APLICAÇÃO DO MODELO DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS OPERRES À BACIA DO RIO PARAGUAÇU NA BAHIA

Adelena Gonçalves Maia[1] & Swami Marcondes Villela[1]

Resumo – O modelo OperRes simula em tempo real a operação de reservatórios e atua como uma ferramenta de decisão no gerenciamento de estoques de água de um sistema de múltiplos reservatórios, em função de restrições vinculadas aos volumes armazenados. O presente trabalho apresenta a aplicação do modelo OperRes à bacia do rio Paraguaçu, localizada no estado da Bahia, com o objetivo de se verificar a sua adequação à região em estudo, através da comparação dos dados reais com os resultados das simulações. Também é feita a simulação da operação de treze açudes, representados no sistema, para se obter o resultado do seu comportamento durante um período de sete meses de estiagem.

Abstract – The OperRes model simulates in real time the reservoirs operation, working as part of a decision support system in the management of the water availability of a multiple reservoir system, based in restrictions of the actual water volumes. The OperRes model is applied to the Paraguaçu river basin, at Bahia State, Brazil, in order to verify its adequacy to the region, comparing real data and simulated values. The operation of a system composed of thirteen reservoirs is also simulated, in order to obtain results of their behavior during seven months of drought period.

Palavras-chave – operação de reservatórios; gerenciamento de estoques de água; bacia do rio Paraguaçu.

INTRODUÇÃO

A baixa disponibilidade hídrica existente na região do Nordeste brasileiro associada aos índices de evaporação e à estrutura geológica do solo, predominantemente cristalino, acarreta em

[1] EESC-USP (Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo); Departamento de Hidráulica e Saneamento; Av. Trabalhador São-carlense, nº400; CEP 13566-590; São Carlos; SP; Brasil; (16)273-9552;FAX: (16)273-9550 ; adelenam@hotmail.com , swami@sc.usp.br.

sérios conflitos referentes aos problemas de escassez de água na região. O principal conflito identificado na região em estudo está relacionado à disponibilidade quantitativa da água, o qual decorre do esgotamento do recurso devido ao uso intenso ou à insuficiência na sua disponibilidade.

É no sentido de auxiliar os Comitês de Bacias Hidrográficas, ou organizações afins que atuam no gerenciamento da água superficial, que foi desenvolvido o modelo OperRes e o respectivo software o qual é capaz de fornecer simulações que dão suporte aos tomadores de decisões. O sistema não se propõe a dar subsídios para o planejamento da bacia e sim fornecer informações sobre o comportamento dos reservatórios, tendo em vista as decisões tomadas pelo próprio grupo.

O modelo computacional OperRes será aplicado à bacia do rio Paraguaçu, no estado da Bahia. A bacia do Paraguaçu apresenta uma área de 55.317 km^2. O sistema foi estudado considerando os treze maiores reservatórios da bacia. O seu principal açude é formado pela barragem de Pedra do Cavalo, que é responsável pela maior parte do abastecimento da cidade de Salvador e região metropolitana.

A aplicação do modelo OperRes ao sistema de múltiplos reservatórios da bacia é feita em duas etapa: a verificação do modelo e a simulação propriamente dita. Na verificação a operação do sistema é simulada com dados reais da altura de chuva de 36 postos pluviométricos da região, além dos dados de altura d'água dos açudes de Apertado, França, Pedra do Cavalo e São José do Jacuípe. O objetivo da verificação do modelo é comparar o resultado da simulação com os dados reais de volume e altura d'água dos açudes, para posterior análise da validação do modelo para a bacia do rio Paraguaçu.

A simulação da operação do sistema é feita considerando um período de estiagem de sete meses, para análise da situação dos reservatórios no final deste período. A simulação é feita de acordo com quatro considerações sobre os volumes dos reservatórios no final do mês de maio:

- Volume inicial dos reservatórios igual à sua capacidade máxima;
- Volume inicial dos reservatórios igual a 75% da sua capacidade máxima;
- Volume inicial dos reservatórios igual a 50% da sua capacidade máxima; e
- Volume inicial dos reservatórios igual a 25% da sua capacidade máxima.

OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo principal a apresentação de um modelo de simulação que atua como ferramenta de decisão no gerenciamento de estoques de água de um sistema de múltiplos reservatórios. O modelo OperRes não tem como objetivo fornecer a solução ótima para o sistema, mas sim gerar conhecimento aos decisores, fornecendo informações sobre o comportamento dos reservatórios em função do cenário gerado pelos operadores do sistema.

Outros objetivos do trabalho referem-se a um estudo de caso, que será realizado na bacia do rio Paraguaçu. Estes objetivos são:

- a verificação do modelo através da comparação dos dados reais do sistema com os resultados da simulação do modelo; e
- a simulação de um período de estiagem, considerando diferentes condições iniciais de volume d'água dos reservatórios, para a análise do comportamento dos açudes em um período de seca.

O MODELO OPERRES

O modelo matemático de gerenciamento dos estoques de água em tempo real (OperRes) foi desenvolvido tendo como algoritmos básicos expressões matemáticas, referentes ao balanço hídrico dos reservatórios, que descrevem a operação do sistema no espaço e no tempo.

"O OperRes é um modelo computacional de simulação de operação de reservatórios que foi originalmente concebido pelos seguintes professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo: Antonio Marozzi Righeto, Rodrigo de Melo Porto e Swami Marcondes Villela. Sua primeira aplicação foi feita na bacia do rio Curu, estado do Ceará" (SHS NE, 1996). A versão atual do modelo foi desenvolvida pelos engenheiros Swami Marcondes Villela, Daniel Autran, Adelena Gonçalves Maia e Melissa Cristina Pereira Graciosa , e o aluno de graduação em Ciências da Computação Ricardo Froehlich, com a ajuda financeira da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

O modelo utiliza a aritmética de volumes do balanço hidrológico incluindo precipitação, evaporação, demandas requeridas pelos usuários de água e perdas em trânsito, no intuito de calcular a máxima vazão a ser liberada de cada reservatório, mediante restrições impostas ao sistema. As restrições levam em consideração os volumes de água disponíveis, no período de simulação e no horizonte de controle, o volume mínimo do reservatório e a taxa máxima de esvaziamento imposta para os reservatórios. O intervalo de tempo para cada simulação é de 15 dias, escala de tempo razoável para considerar a realização de balanços de massa no sistema como um todo. O balanço hídrico realizado no reservatório segue a expressão apresentada na **Equação 1**

$$Vf_i = V_i + VAFLU_i - VEVAP_i - Vr_i \qquad (1)$$

Onde:

Vf_i - volume final do reservatório i;

V_i - volume inicial do reservatório i;

$VAFLU_i$ - volume oriundo das chuvas e das vazões vertidas dos reservatórios à montante do reservatório i;

$VEVAP_i$ - volume perdido pelo reservatório i por evaporação; e

Vr_i - volume a ser liberado do reservatório i após as restrições impostas.

As restrições impostas ao sistema são: volume mínimo, fração máxima de esvaziamento e parâmetro BETA. A restrição de volume mínimo do reservatório impõe ao sistema que, caso o volume final do reservatório (Vf_i) seja menor que o seu volume mínimo ($Vmin_i$), altera-se o volume liberado, de forma que o volume mínimo seja garantido.

A fração máxima de esvaziamento dos reservatórios limita a liberação máxima de volume de água, na quinzena simulada, em função do seu volume atual. O volume máximo a ser liberado ($Vrtax_i$) de cada reservatório é calculado segundo a expressão apresentada na **Equação 2**.

$$Vrtax_i = Xkesv \times V_i \qquad (2)$$

Onde:

V_i – volume inicial do reservatório i

Xkesv - fração máxima de esvaziamento, no software denominada de taxa máxima de esvaziamento.

