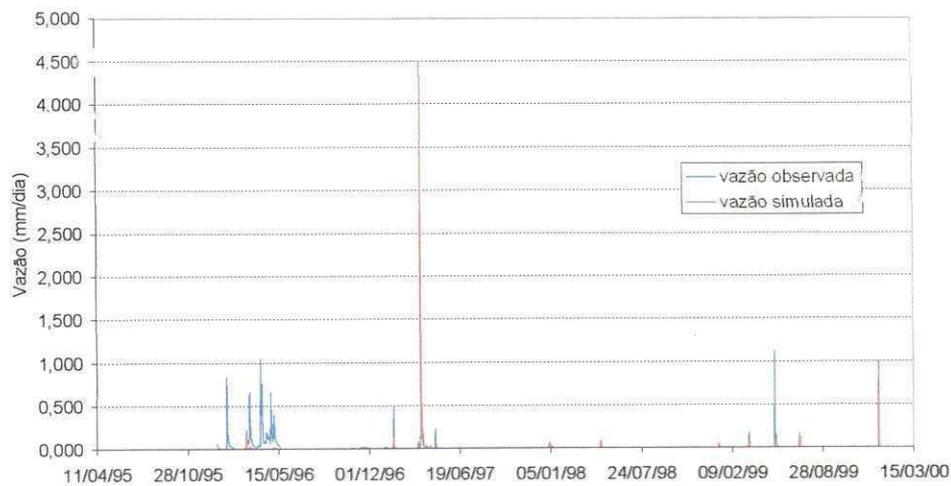


Figura 16 Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1996-1999) para o segundo critério de Nash-Sutcliffe.

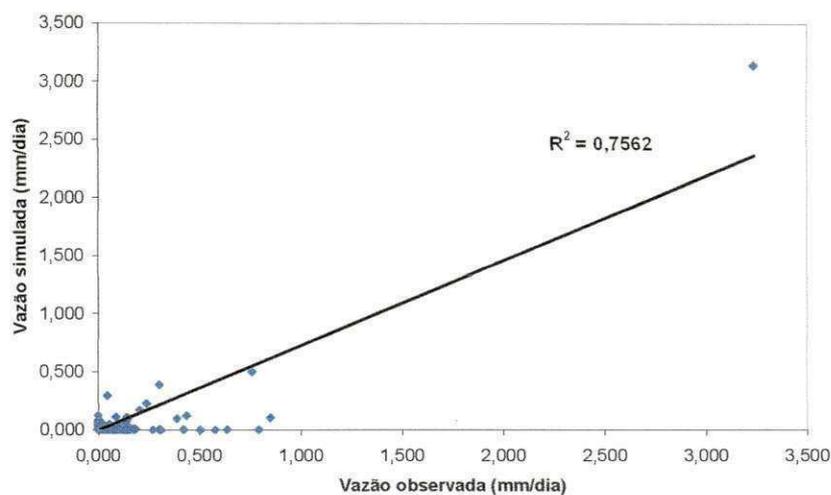


Figura 17 Gráfico da correlação entre vazão observada e vazão simulada (1996-1999) para o segundo critério de Nash-Sutcliffe.

Utilizando-se agora do terceiro critério de Nash-Sutcliffe para avaliar a performance do modelo, observa-se que não houve boa correlação entre os dados de vazão observada e simulada. É visível na Figura 18 o pico nos dados de vazão para o dia 26 de março de 1997. Enquanto a vazão observada foi de 4,299 mm/dia, a vazão simulada chegou a 2,809 mm/dia. Justifica-se, portanto, a queda no valor de R^2 em relação aos ajustes anteriores (Figura 19).

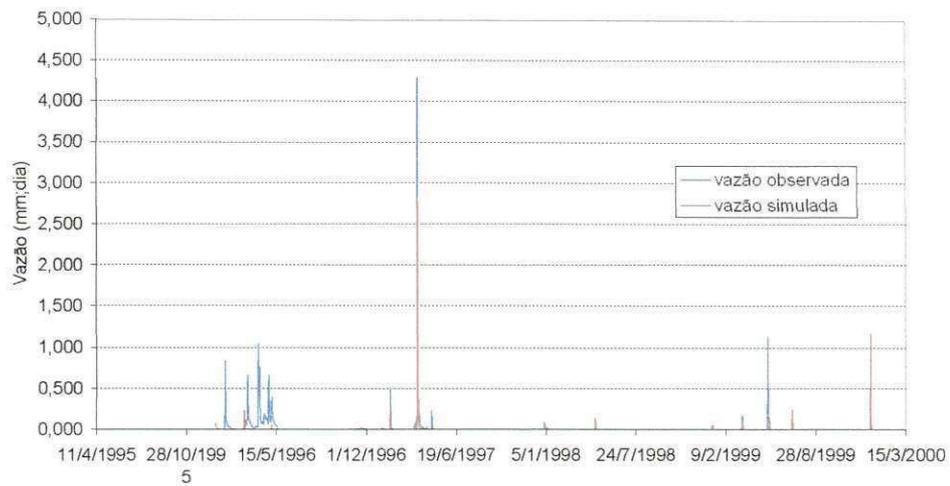


Figura 18 Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1996-1999) para o terceiro critério de Nash-Sutcliffe.

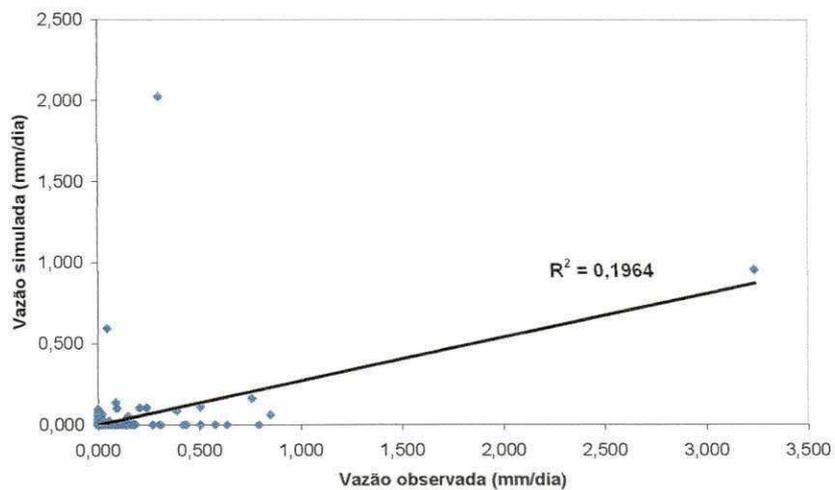


Figura 19 Gráfico da correlação entre vazão observada e vazão simulada (1996-1999) para o terceiro critério de Nash-Sutcliffe.

