

## RIO GRANDE – MODELO DE SIMULAÇÃO E PREVISÃO HIDROLÓGICA

Alessandra A. Lima<sup>1</sup>; Francisco E. O Silva<sup>2</sup>; Tatiani C. M. Thimotti<sup>3</sup>;  
Yuri G. Queiroga<sup>4</sup>; Mauro C. Naguettini<sup>5</sup> & Nilo O. Nascimento<sup>6</sup>

**Resumo** – Este artigo descreve a estrutura de um modelo de simulação chuva-vazão, que se encontra em uso, atualmente, na Companhia Hidrelétrica do estado de Minas Gerais – CEMIG – para produzir previsões a curto-prazo de afluições ao reservatório de Camargos. O *Rio Grande* é um modelo hidrológico semidistribuído e contínuo, desenvolvido pela Universidade Federal de Minas Gerais. É composto de três módulos: produção, concentração e propagação. O módulo de produção executa o balanço hídrico em uma determinada sub-bacia e é baseado na estrutura do modelo Xinanjiang. O módulo de concentração utiliza o conceito do hidrograma unitário de Clark buscando representar a distribuição temporal do escoamento na saída da sub-bacia. Finalmente, o módulo de propagação aplica o método de Musking-Cunge para propagar as vazões geradas ao longo da rede de drenagem. Este artigo também mostra uma aplicação do modelo *Rio Grande* na previsão de afluições ao reservatório da UHE Camargos, operado pela CEMIG. Embora o modelo já esteja concluído, seus atributos potenciais mostram grandes perspectivas para aprimoramentos adicionais a fim, de se realizar aplicações gerais em previsão e simulação hidrológica.

**Abstract** – This paper describes the structure of a rainfall-runoff simulation model which is currently in use by CEMIG – the Minas Gerais state hydropower company – to produce short-term forecasts of inflows to the Camargos reservoir. The *Rio Grande* is a semi-distributed and continuous hydrologic model that has been developed for CEMIG by the Federal University of Minas Gerais. It is composed by three modules: Production, Concentration and Routing. The Production module performs the water-balance in a given sub-basin and is based on the structure of the Xinanjiang model. The Concentration step uses the Clark unit-hydrography concept to find the time-distribution of streamflow at the sub-basin outlet. Finally, the Routing module employs the linear Muskingum-Cunge method to combine and propagate streamflows along the drainage

<sup>1</sup> UFMG-EHR, Av. Contorno, 842/8 – CEP 30110060, Belo Horizonte MG, 31 3238 1870, a\_alima@ig.com.br

<sup>2</sup> UFMG-EHR, Av. Contorno, 842/8 – CEP 30110060, Belo Horizonte MG, 31 3238 1870, fcoeustaquio@hotmail.com

<sup>3</sup> UFMG-EHR, Av. Contorno, 842/8 – CEP 30110060, Belo Horizonte MG, 31 3238 1870, tatiani@ehr.ufmg.br

<sup>4</sup> UFMG-EHR, Av. Contorno, 842/8 – CEP 30110060, Belo Horizonte MG, 31 3238 1870, yurigivago@hotmail.com

<sup>5</sup> UFMG-EHR, Av. Contorno, 842/8 – CEP 30110060, Belo Horizonte MG, 31 3238 1870, naghet@dedalus.lcc.ufmg.br

<sup>6</sup> UFMG-EHR, Av. Contorno, 842/8 – CEP 30110060, Belo Horizonte MG, 31 3238 1870, niloon@ehr.ufmg.br

network. This paper also shows an application of the *Rio Grande* model to forecast the inflows to CEMIG's Camargos reservoir. However, the model isn't still under development, its potential attributes present great prospects for further development for general applications in hydrologic simulation in forecasting.

**Palavras-chave** – Previsão Hidrológica, Simulação Hidrológica, Modelagem Matemática.

## INTRODUÇÃO

Os métodos de previsão hidrológica compreendem os meios para prover estimativas dos estados espaço-temporais futuros das variáveis hidrológicas, geralmente em tempo atual e para uma dada área de interesse. Há tempos os hidrólogos têm-se dedicado ao desenvolvimento de técnicas e métodos de previsão e embora a motivação original para prognósticos hidrológicos tenha sido a mitigação das grandes enchentes, estes podem ser empregados também para diversas outras finalidades. De fato, um sistema eficaz de previsão hidrológica, além de poder evitar fatalidades e prejuízos diretos, proporciona meios valiosos para a operação e controle de estruturas de aproveitamento de recursos hídricos, tais como vias de navegação fluvial, usinas hidrelétricas, perímetros de irrigação e sistemas de abastecimento de água.

Para ser eficaz, um sistema de previsão hidrológica necessita possuir dois atributos fundamentais: precisão e antecedência. Esses atributos dependem de uma série de fatores, sendo os principais a disponibilidade de dados hidrológicos e meteorológicos, a velocidade com que estes dados são recebidos e tratados no centro de previsão, a eficácia do método de previsão empregado e o tempo necessário para a disseminação da informação e a conseqüente tomada de decisão. Segundo Todini (1997), um sistema operacional de previsão de vazões em tempo real deve adequar-se às necessidades de antecedência e complexidade do sistema a ser monitorado e controlado, podendo abranger diversos componentes, entre estes, um modelo matemático chuva-vazão aplicado a uma determinada bacia hidrográfica.

No que concerne à atividade de controle, os modelos determinísticos de simulação hidrológica têm sido utilizados com muito sucesso na operação em tempo atual de sistemas de recursos hídricos, onde auxiliam na tomada de decisões operativas para um dado local, levando em conta não somente os estados correntes do sistema, mas também as previsões de seus estados futuros. Os modelos de operação em tempo atual podem ser eficazmente empregados, por exemplo, no controle do nível de armazenamento de um reservatório diante da antecipação de um evento hidrometeorológico extremo de curta duração. Da mesma forma, podem ser usados em base

contínua para gerenciar sistemas complexos com um grau maior de antecipação. Em ambas situações, eles devem ter seus estados correntes continuamente atualizados e incorporar um conjunto de prováveis cenários hidrometeorológicos de extensão compatível com a previsão de curto ou de longo prazo. Assim, a partir dos estados correntes do sistema e da simulação de afluências previstas em futuro próximo ou distante, pode-se estabelecer regras operativas, respectivamente em tempo atual ou futuro, visando atender às metas correspondentes de volumes de armazenamento e restrições de defluências.

Inserido neste contexto e tendo em vista os benefícios potenciais do emprego de modelos de simulação hidrológica para a operação em tempo atual de sistemas de recursos hídricos, o Departamento de Planejamento Energético da CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais – contratou um projeto de pesquisa junto ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais para o desenvolvimento e implantação de modelos conceituais de simulação chuva-vazão e instrumentos para a calibração de seus parâmetros, com vistas à previsão de afluências aos reservatórios das usinas hidrelétricas daquela empresa. No presente artigo apresenta-se o modelo de simulação hidrológica **Rio Grande**, fruto do projeto anteriormente citado, capaz de produzir previsões de curto prazo de afluências a reservatórios, em horizontes de tempo diário e horário com três, cinco ou sete dias de antecedência.