A última restrição imposta ao sistema é o valor de BETA, calculado em função da previsão do volume evaporado do reservatório durante o horizonte de controle ($EVTOT_i$), do volume atual do reservatório (V_i) e da demanda requerida ao longo do horizonte de controle ($DRTOT_i$). Esta restrição garante uma reserva mínima de água nos reservatórios para atender, mesmo que parcialmente, às demandas no período do horizonte de controle. O parâmetro BETA é definido pela **Equação 3**.

$$BETA_i = \left[\frac{V_i - EVTOT_i}{DRTOT_i} \right] \qquad (3)$$

As condições apresentadas a seguir são consideradas na determinação do valor final a ser adotado para BETA.

Se BETA >0 e BETA < 0,5, considera BETA = 0,5; e

Se BETA > 1, considera BETA = 1.

O volume liberado pelo reservatório (VR_i) será determinado pela relação da **Equação 4**.

$$VR_i = BETA_i \times DR_i \quad (4)$$

Onde DR_i é a demanda de água requerida pelo reservatório i.

A representação da bacia é feita através de um diagrama unifilar, no qual se reproduz a interdependência entre trechos a serem abastecidos e reservatórios que os abastecem. O diagrama representa o sistema através de reservatórios e trechos. Como será visto posteriormente os reservatórios são caracterizados fisicamente (relação da curva cota-voluma) e os trechos através dos seus comprimentos e das demandas de água requeridas.

O OperRes apresenta uma abordagem "soft" do processo decisório que auxilia na tomada de decisão. "Os modelos de tradição "soft" procuram representar modelos de questionamento sobre a realidade e não modelar a realidade. Eles conduzem ao aprendizado que substitui a otimização ou a satisfação; esta tradição segue a linguagem das *questões* e *acomodações* e não das *soluções*" Checkland[12] apud Matzenauer & Jardim (2001).

O OperRes segue um paradigma construtivista e de aprendizado. O pensamento construtivista aplicado ao processo decisório tem como característica básica a valorização da subjetividade. Matzenauer & Jardim (2001) apresentam outras características, como:

- as ações potenciais não são mutuamente exclusivas, nem necessariamente factíveis (podem ser recomendações);
- as preferências dos decisores não são bem definidas. Existem incertezas, crenças parciais, preconceitos, conflitos e contradições;
- é impossível definir se uma decisão é boa ou ruim apenas com base em um modelo matemático;
- no processo decisório há influência de fatores organizacionais, culturais e pedagógicos, que contribuem para a qualidade e sucesso da decisão;
- há a convicção do permanente aprendizado;
- o objetivo não é encontrar uma solução ótima, mas sim gerar conhecimento aos decisores; e
- o decisor único é um mito. Vários atores tomam parte do processo decisório direta ou indiretamente.

[12] CHECKLAND, P.B. (1985). From Optimizing to Leaming: A Development of Systems Thinking for the 1990s. Journal of Operational Research Soe. Vol 36, nº 9, pp. 757-767.

"Segundo Dr. António Damásio, neurologista português que é um dos maiores pesquisadores da mente humana, em entrevista à revista Veja de 25/06/2001, as emoções são extraordinariamente importantes no processo de decisão, pois fazem parte do mecanismo neurológico de decisão" Matzenauer & Jardim (2001).

O OperRes é um modelo geral, sendo possível a sua aplicação em qualquer sistema de múltiplo reservatórios. A entrada dos dados que caracterizam o sistema é feita pela primeira parte do modelo, responsável pelo pré-processamento dos dados, sendo escrito em linguagem Python; o programa "cfg.py", constrói os arquivos de entrada para serem utilizados no programa principal, o "oper_res.py".

Para a utilização do modelo OperRes é preciso inicialmente configurar a bacia a ser analisada através de um diagrama unifilar. O diagrama é composto por reservatórios e trechos. A numeração dos reservatórios e trechos deve ser iniciada pelos cursos d'água de menor ordem, a contagem deve ser crescente até ser finalizada no rio principal. A **FIGURA 1** apresenta o diagrama unifilar da bacia do rio Paraguaçu.