O modelo GR4J é um modelo que incorpora informações de umidade do solo, através da função de percolação. O solo do semi-árido paraibano é considerado um solo “raso”, então pelo que foi visto na seção 2.4.3 do capítulo 2, pode-se concluir que esse tipo de solo fará o modelo se comportar de maneira a não apresentar resultados tão bons quanto o esperado.

A simulação para o período de 1996-2002 ocasionou valores não satisfatórios para as funções estatísticas estudadas. Houve baixa correlação entre as vazões observadas e simuladas. Esse resultado pode estar relacionado à baixa qualidade dos dados coletados, além do baixo armazenamento subterrâneo de água. A simulação para o terceiro critério de Nash-Sutcliffe nesse período foi a que apresentou os piores resultados (Anexos).

É importante salientar que os resultados obtidos com a aplicação do modelo GR4J à bacia de Caraúbas são resultados pouco confiáveis, principalmente devido à baixa qualidade dos dados de precipitação e vazão. A estrutura do modelo, exaustivamente testada pelos autores, mostra que apesar de se tratar de um modelo conceitual e concentrado, apresentou resultados bastante satisfatórios em vários ajustes efetuados durante a elaboração do modelo e posteriormente com seu uso em outros trabalhos (AUBERT *et al.*(2003), PERRIN *et al.*(2001a), ANDRÉASSIAN *et al.*(2001), ANDRÉASSIAN *et al.*(2002), ANDRÉASSIAN *et al.*(2003), ANDRÉASSIAN *et al.*(2004)), dentre outros.

Apesar da baixa qualidade nos dados de entrada do modelo pode-se dizer que o modelo no período de 1996-1999 apresentou resultados satisfatórios, visto que o critério de Nash-Sutcliffe sempre foi maior que 95% em todos os ajustes. NASH e SUTCLIFFE (1970) afirmam que não há um teste objetivo para a significância do critério Nash-Sutcliffe porque os graus de liberdade dos modelos não são conhecidos, porém de

um modo prático, um critério com menos que 60% não permite um ajuste satisfatório entre as hidrógrafas observadas e simuladas.

Na Figura 20 é mostrado o gráfico de distribuição de frequência da precipitação diária dos seis postos localizados na bacia de Caraúbas.

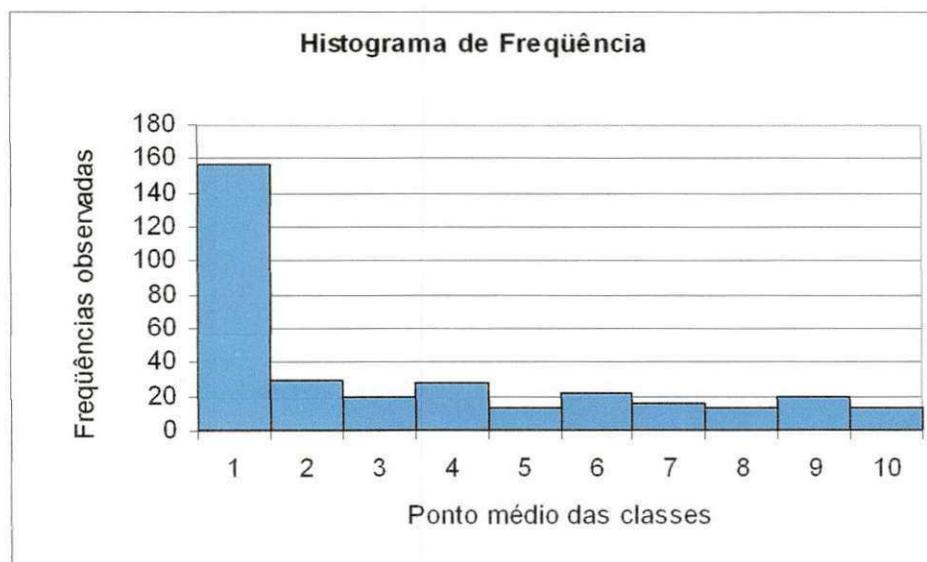


Figura 20 Histograma de Frequência da precipitação diária dos seis postos localizados na bacia de Caraúbas

O modelo GR4J apresentou alguns resultados satisfatórios durante o ajuste em um dos períodos de simulação e em outros, resultados não tão satisfatórios. Os ajustes foram realizados para os períodos de 1996 a 1999 e 1996 a 2002 para a bacia de Caraúbas e para o período de 1999 a 2002 para a bacia do Rio do Peixe (Anexos). Uma das principais dificuldades encontradas durante o trabalho foi a pouca disponibilidade de dados observados de vazão a fim de se efetivar testes de correlação entre esses e os dados simulados, oferecendo um critério de avaliação para o modelo. O coeficiente de determinação (R^2) serviu como estatística, além do critério de Nash-Sutcliffe, para avaliar o ajuste do modelo.

A região semi-árida apresenta certas peculiaridades, geralmente com baixas vazões contrastando com pequenos períodos de cheias marcantes. Diante desse cenário e de dificuldades supracitadas, o modelo apresentou resultados bastante contraditórios. Esperava-se um valor de R^2 melhor para os ajustes avaliados pelo terceiro critério de Nash-Sutcliffe em todos os períodos simulados, visto que este critério avalia a qualidade das vazões mínimas, porém o que se viu em diversas ocasiões foi o primeiro e o segundo critérios apresentando resultados mais consistentes, como mostram as Figuras 15, 17 e 19. O primeiro critério de Nash-Sutcliffe dá ênfase apenas à simulação de eventos de cheia. Isso é justificado porque o terceiro critério faz com que os erros do modelo tenham um peso similar na soma de todos os erros. Assim, o modelo não tenta, especificamente, reproduzir os picos de cheia, mas coloca bastante ênfase nas vazões mínimas. Em todos os ajustes, mas principalmente no período de 1996 a 1999, no dia 26 de março de 1997 ocorreu uma chuva de 64,55 mm. Como mencionado acima, o modelo reagiu de maneira não esperada quando seu desempenho foi avaliado pelo terceiro critério de Nash-Sutcliffe.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados deste trabalho, obtidos no capítulo anterior, pode-se concluir que:

O modelo GR4J apresenta resultados satisfatórios quando aplicado a regiões de clima semi-árido como as do Cariri paraibano, embora poderia se ter melhores resultados se os dados de precipitação, evapotranspiração e vazão fossem mais confiáveis.

Alguns resultados da aplicação do modelo, porém, não foram satisfatórios, como, por exemplo, os ajustes feitos para a bacia hidrográfica do Rio do Peixe. Esperava-se um melhor desempenho do modelo, visto que os dados de precipitação e vazão parecem ser mais confiáveis.

O solo da região semi-árida é geralmente pouco profundo, talvez tenha sido esse o motivo para que houvesse resultados contrastantes quando da aplicação do modelo. Sugere-se a melhoria da qualidade de medição de vazões, a fim de que se possa ajustar melhor os modelos hidrológicos e proporcionar estimativas confiáveis de vazões. Essas estimativas são de grande valia tanto para o gerenciamento de recursos hídricos da bacia hidrográfica em estudo quanto para bacias hidrográficas com características físicas similares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL 1999, **Atlas Hidrológico do Brasil**, Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cgrh/atlas/girh> . Acesso em: 25 de maio de 2004.