## A CONCEPÇÃO DO MODELO

O modelo **Rio Grande** foi concebido em três etapas distintas. Na primeira etapa, sete modelos hidrológicos determinísticos foram previamente escolhidos como candidatos potenciais a integrar o sistema de previsão, com base na literatura técnica e na experiência das equipes da UFMG e da CEMIG. Na segunda etapa foi selecionado um dos modelos como o mais adequado a integrar o sistema de previsão. Essa seleção, designada como *a priori*, fundamentou-se em uma análise das características estruturais e operacionais de todos os modelos inicialmente escolhidos, bem como na caracterização dos problemas típicos de controle operacional e suas possíveis soluções por meio de previsão hidrológica. Na terceira etapa foi avaliada a adequação do modelo selecionado em relação à previsão de curto prazo, levando-se em consideração todos os aspectos teóricos – transformação chuva-vazão, propagação, calibração – associados a este. Adotou-se, entretanto, como solução final do sistema de previsão o desenvolvimento de um modelo próprio, empregando formulações teóricas e rotinas de cálculo que melhor se adaptassem às necessidades de previsão de afluências aos reservatórios da CEMIG.

## O MODELO RIO GRANDE

O modelo *Rio Grande* é um modelo do tipo chuva-vazão, semi-distribuído e contínuo, que incorpora soluções atuais de modelagem matemática de processos hidrológicos testadas em diferentes bacias hidrográficas e constitui-se de três módulos: Produção, Concentração e Propagação.

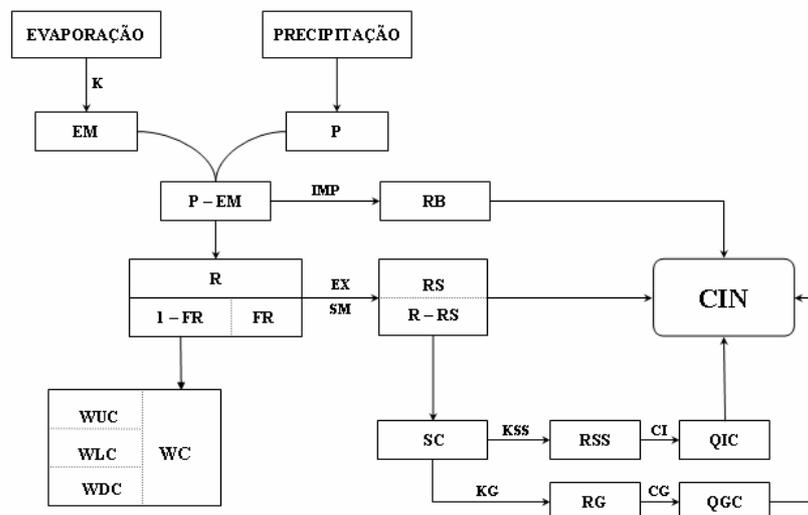
O módulo de Produção é inteiramente baseado na conceitualização do modelo Xinanjiang, inicialmente descrito por Zhao et al. (1980), cuja estrutura também é usada, em quase sua totalidade, pelo modelo ARNO (Todini, 1996). Segundo Zhao et al. (1980), a estrutura conceitual adotada no modelo Xinanjiang adapta-se bem a regiões úmidas e semi-úmidas, possuindo forte analogia física com parâmetros relacionados às suas características.

O módulo de Concentração emprega uma função de transferência baseada no hidrograma unitário sintético de Clark, tal como formulação original do Hydrologic Engineering Center do U. S. Army Corps of Engineers (HEC, 1981).

O módulo de Propagação contempla a propagação em cursos d'água para a qual se emprega a formulação do modelo de onda difusiva proposta por Cunge (Ponce, 1989), conhecida por Muskingum-Cunge.

### Módulo de Produção

A estrutura do balanço de umidade do solo do módulo de Produção do modelo *Rio Grande*, baseada na conceitualização do modelo Xinanjiang, pode ser utilizada dentro de uma discretização espacial semi-distribuída, com intervalos de tempo variáveis entre o sub-diário e o diário. A Figura 1 ilustra o diagrama de fluxo da umidade do solo em uma sub-bacia, para dado intervalo de tempo.



**Figura 1:** Fluxograma Geral do Módulo de Produção do Modelo *Rio Grande*

No processo de formação do escoamento é plausível admitir-se que o volume de escoamento superficial dependerá particularmente da umidade inicial presente no solo e do volume de precipitação. No modelo *Rio Grande*, a formação do escoamento se limita às situações em que é superado o volume máximo de armazenamento de umidade do solo. Em outras palavras, não haverá escoamento até que a umidade do solo da zona aerada alcance a chamada capacidade de campo ou retenção específica. Atingida a capacidade de campo, todo o volume precipitado, a menos da evapotranspiração, converter-se-á em escoamento.

Para uma dada amostra de solo, pode-se representar o balanço hídrico da seguinte forma:

- antes de atingir a capacidade de campo

$$P - E = WC_2 - WC_1 \quad (1)$$

- depois de atingir a capacidade de campo

$$P - E - R = WM - WC_1 \quad (2)$$

onde  $P$  indica a precipitação;  $E$  a evapotranspiração;  $R$  o escoamento;  $WM$  a capacidade de campo; e  $WC_2$  e  $WC_1$  indicam o conteúdo de umidade do solo ao início e ao final do intervalo de tempo, respectivamente.

A capacidade de campo representa um nível relativamente baixo de umidade presente no solo, indicando um limite inferior do ponto de vista de formação do escoamento e da perda por evapotranspiração. Dentro da estrutura conceitual do modelo, a parte da capacidade de campo que se pode eliminar por meio da evapotranspiração é denominada capacidade de retenção específica da água ou simplesmente capacidade de tensão capilar e representa o déficit máximo da umidade do solo para a evapotranspiração.

Ao modelar uma bacia, deve-se levar em conta a distribuição espacial da capacidade de tensão capilar da água, uma vez que esta não é uniforme. Desta forma emprega-se uma curva paramétrica para a distribuição espacial da capacidade de água de tensão, tal como mostrado na Figura 2. Nesta Figura, as ordenadas representam a capacidade de tensão pontual,  $Wm'$ , e as abcissas denotam a fração da área total ( $F$ ) da sub-bacia,  $f$ , em que a capacidade de tensão é menor ou igual à  $Wm'$ , sendo  $IMP$  a fração correspondente à área impermeável.