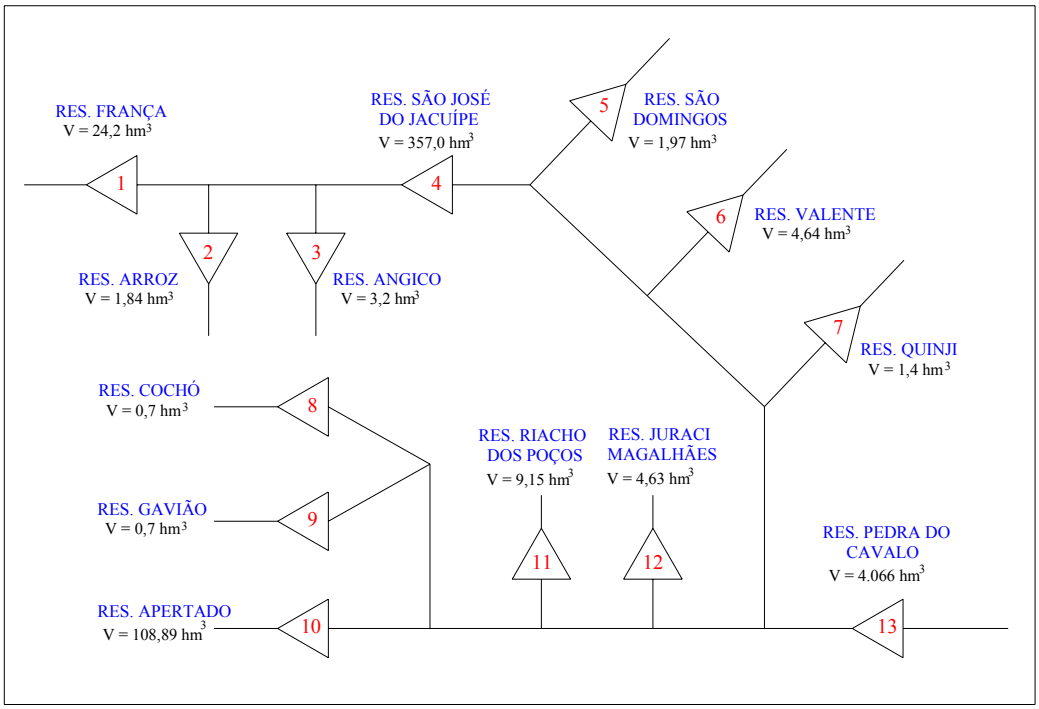

Figura 1: Diagrama Unifilar da bacia do rio Paraguaçu.

O programa geral " cfg.py" apresenta uma janela contendo seis guias: trechos, evaporação, reservatórios, postos, reservatórios à montante e dependências. Na guia "trechos", o usuário visualiza uma listagem com todos os trechos existentes na bacia hidrográfica, de modo que se possa editar cada um destes, clicando no botão "propriedades", a partir do qual aparecerá uma caixa de diálogo. Nesta caixa de diálogo, o usuário entrará com os dados de comprimento do trecho, em

quilômetros, e as 24 demandas quinzenais, que representam um ano, em m^3/s. A **FIGURA 2** apresenta a referida tela.