ANDREASSIAN V., PERRIN C., MICHEL C., **Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models**, J. of Hydrology, v. 286, 19-35, 2004.

ANDREASSIAN V., ODDOS A., MICHEL C., PERRIN C., CEMAGREF ANTONY QHAN, **Chimera watersheds to understand the relative importance of rainfall distribution in semi-distributed rainfall-runoff models**, 17th conference on hydrology, Long Beach, USA, 7 p, 2003.

ANDRÉASSIAN, V., PARENT, E., MICHEL, C., **Using a parsimonious rainfall-runoff model to detect non-stationarities in the hydrological behaviour of watersheds**. First biennial meeting of the International Environmental Modelling and Software Society

(iEMSs), 24-27 juin 2002, Lugano. V. 1, pp 458-463. 2002. Disponível em: <http://www.iemss.org/iemss2002/>. Acesso em: 02 agosto 2004.

ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C., MICHEL, C., USART-SANCHEZ, I., LAVABRE, J., **Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models**, J. of Hydrology 250 (1-4), 206-223, 2001.

AMORIM, R.F., **Estimativa de parâmetros hidrológicos de uma pequena bacia de drenagem na região central de São Paulo**. Botucatu, pg.132, 1995.

AUBERT D., LOUMAGNE C., OUDIN L., CEMAGREF ANTONY QHAN, **Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall-runoff model**, J. of hydrology, v. 280, nº 1-4, p. 145, 2003.

BARBALHO, V. M. S., **Sistemas baseados em conhecimento e lógica difusa para simulação do processo chuva-vazão**, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, 2001.

BÁRDOSSY, A., **The use of fuzzy rules for description of elements of the hydrological cycle**, Ecological Modelling 85, 59-65, 1996.

BEVEN, K. J., **Rainfall-Runoff Modelling – The Primer**, ed.Wiley, p. 1-4. Londres, Inglaterra, 2001.

BRAGA, R., **O Processo de Desenvolvimento de um Modelo**, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2002.

CANEDO, P. M., **Hidrologia Superficial**, In: Engenharia Hidrológica, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 1 ed., Capítulo 4, Rio de Janeiro, Editora da UFRJ, 1989.

CHIEW, F. H. S., STEWARDSON, M. J., McMAHON, T. A., **Comparison of Six Rainfall-Runoff Modelling Approaches**, J. Hydrology, v.147, 1-36, 1993.

CIRILO, J. A., AZEVEDO, J. R. G. e MONTENEGRO, S. M. G. L., **Modelos de Simulação Hidrológica Aplicados a Bacias Hidrográficas do Estado de Pernambuco**, I Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Recife, PE, 1992.

DINIZ, L. S., **Calibração Automática de Modelos Chuva-vazão usando um Algoritmo Genético**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1994.

DURRANS, S. R., BURIAN, S. J., PITT, R., **Enhancement of Precipitation Data for Small Storm Hydrologic Prediction**, J. Hydrology, v. 299, 180-185, 2004.

EDIJATNO, NASCIMENTO, N. O., YANG, X., MAKHLOUF, Z., MICHEL, C., **GR3J: a daily watershed model with three free parameters**, Hydrological Sciences Journal, v.44, 263-277, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, **Guia das Cidades**, Disponível em <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php> . Acesso em: 10 de outubro de 2004.

MOTA, J. L. O., **Modelos Matemáticos y su Aplicacion al Manejo de Cuencas Hidrográficas**, IX Congreso Nacional de Irrigación, Sinaloa, México, 1999.

NASH, J. E. & SUTCLIFFE, J. V., **River Flow Forecasting through Conceptual Models**, J. Hydrology, v. 10, 282-290, 1970.

NETO, J. V. F., **Aplicação do Modelo KWM - Kentucky Watershed Model – em Bacias da Região Semi-árida do Nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1995.

NIEL, H., PATUREL, J., SERVAT, E., **Study of parameter stability of a lumped hydrological model in a context of climatic variability**, J. Hydrology, v.278, 213-230, 2003.

OLIVEIRA, L. C. K., **Papel do Monitoramento e da Previsão de Vazões no Gerenciamento de Bacias Hidrográficas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, M. Q. C., **Impacto De Mudanças No Uso Do Solo Nas Características Hidrossedimentológicas Da Bacia Hidrográfica Do Rio Joanes E Sua Repercussão Na Zona Costeira**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia –

Bahia, 1991. Disponível em http://www.geocities.com/hidrologia2000/MQC_7.htm.
Acesso em: 31 maio 2004.

ÖZELKAN, E. C., DUCKSTEIN, L., **Fuzzy Conceptual Rainfall-Runoff Models**, J. Hydrology, v. 253, 41-68, 2001.

PASSERAT DE SILANS, A. M. B; ALMEIDA, C. N., ALBUQUERQUE, D. J. S.; PAIVA, A. E. D. B, **Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio do Peixe – Estado da Paraíba**, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 5 No. 3., 2000.

PERRIN, C., MICHEL, C., ANDRÉASSIAN, V., **Improvement of a Parsimonious Model for Streamflow Simulation**, J. Hydrology, v. 279, 275-289, 2003.

PERRIN, C., MICHEL, C., ANDRÉASSIAN, V., **State-of-the-art for Precipitation-Runoff Modelling**, in State-of-the-art Report on QA guidelines, CEMAGREF, França, 2002.

PERRIN, C., MICHEL, C., ANDRÉASSIAN, V., **Does a Large Number of Parameters Enhance Model Performance? Comparative Assessment of Common Catchment Model Structures on 429 Catchments**, J. Hydrology, v. 242, 275-301, 2001a.

RENNÓ, C. D.; SOARES J. V., **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**, Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas Ação "Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental" - Relatório Técnico Parcial – INPE, 2000.

SEIBERT, J., **Conceptual Runoff Models – fiction or representation of reality?** , Acta Univ. Ups., Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 436. 52pp, 1999.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS DE CAMPINA GRANDE - SEMARH/CG, **Bacias Hidrográficas**, Campina Grande/PB, 2004.

SILVA, L. P., COSTA, F. S. OLIVEIRA, L. C. K., GUILHON, L. G. F. , **SISCV – Sistema de Previsão Determinístico para Suporte a Operação de Reservatórios de Aproveitamentos Hidrelétricos** In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, 2001.

SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste 1975. Recife – PE.

TODINI, E., **The ARNO rainfall-runoff model**, J. Hydrology, v. 175, 339-382, 1996.

TODINI, E., **Rainfall-runoff modeling – Past, present and future**, J. Hydrology, v. 100, 341-352, 1988.