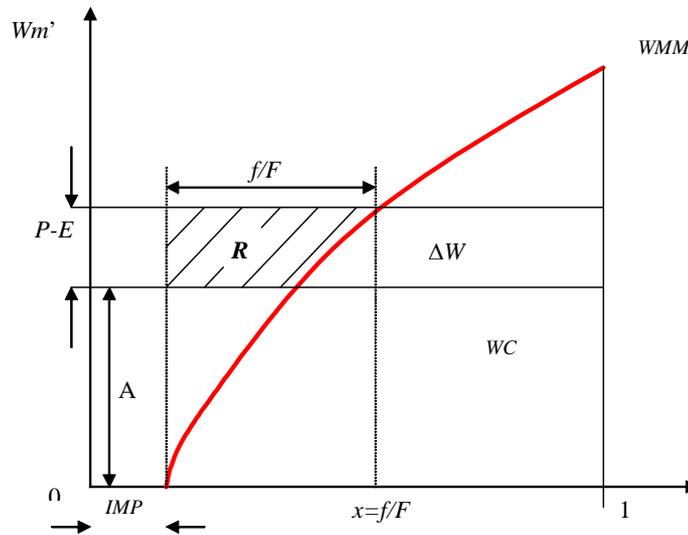
Em termos da bacia, o escoamento somente ocorrerá nas áreas onde o conteúdo de umidade do solo alcançar a capacidade de tensão capilar. Nesse caso, a equação do balanço hídrico torna-se:

$$P - E - R = WC_2 - WC_1 \quad (3)$$

O escoamento superficial ocorrerá somente depois que a umidade do solo atingir o máximo armazenamento de água gravitacional ou livre. A água livre é definida como qualquer suprimento adicional acima da capacidade de campo. Evidentemente, o escoamento proveniente das áreas impermeáveis é sempre superficial e é calculado por:

$$RB = IMP(P - E) \quad (4)$$

onde  $RB$  representa o escoamento das áreas impermeáveis para  $P - E > 0$ .

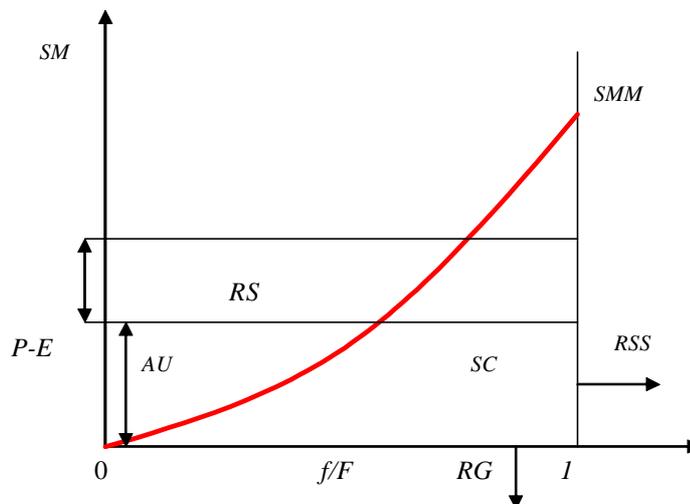


**Figura 2:** Distribuição Espacial da Capacidade de Tensão Capilar

Para as áreas permeáveis, o escoamento superficial ( $RS$ ) é obtido por meio da curva de distribuição espacial da capacidade de água livre. De modo similar à água capilar, a curva de distribuição da capacidade de água livre pode ser expressa por:

$$\frac{f}{F} = 1 - \left(1 - \frac{SM}{SMM}\right)^{EX} \quad (5)$$

onde  $EX$  denota o seu grau de não uniformidade. A Figura 3 ilustra a distribuição espacial da capacidade de água livre, dada pela equação 5.



**Figura 3:** Distribuição Espacial da Capacidade de Água Livre

Os afluxos à rede de drenagem representam o movimento da água proveniente das colunas de solo em direção ao sistema de drenagem. Os escoamentos superficiais fluem diretamente até os elementos do sistema de drenagem e de forma muito mais rápida do que o fazem os escoamentos sub-superficial e subterrâneo. A inclusão desse fato no modelo é realizada por meio da propagação dos fluxos sub-superficial e subterrâneo através de um reservatório linear.

Os afluxos sub-superficiais à rede de drenagem, aqui denotados por  $QIC$ , são calculados por:

$$QIC_t = QIC_{t-1} \cdot CI + RSS \cdot (1 - CI) \quad (6)$$

onde  $CI$  representa o coeficiente de recessão do escoamento sub-superficial para o intervalo de tempo utilizado  $[t-1, t]$ .

Por sua vez, os afluxos subterrâneos à rede de drenagem, representados por  $QGC$ , são calculados por:

$$QGC_t = QGC_{t-1} \cdot CG + RG \cdot (1 - CG) \quad (7)$$

onde  $CG$  representa o coeficiente de recessão do escoamento sub-superficial para o intervalo de tempo utilizado  $[t-1, t]$ .

O deflúvio total  $CIN$  afluyente à rede de drenagem, em  $\text{mm}/\text{km}^2$ , durante o intervalo de tempo em questão, é obtido pela soma dos termos  $RS$ ,  $RB$ ,  $QIC$  e  $QGC$ . Formalmente,

$$CIN = RS + RB + QIC + QGC \quad (8)$$

À medida que a coluna de solo é submetida à ação da evapotranspiração, inicia-se a depleção da umidade armazenada sob forma de água sujeita à tensão capilar. Pode-se dividir a região aerada do solo em três zonas: superior, inferior e profunda, com capacidades de tensão capilar médias espaciais dadas, respectivamente, por  $WUM$ ,  $WLM$  e  $WDM$ . Tanto o armazenamento quanto à depleção da umidade da região aerada do solo ocorrem na seguinte ordem: zona superior, inferior e, em seguida, profunda.

A evapotranspiração potencial ( $EM$ ) pode ser estimada diretamente a partir de dados de tanque evaporimétrico ou, indiretamente, por meio de dados meteorológicos. Na zona superior, a evapotranspiração é igual a  $EM$ . Na zona inferior, a evapotranspiração é igual a  $EM$  multiplicada pela razão entre o conteúdo e a capacidade de água de tensão capilar na zona inferior. Na zona profunda, a evapotranspiração é uma fração da  $EM$ , a qual é proporcional à área da bacia com vegetação de raízes profundas ou freatófitas. Finalmente, a evapotranspiração efetiva total, denotada por  $E$ , é obtida pela soma dos termos correspondentes às zonas superior, inferior e profunda, ou seja:

$$E = EU + EL + ED \quad (9)$$

em que  $EU$  representa a evapotranspiração real ou efetiva na zona superior;  $EL$  a evapotranspiração real ou efetiva na zona inferior; e  $ED$  a evapotranspiração real ou efetiva na zona profunda.

## Módulo de Concentração

No modelo *Rio Grande*, o módulo de produção resulta em uma série de pulsos discretos de lâminas de escoamento total,  $CIN$ , em  $\text{mm}/(\Delta t \cdot \text{km}^2)$ , incluindo os fluxos superficial, sub-superficial e subterrâneo, sobre uma área unitária da sub-bacia em estudo, em  $N$  intervalos do tempo interno de cálculo entre as datas inicial e final de simulação.

Embora se presuma a uniformidade destas lâminas de escoamento sobre a sub-bacia, no modelo considera-se que diferentes áreas concentram suas respectivas contribuições em diferentes tempos, na seção exutória pertinente. Desta forma, utiliza-se uma função de transferência baseada no hidrograma unitário sintético de Clark, tal como na formulação original do Hydrologic Engineering Center do U. S. Army Corps of Engineers (HEC, 1981).

O hidrograma unitário sintético de Clark requer três parâmetros:

- $TC$ : tempo de concentração da sub-bacia, aqui fixado como um número inteiro de horas, usado para levar em conta os efeitos de translação;
- $R$ : coeficiente de armazenamento da sub-bacia, expresso em um número não necessariamente inteiro de horas e empregado para se incorporar os efeitos de armazenamento aos de translação.
- *Histograma Tempo-Área*, o qual representa a distribuição temporal das áreas da sub-bacia que contribuem para a formação das vazões na seção exutória.