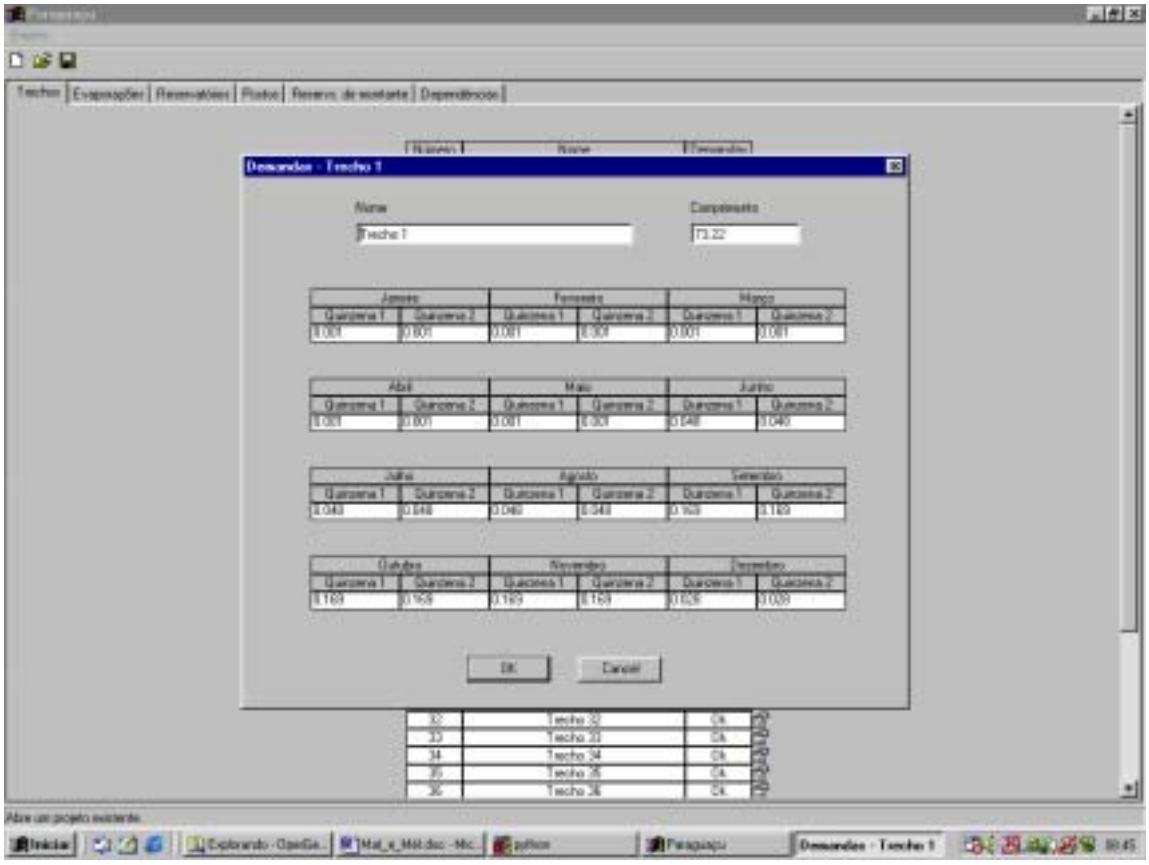

Figura 2: Tela com o comprimento e demandas do trecho.

Na guia "Evaporações", o usuário fornecerá, para cada quinzena, os valores das evaporações quinzenal, em mm/mês, no período de um ano.

Os dados de cada reservatório podem ser editados abrindo-se uma caixa de diálogo, **Figura 3** onde é inserido o nome dos reservatórios, os seus os valores de área de drenagem do reservatório, em km^2, níveis máximo e mínimo dos reservatórios, em metros, vazão máxima liberada de cada reservatório quando estão cheios, em m^3/s, e a relação alfa1, proveniente da curva cota – volume do reservatório, onde se considera que a equação do volume em função da altura d´água suposta para o modelo é $V=\alpha.h^3$. Além destes dados deve-se fornecer o valor de ACMI, AMCII e AMCIII, que são os valores do "numero da curva" utilizados no Método do "Curve Number" desenvolvido pelo Departamento de Conservação do Solo norte-americano, SCS (Soil Conservation Service), onde são considerados fatores de umidade, grau de vegetação, tipo e ocupação do solo.