TUCCI, C. E. M., **Recursos Hídricos e Conservação do Alto Paraguai**, publicado na Revista da ABRH em edição especial sobre o Pantanal ou Centro Oeste, 2002.

TUCCI, C. E. M., **Modelos Hidrológicos**, 1.ed, Editora da Universidade, UFRGS/ABRH, Porto Alegre, RS, 1998.

TUCCI, C. E. M., **Modelos Matemáticos de Previsão em Tempo Atual**, In: Pessoa, M. L., Mine, M. R. M., Leite, E. L. coordenadores, *Meteorologia e Hidrologia: aspectos e considerações no contexto brasileiro*, 1 ed, FINEP, Curitiba, PR, 1994.

TUCCI, C. E. M., **Modelos Determinísticos**, In: Barth, F.T, et al., *Modelos para gerenciamento de recursos hídricos*, 1 ed, Capítulo 3, Nobel/ABRH, São Paulo, SP, 1987.

U. S. ARMY ENGINEER DIVISION, **Program Description & User Manual for SSARR Model Streamflow Synthesis & Reservoir Regulation**, 724-K5-G0010, North Pacific, Portland, Oregon, USA, 1975.

VILLELA, S., MATTOS, A., **Hidrologia Aplicada**, ed.McGraw-Hill, p.244. São Paulo, SP, 1975

XAVIER, L. N. R., **Análise da Incerteza Causada pela Representação da Precipitação no Modelo TOPMODEL**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, 2002.

XIONG, L., GUO, S., **A Two-Parameter Monthly Water Balance Model and Its Application**, *J. Hydrology*, v. 216, 111-123, 1999.

ANEXOS

A sub-rotina MODEL calcula a vazão a partir dos dados de entrada P e E, e a variável de estado V no início do intervalo de tempo.

SUBROTINA MODEL (X,V, P, E, Q)

PARAMETER (NPX=4, NH=7)
DIMENSION V(*), X(*)

C Produção:

```
IF(P.GE.E)THEN
ES=0.
WS=(P-E)/X(1)
IF(WS.GT.13)WS=13
PS=X(1)*(1.-(V(1)/X(1))**2.)*tanh(WS)/(1.+V(1)/X(1)*tanh(WS))
PR=P-E-PS
ELSE
    WS=(E-P)/X(1)
IF(WS.GT.13)WS=13
ES=V(1)*(2.-V(1)/X(1))*tanh(WS)/(1.+(1.-V(1)/X(1))*tanh(WS))
PS=0.
PR=0.
ENDIF
V(1)=V(1)-ES+PS
```

C Percolação:

```
S2=V(1)/(1+(V(1)/2.25/X(1))**4.）**0.25)
PERC=V(1)-S2
V(1)=S2
PR=PR+PERC
```

C UH1:

```
DO 1 K=1,NH-1
V(2+K)=V(3+K)+X(NPX+K)*PR
1 CONTINUE
V(2+NH)=X(NPX+NH)*PR
```

C UH2:

```
DO 2 K=1,2*NH-1
V(2+NH+K)=V(3+NH+K)+X(NPX+NH+K)*PR
2 CONTINUE
V(2+3*NH)=X(NPX+3*NH)*PR
```

C Troca de água:

```
ECH=X(2)*(V(2)/X(3))**3.5
```

C Cálculo de QR (reservatório de roteamento):

```

V(2)=max(0.,V(2)+V(3)*0.9+ECH)
R2=V(2)/(1+(V(2)/X(3))**4.)**(0.25)
QR=V(2)-R2
V(2)=R2

```

C Cálculo de QD:

```

QD=MAX(0.,V(3+NH)*0.1+ECH)

```

C Vazão total:

```

Q=QR+QD

```

END

SUBROTINA UH1(V,C)

```

PARAMETER (NPX=4,NH=7)
DIMENSION XV(*)
DO 1 I=1,NH
X(NPX+I)=SS1(I,C)-SS1(I-1,C)
1 CONTINUE

```

END

FUNÇÃO SS1(I,C)

```

FI=I
IF(FI.LE.0.)THEN
SS1=0.
RETURN
ENDIF
IF(FI.LT.C)THEN
SS1=(FI/C)**2.5
RETURN
ENDIF
SS1=1.

```

END

SUBROTINA UH2(V,C)

```

PARAMETER (NPX=4,NH=7)
DIMENSION XV(*)
DO 1 I=1,2*NH
X(NPX+NH+I)=SS2(I,C)-SS2(I-1,C)
1 CONTINUE

```

END

FUNÇÃO SS2(I,C)

```
FI=I
IF(FILE.0.)THEN
SS2=0.
RETURN
ENDIF
IF(FILE.C)THEN
SS2=0.5*(FI/C)**2.5
RETURN
ENDIF
IF(FI.LT.2.*C)THEN
SS2=1.-0.5*(2.-FI/C)**2.5
RETURN
ENDIF
SS2=1.

END
```

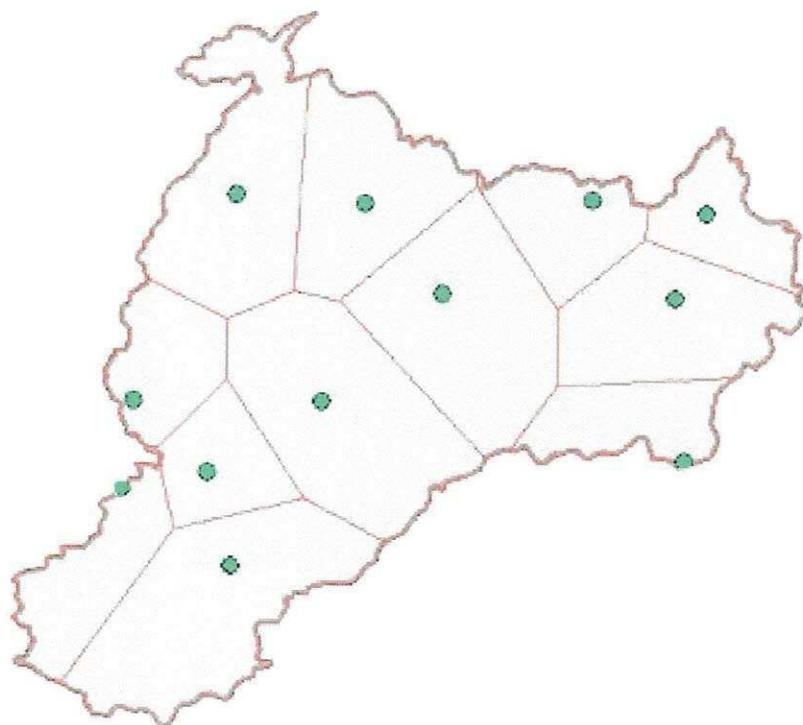


Figura A - Mapa da bacia hidrográfica do Rio do Peixe com a indicação das estações fluviométricas usadas na simulação e os polígonos de Thiessen.