O tempo de concentração  $TC$  pode ser obtido por meio de fórmulas empíricas ou por análise de hidrogramas observados. Uma vez conhecido  $TC$ , o coeficiente de armazenamento  $R$  pode ser deduzido a partir da fórmula empírica (equação 10) sugerida por HEC (1981), com a área expressa em  $\text{km}^2$ .

$$TC + R = 0,625 \cdot \sqrt{\text{Área total}} \quad (10)$$

O histograma tempo-área pode ser estimado diretamente a partir de mapas topográficos e curvas hipsométricas da sub-bacia em questão. Entretanto, a estimativa direta do histograma tempo-área é muito trabalhosa e envolve incertezas quanto a algumas inevitáveis simplificações referentes à hidráulica do escoamento ao longo de vertentes. O modelo *Rio Grande* disponibiliza, além dos resultados obtidos pela estimativa direta, em forma de um histograma tempo-área fruto da análise dos escoamentos, um histograma tempo-área sintético obtido com base na forma determinante da bacia, conforme sugerido por HEC (1981).

## Módulo de Propagação

O modelo de onda difusiva, no qual se baseia o módulo de propagação do modelo *Rio Grande*, fundamenta-se na equação de conservação da massa, em regime de escoamento não

permanente, e em uma simplificação da equação da conservação da quantidade de movimento, a saber:

- conservação da massa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

- conservação da quantidade de movimento:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (12)$$

onde  $S_f$  representa o gradiente da linha de energia (perda de carga unitária);  $S_0$  o gradiente topográfico; e  $\frac{\partial y}{\partial x}$  o gradiente de pressão (variação da profundidade no espaço resultante da aceleração convectiva do escoamento).

Partindo-se destas formulações, pode-se definir o modelo de onda difusiva como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = d \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (13)$$

onde  $c$ , celeridade da onda, e  $d$ , difusividade hidráulica da onda, são dadas, respectivamente, por:

$$c = \frac{\partial Q}{\partial A} = \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial y} \quad (14)$$

$$d = \frac{Q}{2BS_0} \quad (15)$$

O modelo Muskingum-Cunge permite a formulação linear e não-linear, ambas pela solução numérica da Equação 13. No caso da formulação não-linear, os parâmetros  $c$  e  $d$  variam para cada valor de vazão  $Q$  em propagação no trecho de canal.

A solução numérica da equação de difusão adotada, neste caso, é dada por:

$$Q_t = C_0 I_{t-1} + C_1 I_t + C_2 O_{t-1} \quad (16)$$

sendo,  $C_0$ ,  $C_1$ , e  $C_2$  função de  $k$  (coeficiente de armazenamento) e  $x$  (fator de ponderação).

Os coeficientes  $C_0$ ,  $C_1$ , e  $C_2$  possuem a mesma formulação do modelo Muskingum, que é essencialmente um modelo tipo onda cinemática. Entretanto, os parâmetros  $k$  e  $x$  do modelo Muskingum-Cunge são formulados a partir dos parâmetros celeridade ( $C$ ) e difusividade ( $D$ ) da onda, utilizados na equação de onda difusa.

A versão linear do modelo Muskingum-Cunge mantém  $C_0$ ,  $C_1$ , e  $C_2$  constantes no tempo. Testes realizados revelaram que esta simplificação, além de respeitar o compromisso com a simplicidade de cálculo, mantém a qualidade global da simulação uma vez que a ordem de grandeza dos erros da simulação é pequena e compatível com os demais módulos do modelo.

Os parâmetros  $C$  e  $D$  foram estimados com base nas características geométricas e hidráulicas do trecho de curso d'água em foco. É importante ressaltar que foram utilizados sub-trechos dentro da porção do curso d'água considerado, de maneira a obter-se melhores resultados no amortecimento e translação do hidrograma obtido.

### Algoritmos de Calibração

Quando da aplicação do modelo à bacia, é necessário que os valores dos parâmetros sejam determinados. Um dos procedimentos utilizados na determinação desses parâmetros é a calibração, que consiste na busca do valor de uma variável ou de  $n$  variáveis, que proporcionem o melhor resultado para uma função dependente destas variáveis, obedecendo as restrições de natureza física ou conceitual relacionadas ao processo modelado.

Para a calibração do modelo são geralmente empregados funções objetivo e algoritmos que buscam minimizar o erro quadrático do modelo, ou seja, o valor quadrático da diferença entre os dados observados na bacia hidrográfica simulada e os valores calculados pelo modelo.

De acordo com Tucci (1998), o problema da calibração automática geralmente constitui na minimização de uma função objetivo. Cada ponto de mínimo da função objetivo representa o valor ótimo da vizinhança que, entretanto, pode não representar o ponto ótimo global dentro do intervalo definido como válido para os parâmetros, ou seja, os algoritmos de calibração podem ser de busca local ou global.

Os métodos de busca local partem de um vetor de valores iniciais dos parâmetros a calibrar, estabelecido a priori  $\Theta_i = \{\theta_{1,i}; \theta_{2,i} \dots\}$ . A função objetivo é calculada para esse vetor, obtendo-se um valor inicial de referência. Em seguida, são criados outros vetores de parâmetros por meio da introdução de pequenas variações em seus valores iniciais,  $\Theta_i = \{\theta_{1,i} + \Delta\theta_{1,i}; \theta_{2,i}; \dots\}$ . O progresso é feito na direção que melhor atenda ao objetivo de minimizar ou maximizar a função objetivo. O processo é repetido até que se decida, a partir de um critério de interrupção, pela impossibilidade de melhoria da função objetivo.

Um exemplo de algoritmo de busca local é o método de calibração de Rosenbrock, incorporado ao modelo **Rio Grande**. O propósito do método é o de encontrar o mínimo (ou o máximo) de uma função objetivo unimodal (Rosenbrock, 1960). Caso a hipótese de unimodalidade não se verifique, o método de Rosenbrock, como qualquer algoritmo de busca local, poderá conduzir a um resultado não otimizado de calibração, ou seja, a um ótimo local.

O algoritmo do método de Rosenbrock (Kuester & Mize, 1973) adaptado ao modelo **Rio Grande** segue os seguintes passos:

1. São estabelecidos valores iniciais para os parâmetros que constituem o vetor inicial,  $\Theta_i = \{\theta_{1,i}, \theta_{2,i}, \dots\}$ . A função objetivo é calculada para este vetor, obtendo-se seu valor inicial de referência.

2. Introduce-se, em seguida, uma variação  $\Delta\theta_{1,i}$  no valor do primeiro parâmetro, deslocando-o na direção paralela a seu eixo,  $\theta_{1,i} + \Delta\theta_{1,i}$ . Desta forma, constitui-se um novo vetor de parâmetros,  $\Theta = \{\theta_{1,i} + \Delta\theta_{1,i}; \theta_{2,i}; \dots\}$ , para a re-avaliação da função objetivo.