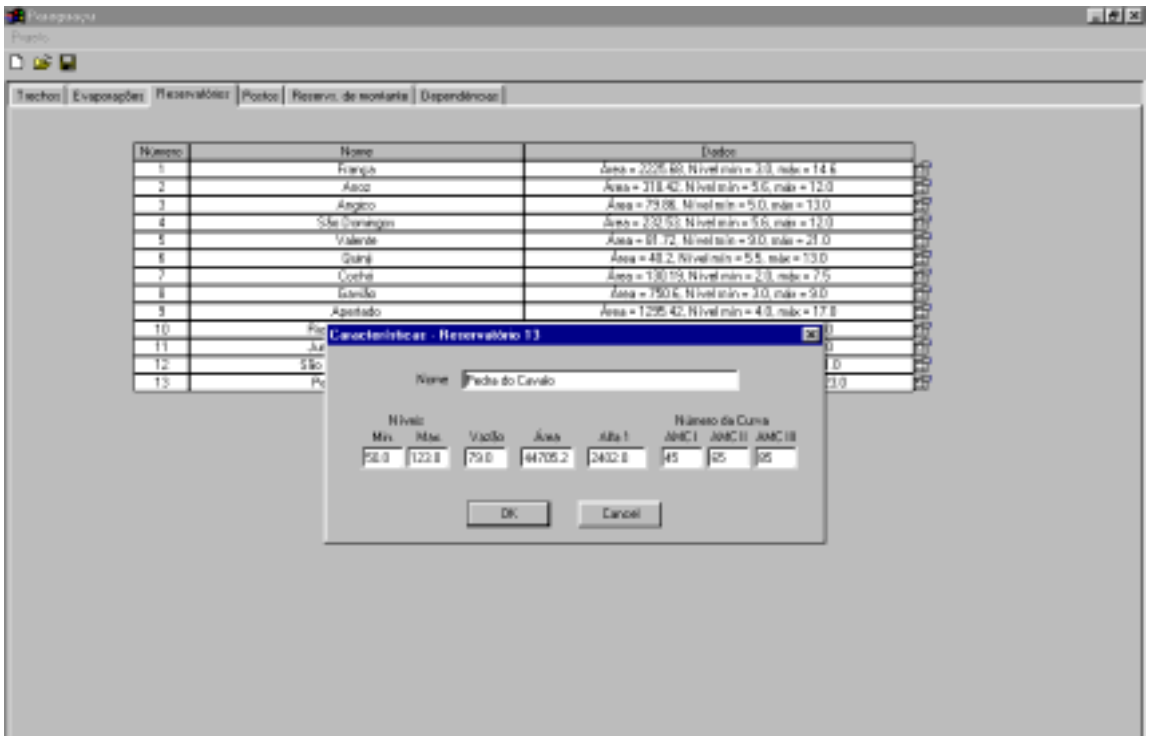

figura 3: Tela com os dados do reservatório de Pedra do Cavalo.

Na guia “Postos” deve-se listar, para cada reservatório, todos os postos pluviométricos que apresentam a sua área de influência dentro da área de drenagem do reservatório, ou seja, os postos nos quais a precipitação terá contribuição para bacia do reservatório. As áreas de contribuição de cada posto pluviométrico são calculadas pelo método de Thiessen, em um processo externo ao programa.

Na guia “Reservatórios de Montante” deve-se informar todos os reservatórios que se encontram diretamente à sua montante, configurando numericamente a disposição dos açudes no diagrama unifilar.

Na guia “Dependências” deve-se fornecer todos os trechos que podem ser abastecidos pelos reservatórios. Estes trechos podem ter dependência exclusiva, quando são abastecidos apenas por um reservatório, ou parcial, quando abastecidos por mais de um reservatório.

A segunda parte do programa, responsável pela simulação da operação de um sistema de reservatórios (oper_res.py), apresenta uma interface elaborada em linguagem Python para o programa de cálculo elaborado em linguagem Fortran.

A operação do modelo é feita a partir da entrada de dados referentes à quinzena inicial de operação, ao horizonte de controle (quinzenal), à fração máxima de esvaziamento dos reservatórios, aos níveis d’água dos reservatórios, à umidade do solo e à precipitação registrada nos postos pluviométricos, no período (quinzena) de análise e no período anterior.

O botão Iniciar Simulação dispara o cálculo do modelo, e o botão Continuar Simulação dá

andamento ao processo, utilizando os resultados do cálculo anterior.

O modelo processa os dados de entrada e fornece como resposta os níveis d'água dos reservatórios no final do período de análise, a vazão requerida em cada reservatório, a vazão liberada pelo mesmo, a vazão total requerida pelo sistema e a vazão total liberada pelo sistema. A **FIGURA 4** ilustra um resultado de simulação, com a avaliação do sistema.