Os postos pluviométricos da bacia do Rio do Peixe utilizados para utilização no modelo, suas longitudes e latitudes, são mostrados na Tabela A abaixo:

Tabela A Dados dos postos pluviométricos da bacia do Rio do Peixe

<i>Número do Posto</i>	<i>Nome do Posto</i>	<i>Latitude(graus)</i>	<i>Longitude(graus)</i>
3833588	Aparecida	-6,7864	-38,0847
3832671	Bom Jesus	-6,8156	-38,6544
3832589	Açude Lagoa do Arroz (Cajazeiras)	-6,7986	-38,5681
3832789	Cajazeiras	-6,8942	-38,5444
3853068	Lastro	-6,5169	-38,1792
3833092	Santa Cruz	-6,5308	-38,0631
3832475	Santa Helena	-6,7253	-38,6431
3833285	São Francisco	-6,6178	-38,0947
3833413	Antenor Navarro (São José do Rio do Peixe)	-6,7253	-38,4519
3833235	Sítio São Vicente (Sousa)	-6,6142	-38,3303
3832089	Barra do Juá (Triunfo)	-6,5142	-38,5392
3833018	Uiraúna	-6,5231	-38,4092

Simulação com o modelo GR4J na bacia de Caraúbas para o período 1996-2002 utilizando os três critérios de Nash-Sutcliffe para análise da performance do modelo.

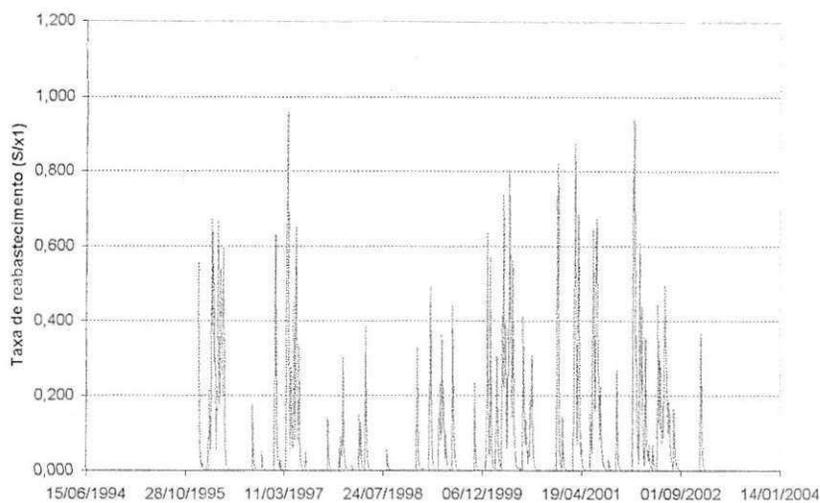


Figura A.1 Evolução da taxa de reabastecimento do reservatório de produção para o período de 1996-2002.

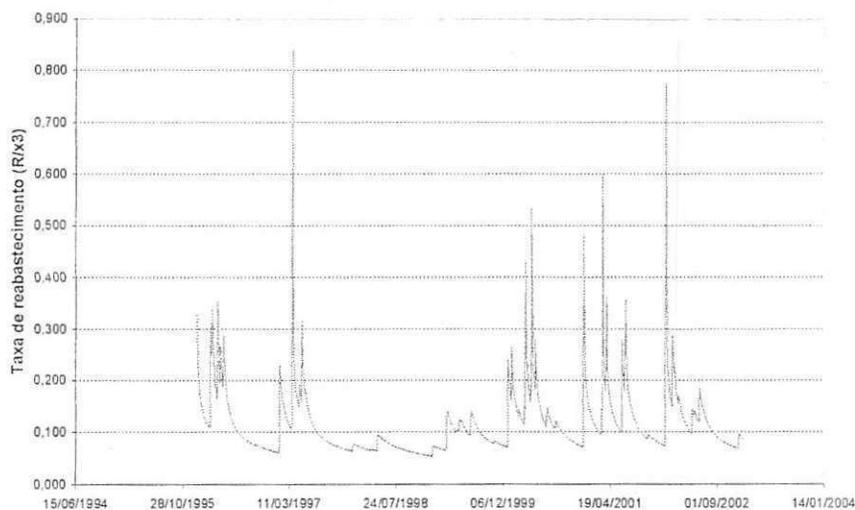


Figura A.2 Evolução da taxa de reabastecimento do reservatório de roteamento não-linear para o período de 1996-2002.

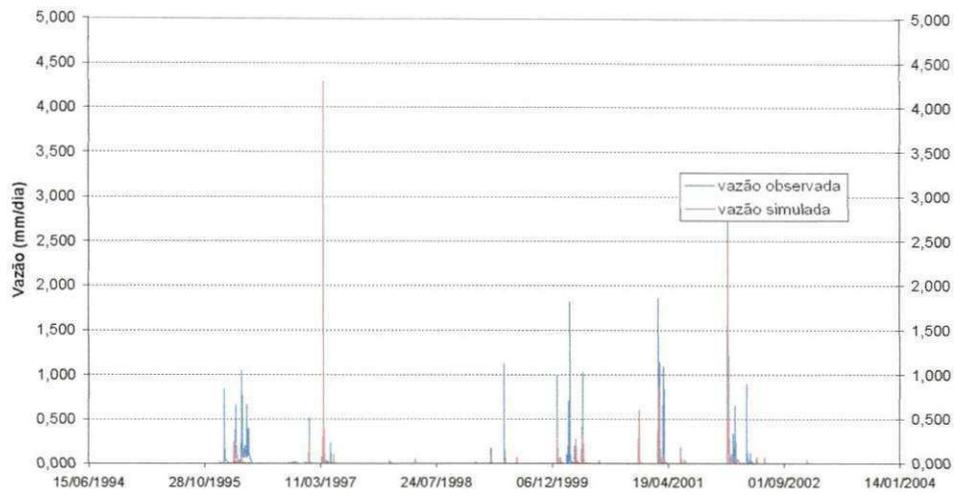


Figura A.3 Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1996-2002) para o primeiro critério de Nash-Sutcliffe.