3. Se, para o novo vetor  $\Theta$ , o valor da função objetivo aumentar, o deslocamento introduzido em  $\theta_{1,i}$  será tido como um sucesso e  $\Delta\theta_{1,i}$  será aumentado de um fator ( $\alpha \geq 1$ ). Se o valor da função objetivo diminuir, o deslocamento introduzido em  $\theta_{1,i}$  será tido como um fracasso,  $\Delta\theta_{1,i}$  será diminuído de um fator ( $\beta \leq 1$ ) e o deslocamento será feito na direção contrária àquela inicialmente realizada com  $\Delta\theta_{1,i}$ .

4. Os procedimentos 2 e 3 são repetidos para os parâmetros do modelo até que todos tenham sido avaliados em todas as direções possíveis.

5. Em seguida, os eixos definidos pelos parâmetros sofrem uma rotação, dada pela equação 17. Cada rotação é chamada de um estágio.

$$M_{i,j}^{k+1} = \frac{D_{i,j}^k}{\left[ \sum_{l=1}^N (D_{l,j}^k)^2 \right]^{1/2}} \quad (17)$$

Sendo que:

$$D_{i,1}^k = A_{i,1}^k \quad (18)$$

$$D_{i,j}^k = A_{i,j}^k - \sum_{l=1}^{j-1} \left[ \left( \sum_{n=1}^j M_{n,l}^{k+1} \cdot A_{n,j}^k \right) \cdot M_{1,l}^{k+1} \right], \text{ com } j = 2, 3, \dots, N \quad (19)$$

onde N é o número de parâmetros a calibrar e

$$A_{i,1}^k = \sum_{l=j}^N d_l^k \cdot M_{i,l}^k \quad (20)$$

com  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ , representando o índice de parâmetros;  $j = 1, 2, 3, \dots, N$ , o índice de direções; k o índice de estágios;  $d_i$  a soma das distâncias deslocadas na direção i a partir da última rotação de eixos; e  $M_{i,j}$  a direção normalizada do vetor.

6. A busca pelo ótimo é feita em cada uma das direções exploradas pelo método, utilizando novos eixos coordenados:

$$\text{novo}\theta_i^k = \text{antigo}\theta_i^k + \Delta_j^k \cdot M_{i,j}^k \quad (21)$$

7. O processo termina com a satisfação do critério de convergência.

Os métodos globais de calibração automática têm sido empregados no sentido de contornar as dificuldades inerentes aos métodos de busca local, quando a função objetivo é multimodal ou quando esta apresenta descontinuidades. O propósito dos métodos globais é o de percorrer todo o espaço paramétrico de forma a identificar todos os vetores de parâmetros que resultam em um máximo (ou mínimo) da função objetivo. Classificando por ordem de grandeza os valores obtidos para função objetivo nesses pontos, é possível identificar o jogo ótimo de parâmetros do modelo.

Um exemplo é o método SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution Method*), proposto por Duan, Sorooshian & Gupta (1992). Este algoritmo é incorporado ao modelo **Rio Grande** como uma das alternativas de calibração automática. Por alusão a princípios adotados pelo algoritmo, bem como visando a simplicidade terminológica, o método SCE-UA foi designado por Algoritmo Genético.

O Algoritmo Genético segue os seguintes passos:

1. Selecionam-se o número de grupos complexos ( $p$ , sendo  $p \geq 1$ ) e o número de pontos em cada complexo ( $m$ , sendo  $m \geq n + 1$  e  $n$  a dimensão do problema de calibração).

2. Calcula-se o tamanho da amostra  $s = p.m$ .

3. Selecionam-se  $s$  pontos  $x_1, \dots, x_s$  no espaço amostral  $\Omega \subset \mathcal{R}^n$ . Na ausência de informação a priori utiliza-se uma função de probabilidade uniforme para a amostragem. Calcula-se a função objetivo  $F_i$  em cada ponto  $x_i$ .

4. Os  $s$  pontos são classificados em ordem crescente de valor da função objetivo e armazenados em uma matriz  $D = \{x_i, F_i, i = 1, \dots, s\}$ , atribuindo-se o índice 1 ao ponto com menor valor de  $F_i$ .

5. A matriz  $D$  é dividida em  $p$  grupos  $A^1, \dots, A^p$ , cada um contendo  $m$  pontos de tal forma que  $A^k = \{x_j^k, F_j^k \mid x_j^k = x_{k+p(j-1)}, F_j^k = F_{k+p(j-1)}, j = 1, \dots, m\}$ .

6. Cada complexo  $A^k, k = 1, \dots, p$  evolui segundo o algoritmo CCE (*Competitive Complex Evolution*), descrito por Duan et al. (1992).

7.  $A^1, \dots, A^p$  são substituídos em  $D$ , tal que  $D = \{A^k, k = 1, \dots, p\}$ . Os valores em  $D$  são reclassificados em ordem crescente de  $F_i$ .

8. Se o critério de convergência da calibração for satisfeito, interrompe-se o processo. Caso contrário, retorna-se à etapa 5.

## A ESTRUTURA DO SOFTWARE

O modelo de previsão e simulação hidrológica **Rio Grande** foi desenvolvido valendo-se do software Visual Basic 6.0 (Brown, 1999; Microsoft, 1998, Wang, 1999), utilizando, também, banco

de dados em Access, arquivos periféricos e de saída em Excel, e uma extensão de aplicativo (biblioteca de vínculo dinâmico – *.dll*) desenvolvida em Fortran.

Objetivando uma comunicação clara e direta para com o usuário, o programa **Rio Grande** foi desenvolvido com interface auto-explicativa e simples, constituída dos seguintes menus principais: *Projeto, Tratamento de Dados, Calibração, Simulação, Previsão, Ajuda, Salvar e Sair*.

Em *Projeto* estão disponíveis informações sobre a bacia hidrográfica, postos telemétricos e sobre os possíveis esquemas de previsão. É importante lembrar que os erros das previsões estão relacionados à antecedência com que estas são feitas. Intuitivamente, sabe-se que, quanto maior o tempo de antecedência, maior o erro da previsão e quanto menor esse tempo, também menor será o erro. Dentro deste contexto que foram definidos os esquemas de previsão.

Em *Tratamento de Dados*, devem ser definidas as datas iniciais e finais que serão usadas nas simulações, forma de preenchimento de dados faltosos e o tipo de dados que serão armazenados no arquivo de entrada. Os dados que devem ser tratados dependem do objetivo do usuário: para realizar calibração é preciso fornecer dados observados de pluviometria, evaporimetria e fluviometria; para realizar simulação é preciso fornecer dados observados de chuva e evaporação; e para realizar a previsão é necessário fornecer dados pluviométricos e evaporimétricos observados até o instante inicial da previsão e também os previstos. O modelo **Rio Grande** oferece opções de preenchimento de dados faltosos de forma manual e/ou automática. Como o programa trabalha em intervalos de tempo horário ou diário os dados de chuva e vazão devem respeitar as unidades correspondentes, ou seja, chuva acumulada horária e vazão média horária ou chuva acumulada diária e vazão média diária. Todavia, os dados de evaporação devem ser sempre em totais diários uma vez que o modelo desagrega internamente os valores em função da insolação horária.