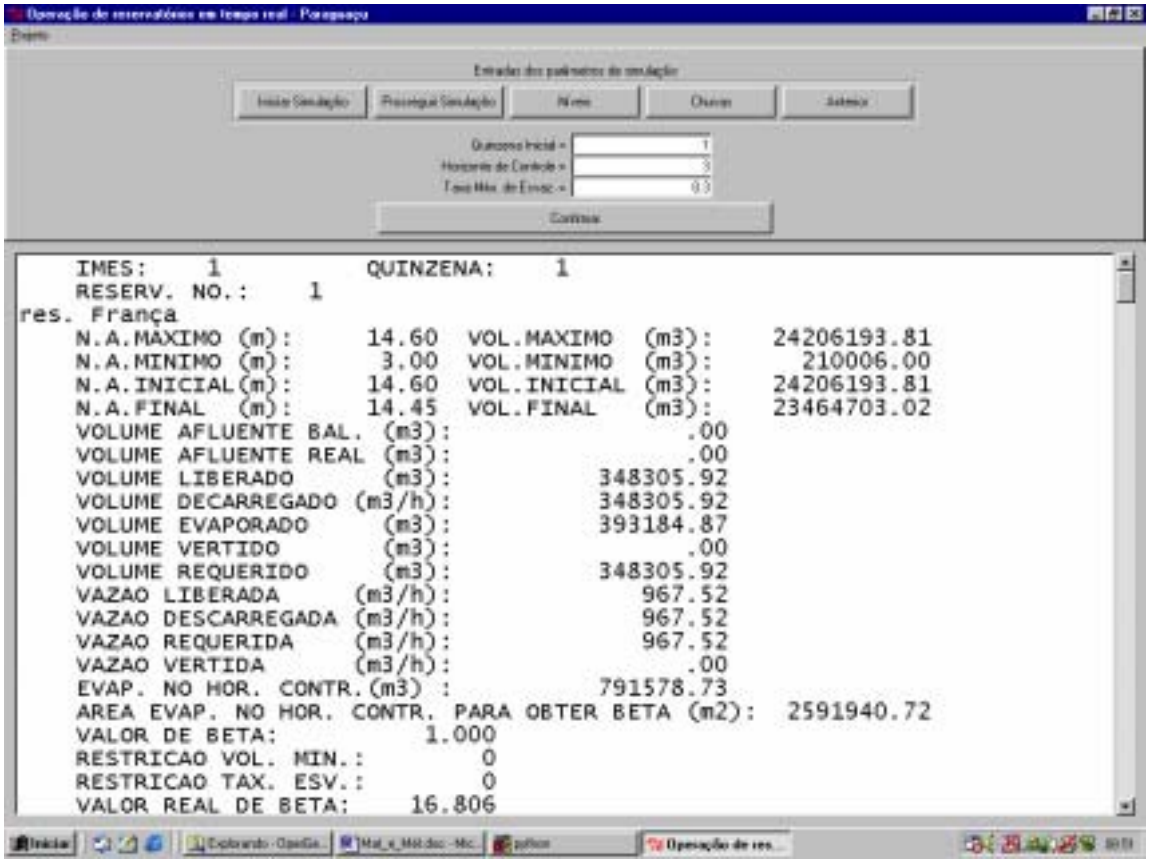

Figura 4: Resultado final de um processo de simulação.

ESTUDO DE CASO

O modelo OperRes foi aplicado na bacia do rio Paraguaçu, Bahia. Os dados utilizados para caracterizar o sistema de reservatórios foram inseridos no programa de pré-processamento do modelo. A partir de então, os arquivos com os dados de entrada do modelo principal foram utilizados no programa principal, responsável pela simulação da operação do sistema de reservatórios.

Verificação da validade do modelo

A verificação é o processo de determinação da exatidão do modelo de simulação, que representa a descrição conceitual do sistema. Na fase de verificação dados de entrada reais e

parâmetros do modelo são utilizados para gerar resultados que serão comparados com os dados existentes, para se verificar se o modelo simula adequadamente o sistema.