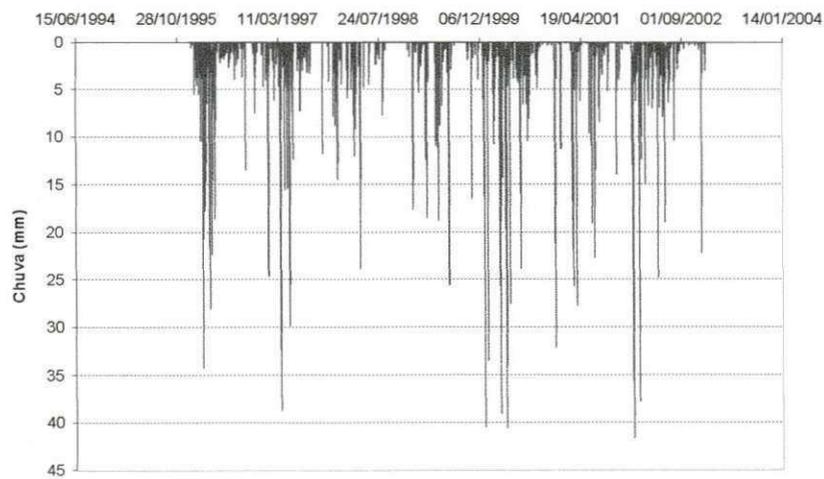


Figura A.4 Hietograma para o período de 1996-2002

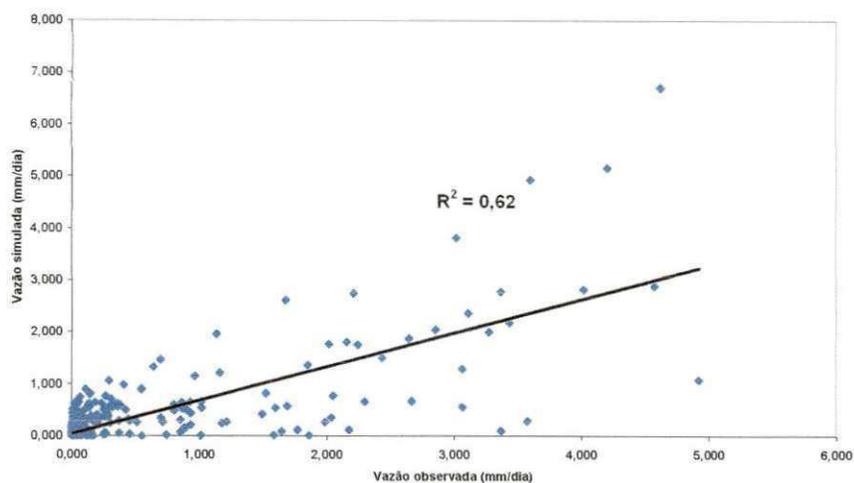


Figura A.5 Gráfico da correlação entre vazão observada e vazão simulada (1996-2002) para o primeiro critério de Nash-Sutcliffe.

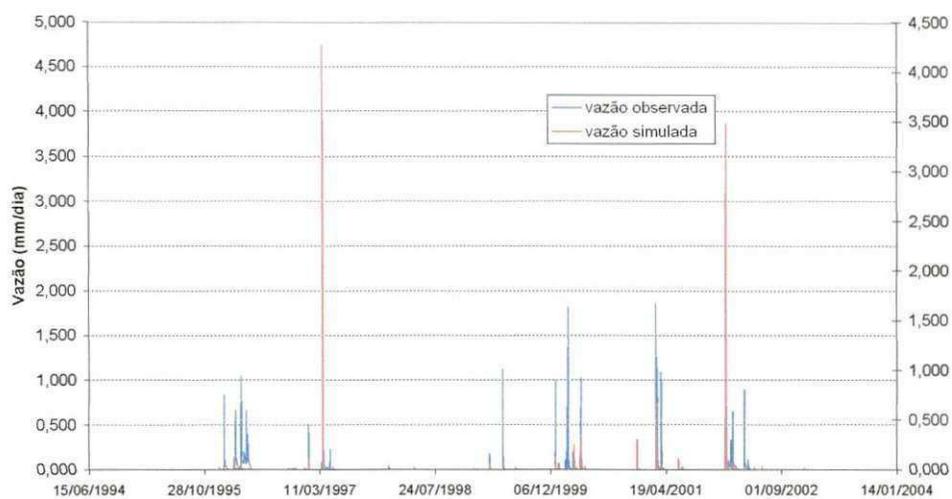


Figura A.6 Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1996-2002) para o segundo critério de Nash-Sutcliffe.

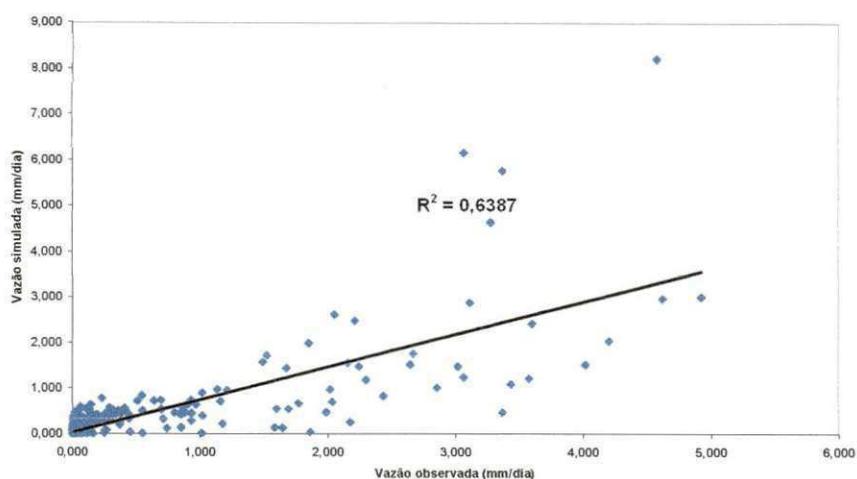


Figura A.7 Gráfico da correlação entre vazão observada e vazão simulada (1996-2002) para o segundo critério de Nash-Sutcliffe.

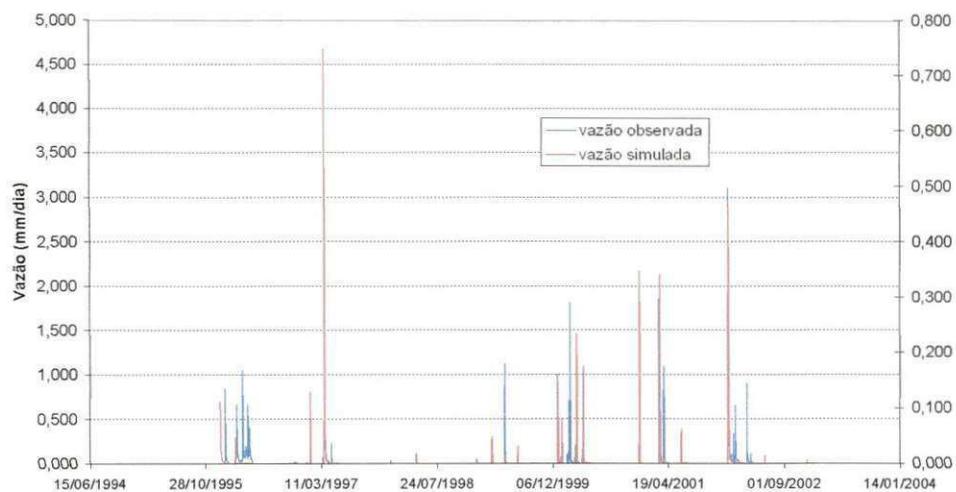


Figura A.8 Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1996-2002) para o terceiro critério de Nash-Sutcliffe.