A etapa de *Calibração* é extremamente importante para o modelo. Nela são definidos os valores dos parâmetros que melhor representam a bacia hidrográfica. Conforme apresentado, o modelo **Rio Grande** oferece dois métodos de calibração automática: o método de Rosenbrock e por algoritmo genético. Aqui devem ser definidos, em ambos os casos, valores iniciais para os parâmetros, quais serão calibrados e quais serão mantidos fixos, intervalo de validade para os parâmetros e critérios de parada para otimização. O modelo oferece também a opção de calibração manual, na qual o usuário pode produzir alterações nos parâmetros e verificar o melhor ou pior ajuste entre os dados observados e os calculados para o modelo.

Em *Simulação*, o usuário pode verificar o funcionamento do modelo chuva-vazão para um determinado período de dados ou mesmo criar situações hipotéticas de cálculo.

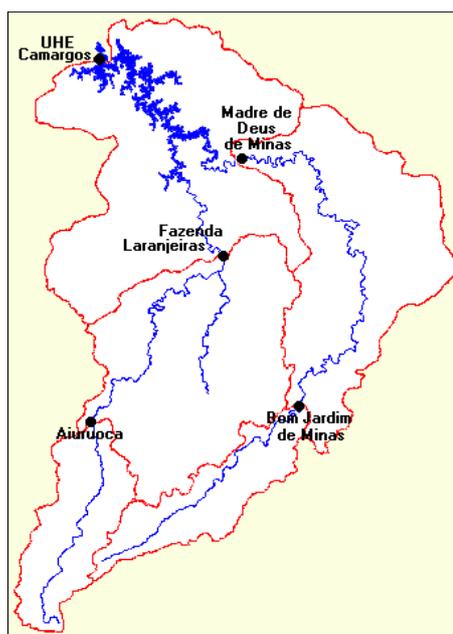
O modelo oferece no menu *Previsão* a operação de edição dos dados tratados sem que seja necessário retornar a etapa de tratamento. É possível realizar previsões com antecedência de três, cinco ou sete dias. A previsão é feita sempre em intervalo de tempo horário.

Os resultados de calibração, simulação e previsão podem ser analisados de forma analítica ou gráfica uma vez que o modelo oferece as duas saídas. Na saída analítica da previsão os valores previstos vêm em destaque para serem facilmente distinguidos dos demais. Na saída gráfica da calibração as vazões observadas são plotadas em conjunto com as simuladas para verificação visual do ajuste analítico do modelo (critério de Nash), e, além disso, são gerados gráficos de dispersão, de médias mensais, e de evolução dos parâmetros e da função objetivo. É possível analisar em conjunto todas as previsões realizadas (com diferentes antecedências).

O programa conta com arquivos digitais de ajuda sendo possível consultá-los a qualquer instante e é possível salvar as operações realizadas e recuperá-las posteriormente.

## APLICAÇÃO DO MODELO

O modelo *Rio Grande* foi aplicado à bacia do rio Grande em Camargos (UHE de Camargos), localizada ao sul do estado de Minas Gerais, cuja área de drenagem é de, aproximadamente, 6.280 km<sup>2</sup>, englobando os municípios de São João Del Rei, Barbacena, Andrelândia, Bom Jardim de Minas, Alagoa, Madre de Deus de Minas, entre outros. Os dois principais cursos d'água formadores da bacia neste trecho são os rios Grande e Aiuruoca. A Figura 4 apresenta um desenho esquemático do trecho em estudo, mostrando a subdivisão adotada para fim de simulação hidrológica, por meio do modelo *Rio Grande*. Os pontos indicados na figura definem duplamente as localizações das estações pluviométricas e fluviométricas operadas simultaneamente pela ANA e CEMIG, cujos dados foram empregadas na simulação.



**Figura 4:** Bacia do Rio Grande em Camargos

De acordo com Hidrossistemas/Copasa (1993), a bacia do rio Grande em Camargos pode ser dividida em duas regiões homogêneas, quanto aos índices de pluviosidade e quanto ao relevo:

- ao Sul, próximo à Serra da Mantiqueira, uma região com predominância de relevo forte ondulado a montanhoso, registrando pluviosidade anual superior a 1.500 mm; e
- ao Norte, uma região de relevo predominantemente ondulado com registros de pluviosidade anual entre 1.000 e 1.500 mm.

Com relação à capacidade de infiltração, toda bacia pode ser considerada homogênea, com predominância de terrenos com baixa capacidade de infiltração, em razão da ocorrência freqüente de solos argilosos associados a substrato rochoso de baixa permeabilidade (Hidrossistemas/Copasa, 1993).

No que concerne ao comportamento hidrológico, a bacia é definida por Hidrossistemas/Copasa (1993) como sendo uma área com rendimento superficial médio ou elevado, em regime torrencial (médias ou altas contribuições específicas e variação intra-anual intensa com cheias e estiagens pronunciadas).

De acordo com o Zoneamento Agroclimático de Minas Gerais (SEA, 1980), pode-se dividir a bacia do rio Grande em Camargos em duas regiões:

- uma região próximo ao reservatório de Camargos, com predominância de cerrado ou campo cerrado e com clima mesotérmico brando semi-úmido (4 a 5 meses secos); e
- uma região a montante, próximo à Serra da Mantiqueira, com predominância de Floresta Atlântica, classificada por IBGE (1992) como região de Floresta Estacional Semidecidual ou Floresta Tropical Subcaducifólia, e clima definido como mesotérmico brando úmido (1 a 2 meses secos). Nesta região, as temperaturas possuem médias anuais inferiores a 19 °C, sendo menores à medida que se sobe a Serra da Mantiqueira.

## RESULTADOS E CONCLUSÕES

A calibração do modelo *Rio Grande* para a bacia em estudo poderia ser feita em modo inteiramente automático ou inteiramente manual. Entretanto, foi adotado um procedimento de calibração combinando os dois modos, visando a redução do tempo necessário e da subjetividade associados à calibração inteiramente manual, a valorização das informações hidrológicas, topográficas e outras disponíveis, bem como a redução do número de parâmetros deixados à calibração automática, contribuindo assim para melhorar a eficiência e efetividade do modelo.

Os parâmetros dos módulos de concentração e de propagação do modelo IN foram estimados diretamente com base em informações disponíveis sobre a bacia hidrográfica. Já os parâmetros do módulo de produção, a exceção dos parâmetros de recessão dos escoamentos sub-superficial (CI) e subterrâneo (CG), dificilmente podem ter seus valores calculados de forma direta porque se referem

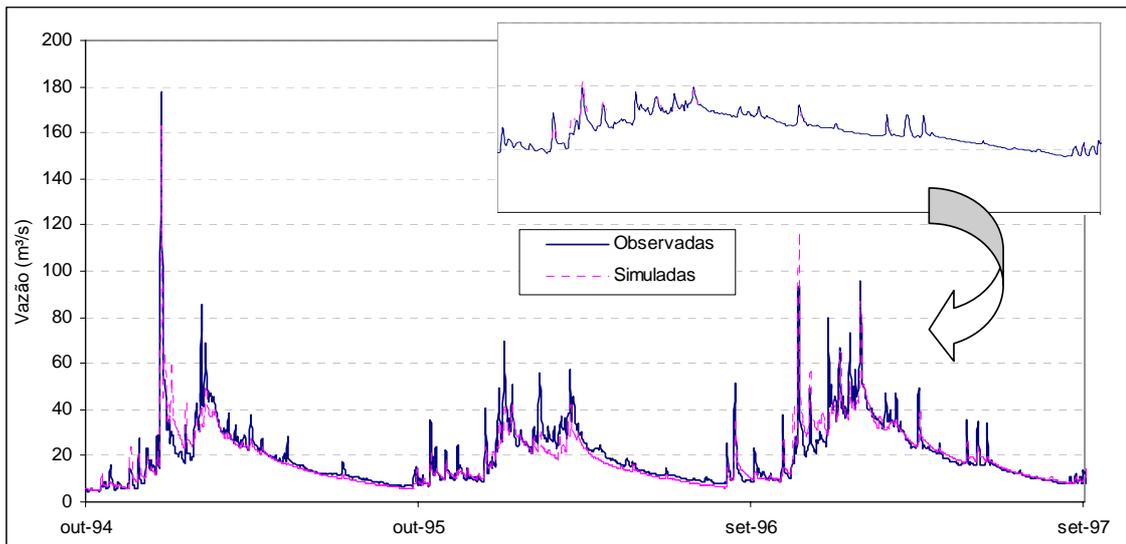
a processos físicos que não são regularmente observados em bacias hidrográficas. Desta forma, estes foram calibrados pelas rotinas automáticas disponíveis no módulo de calibração do modelo, refinando-se os resultados obtidos por meio da calibração manual.

Para tanto, foram utilizados dados pluviométricos, evaporimétricos e fluviométricos observados a nível diário, correspondentes ao período de 01/01/1994 a 31/07/1998. Os resultados obtidos após a calibração foram tidos como muitos bons. Entretanto, a validação dos parâmetros para dados obtidos a nível horário e períodos variando de 01/10/2000 a 31/03/2002, não foi verificada, produzindo assim algumas indagações, entre elas a possibilidade de ocorrência de eventuais incorreções na obtenção e/ou transmissão de valores telemedidos de cotas ou precipitações horárias.

Procedeu-se, portanto, a um reajuste dos parâmetros do módulo de produção de forma a reduzir as diferenças observadas entre as vazões simuladas e as observadas em intervalo horário. A Tabela 1 apresenta os valores finais obtidos para os parâmetros do modelo e a Figura 5 apresenta, a título de exemplo, os hidrogramas observados e simulados para a estação Aiuruoca.

**Tabela 1: Parâmetros Finais**

Sigla	Descrição	Aiuruoca	Bom Jardim de Minas	Fazenda Laranjeiras	Madre de Deus de Minas
<b>Módulo de Produção</b>					
<i>K</i>	Coef. de Correção da Evapot. Potencial	0,45	0,5	0,849	0,7
<i>IMP</i>	Fração de Área Impermeável (%)	3,8	4,1	6,2	5
<i>WU</i>	Tensão na Zona Superior (mm)	5	3	24,839	7
<i>WL</i>	Tensão na Zona Inferior (mm)	50	60	98,949	80
<i>WD</i>	Tensão na Zona Profunda (mm)	20	30	69,182	40
<i>SM</i>	Teor de Umidade Livre (mm)	65	80	88,659	60
<i>B</i>	Expoente da Curva de Umidade	0,8	0,86	0,733	1
<i>EX</i>	Expoente da Curva de Umidade Livre	0,5	0,3	0,313	0,4
<i>C</i>	Coeficiente de ETP por freatófitos	0	0	0,248	0
<i>KSS</i>	Coeficiente de Esc. Sub-Superficial	0,167	0,221	0,201	0,33
<i>KG</i>	Coeficiente de Esc. Sub-Subterrâneo	0,8	0,777	0,798	0,66
<i>CI</i>	Recessão do Esc. Sub-Superficial	0,9	0,8	0,842	0,75
<i>CG</i>	Recessão do Esc. Subterrâneo	0,992	0,993	0,997	0,995
<b>Módulo de Propagação</b>					
<i>C</i>	Celeridade	-	-	1	1
<i>D</i>	Difusividade	-	-	0,2	0,0508
<b>Módulo de Concentração</b>					
<i>Tc</i>	Tempo de Concentração (h)	7	19	36	27
<i>R<sup>2</sup></i>	Nash (%)	77,2	79,6	69,3	78,7



**Figura 5:** Hidrogramas diários observados e simulados para o Rio Aiuruoca em Aiuruoca.

A Figura 6 mostra a tela de apresentação do software. As Figuras 7 a 11, a seguir, sevem de exemplo dos principais resultados de calibração e previsão do modelo *Rio Grande*.



**Figura 6:** Tela de Apresentação do *Rio Grande*

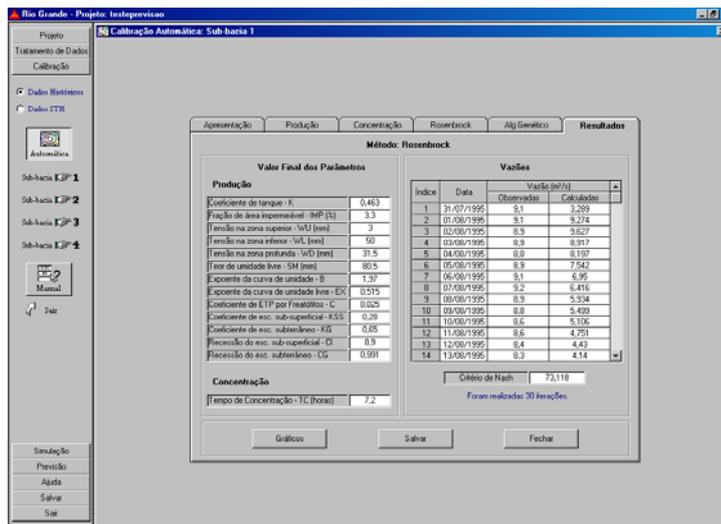


Figura 7: Resultados Analíticos para Calibração por Rosenbrock – Sub-bacia Aiuruoca

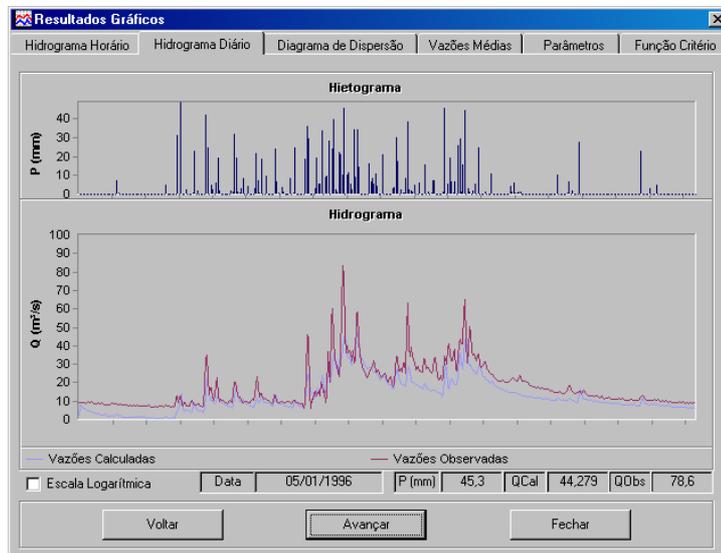


Figura 8: Resultados Gráficos para Calibração por Rosenbrock – Sub-bacia Aiuruoca