Simulação com o modelo GR4J na bacia hidrográfica do Rio do Peixe para o período 1999-2001 utilizando os três critérios de Nash-Sutcliffe para análise de performance do modelo.

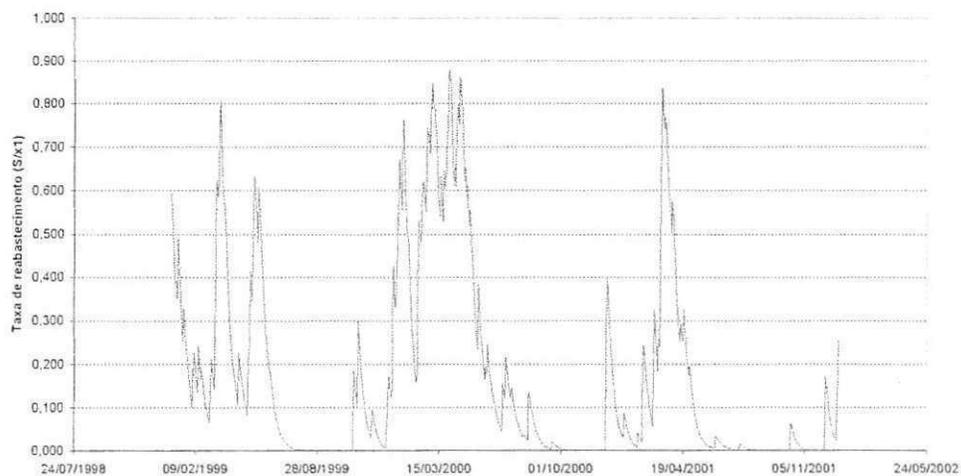


Figura A.10 Evolução da taxa de reabastecimento do reservatório de produção para o período de 1999-2001.

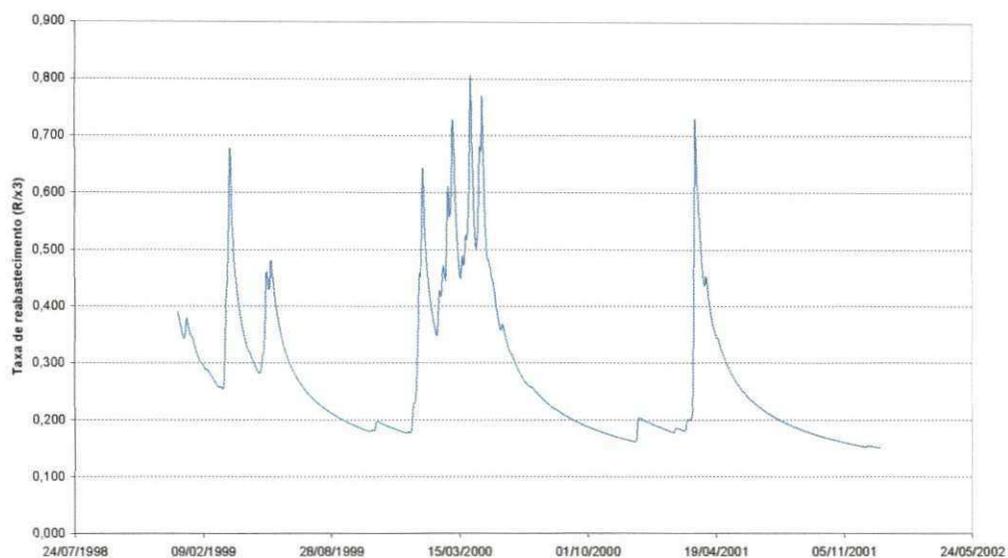


Figura A.11 Evolução da taxa de reabastecimento do reservatório de roteamento não-linear para o período de 1999-2001.

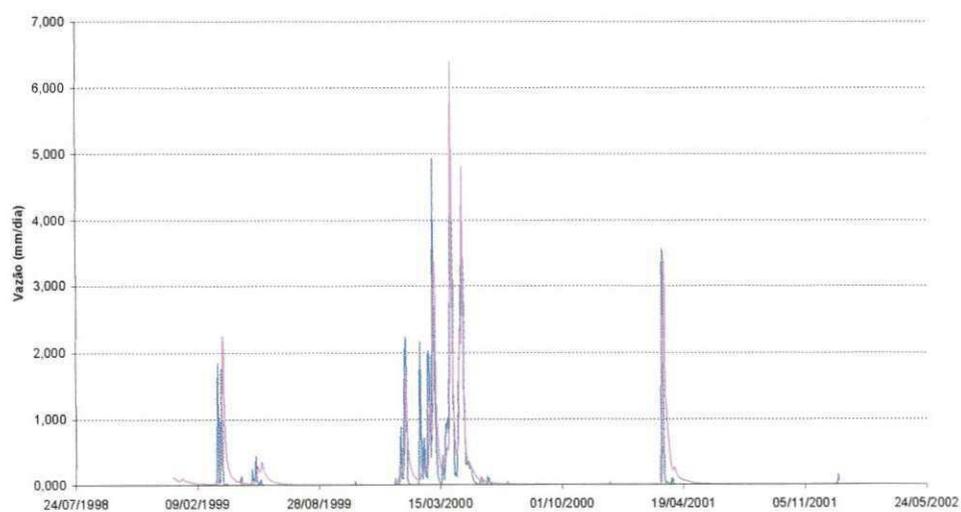


Figura A.11 Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1999-2001) para o primeiro critério de Nash-Sutcliffe.

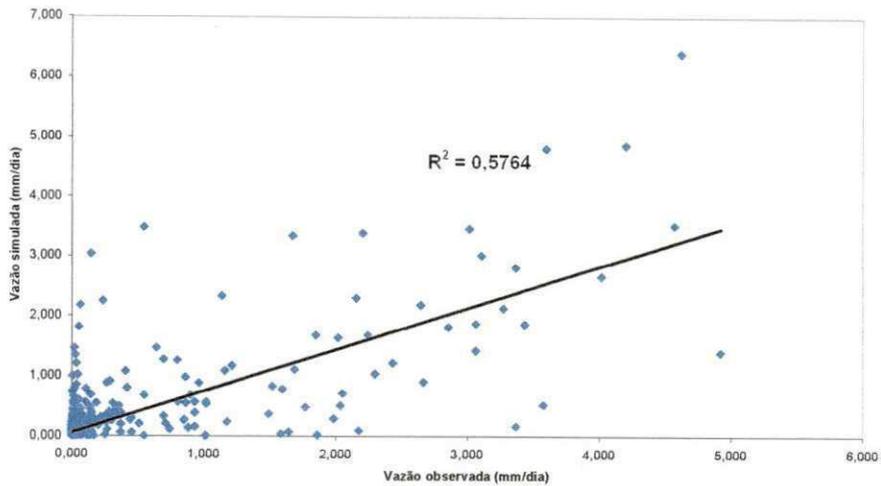


Figura A.12 Gráfico da correlação entre vazão observada e vazão simulada (1999-2001) para o primeiro critério de Nash-Sutcliffe.