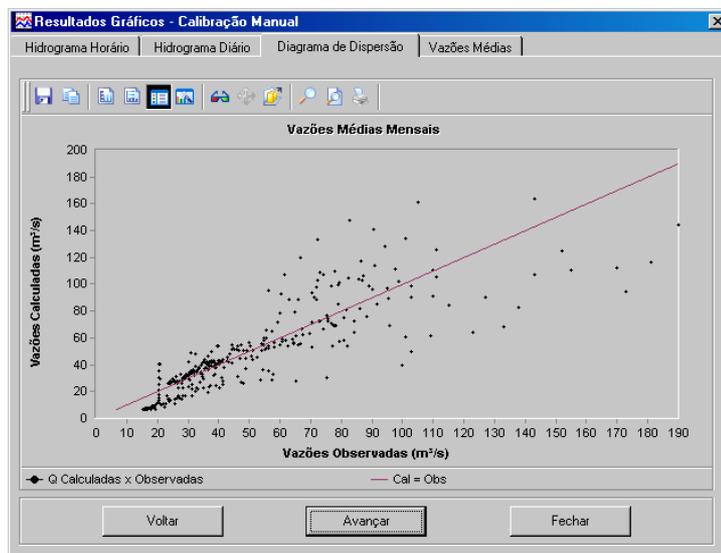


Figura 9: Diagrama de Dispersão de Vazões Médias Mensais s – Sub-bacia Madre de Deus

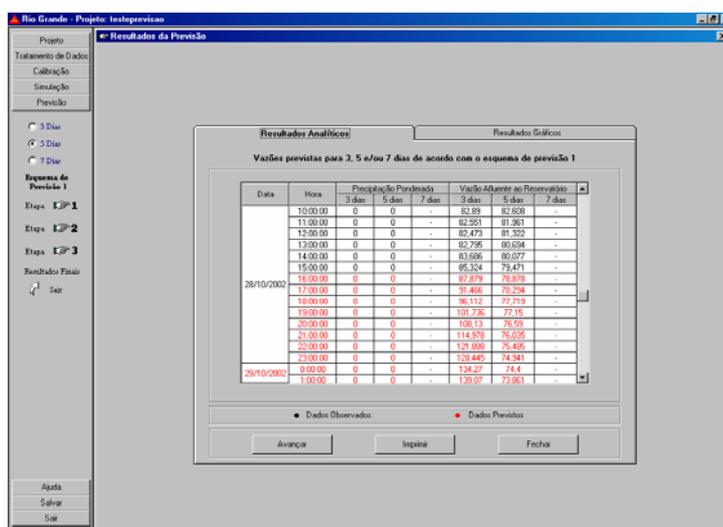


Figura 10: Resultados Analíticos para Previsão de Três e Cinco Dias pelo Esquema 1.

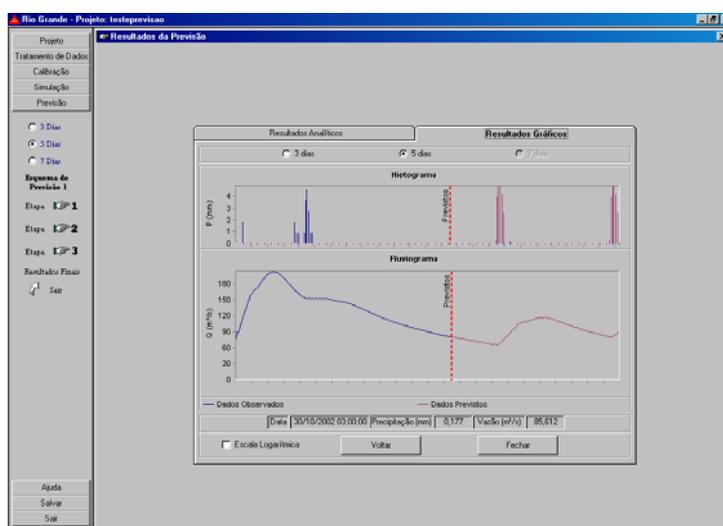


Figura 11: Resultado Gráfico para Previsão de Cinco Dias pelo Esquema 1.

O Modelo de Previsão e Simulação Hidrológica **Rio Grande** encontra-se atualmente em uso pelo setor de Planejamento Hidroenergético da CEMIG, realizando previsões de afluências em curto prazo para o reservatório da UHE Camargos, apresentado bons resultados, auxiliando, desta forma, a tomada de decisões com relação aos volumes de armazenamento e vertimento desta usina.

Este modelo está sendo aplicado inicialmente à bacia do rio Grande muito embora potencialmente apresente características estruturais que o tornam apto a realizar simulação e previsão hidrológica em bacias de variadas dimensões e tipologias. A generalização do modelo **Rio Grande** para aplicação em qualquer bacia requer uma nova etapa de intenso desenvolvimento de códigos de programação, de modo a torná-lo suficientemente modular e flexível à tipologia e conexão entre as sub-bacias que constituem um sistema genérico de simulação e previsão hidrológica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROWN, S., 1999. *Visual Basic 6 – Bíblia do Programador*. São Paulo. Ed. Berkley.
- DUAN, Q., S. SOROOSHIAN e V. GUPTA, 1992. *Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models*. Water Resources Research, vol. 28, n° 4, 1015-1031.
- HIDROSSISTEMAS/COPASA, 1993. *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*, Belo Horizonte.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 1981. *HEC-1 Flood Hydrograph Package - Reference Manual*. U. S. Army Corps of Engineers, Davis.
- KUESTER, J. L. e MIZE, J. H., 1973. *Optimization Techniques with FORTRAN*, McGraw-Hill, New York, 500 p.
- MICROSOFT, 1998, *Visual Basic 6 – Guia do Programador*. EUA. Microsoft Corporation.
- PONCE V. M., 1989. *Engineering Hydrology – Principles and Practices*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 608 p.
- ROSENBROCK, H.H., 1960. *An automatic method for finding the greatest or least value of a function*, Computer Journal, Vol. 3, pp. 175-184.
- SEA, 1980. *Zoneamento Agroclimático de Minas Gerais*, Belo Horizonte.
- TODINI E., 1996. *The ARNO rainfall-runoff model*. Journal of Hydrology 175, pp. 339-382.
- TODINI E., 1997. *The role of rainfall measurements and forecasts in real-time flood forecasting and management*. <http://www.unesco.org/uy/phi/libros/radar/art13.html>.
- TUCCI, C. E. M., *Modelos Hidrológicos*, 1ª Edição, Ed. Universidade UFRGS, Associação Brasileira de Recursos hídricos, 1998.
- WANG, W., 1999. *Visual Basic 6*. Rio de Janeiro. Ed. Campus.
- ZHAO, R. J., Y. L. ZHUANG, L. R. FANG, X. R. LIU e Q.S. ZHANG, 1980. *The Xinanjiang Model, Hydrological Forecasting Proceedings*, Oxford Symposium, IAHS 129, pp. 351-356.