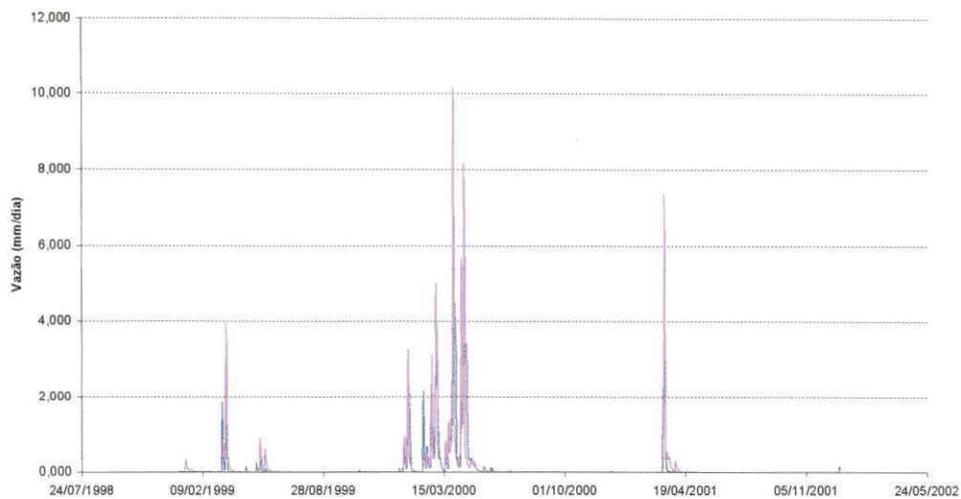


Figura A.13 Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1999-2001) para o segundo critério de Nash-Sutcliffe.

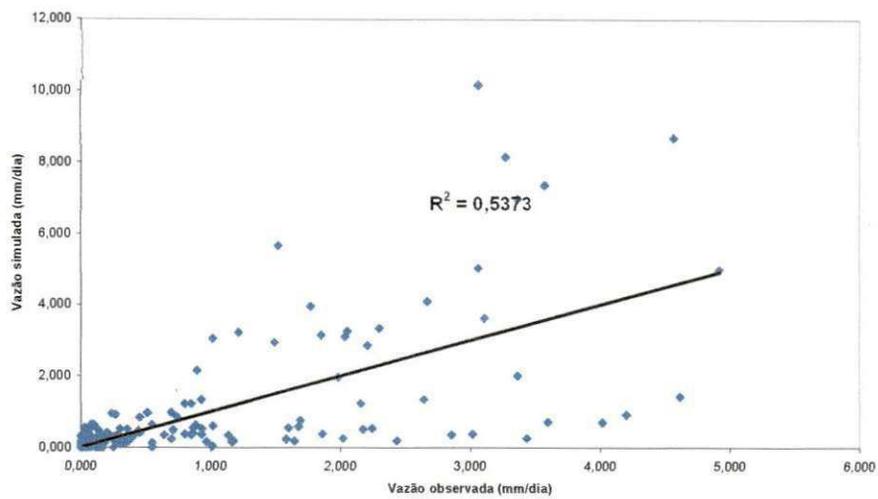


Figura A.14 Gráfico da correlação entre vazão observada e vazão simulada (1999-2001) para o segundo critério de Nash-Sutcliffe.

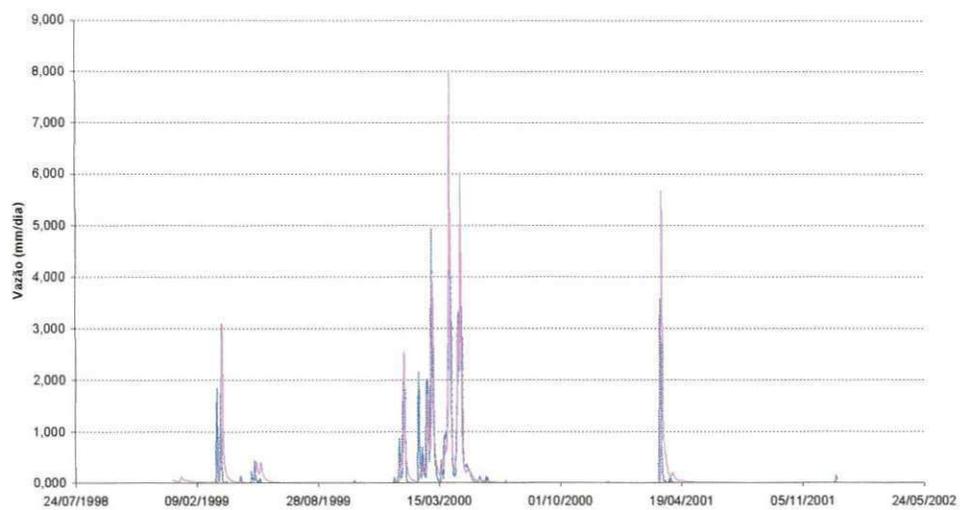


Figura A.15 Hidrogramas vazão simulada e vazão observada (1999-2001) para o terceiro critério de Nash-Sutcliffe.

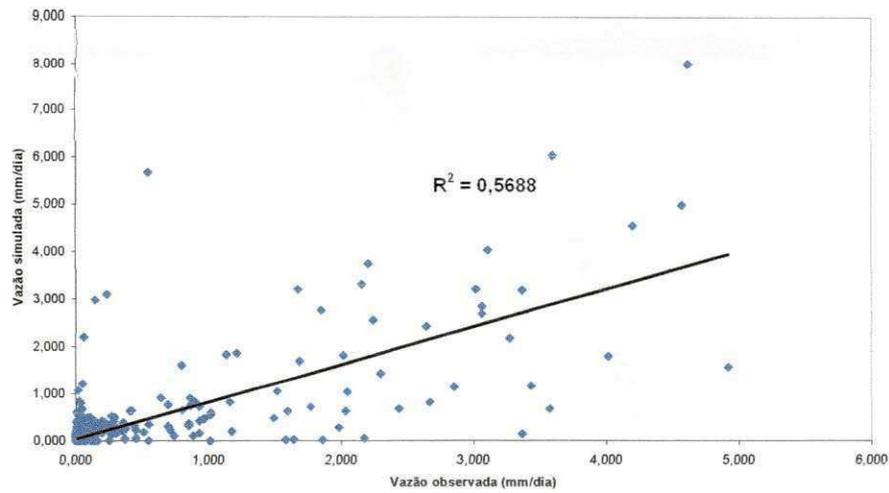


Figura A.16 Gráfico da correlação entre vazão observada e vazão simulada (1999-2001) para o terceiro critério de Nash-Sutcliffe.