A operação do sistema de múltiplos reservatórios da bacia do rio Paraguaçu foi simulada com finalidade de fazer a verificação do modelo matemático, considerando os dados reais de precipitação e alturas d'água iniciais e finais dos reservatórios. Os dados de precipitação dos postos pluviométricos considerados e das alturas d'água dos reservatórios de Apertado, França, São José do Jacuípe e Pedra do Cavalo foram cedidos pela SRH- Ba (Superitendência de Recursos Hídrico). Foi simulado a operação destes reservatórios no período compreendido entre 31.05.2001 e 30.11.2001.

Iniciou-se a simulação da quinzena inicial 11, referente a primeira quinzena do mês de Junho, com um período de controle de três quinzenas e fração máxima de esvaziamento de 0,3; prosseguiu a simulação até a última quinzena do mês de novembro.

A **FIGURA 5** apresenta a comparação da altura d'água nos reservatórios entre os dados reais e os resultados finais da simulação, em 30 de novembro de 2001. As **TABELAS 1 e 2** apresentam os valores de altura e volume d'água, reais e simulados, mês a mês, e o erro referente ao final da simulação.

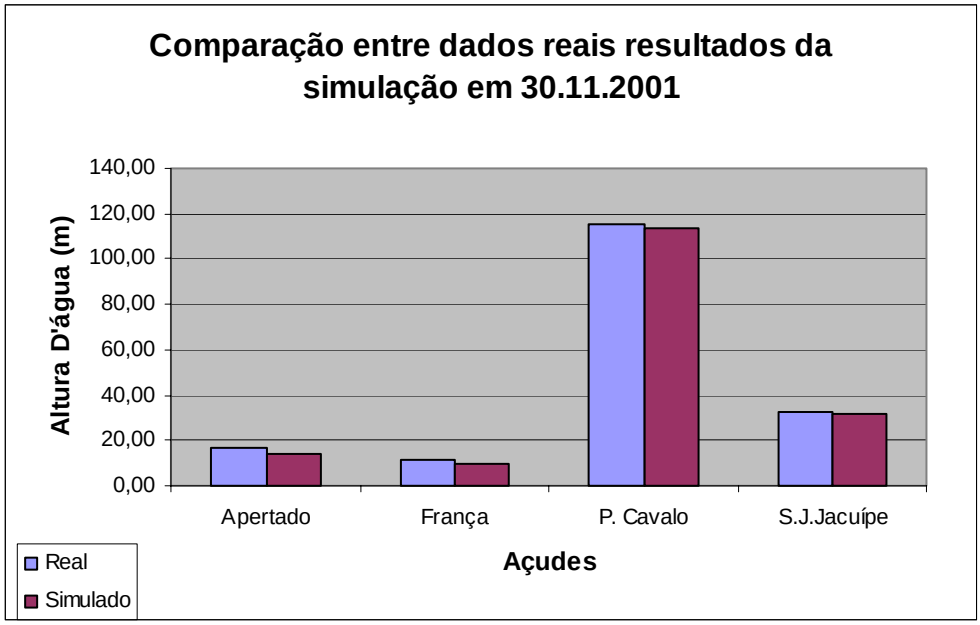

Figura 5: Comparação entre dados reais e o resultado da simulação no período de 6 meses.

Tabela 1: Comparação entre os resultados e os dados reais das **alturas** dos reservatórios.

Dados Reais e Simulados da altura d'água dos açudes, em metros.

Período	Apertado		França		Pedra do Cavalo		São José do Jacuípe	
	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
30-jun-2001	17,00	16,70	12,95	12,78	115,74	115,32	33,73	33,77
31-jul-2001	16,98	16,38	12,88	12,43	115,82	115,02	33,86	33,53
31-ago-2001	17,00	16,04	12,68	12,05	115,95	114,70	33,73	33,27
30-set-2001	16,95	15,53	12,32	11,42	116,30	114,32	33,47	32,89
31-out-2001	16,89	14,99	11,90	10,72	116,69	113,94	33,28	32,48
30-nov-2001	16,57	14,40	11,52	9,96	115,53	113,54	33,00	32,06
Erro Final (%)	-13,10		-13,55		-1,72		-2,85	

Tabela 2: Comparação entre os resultados e os dados reais dos **volumes** dos reservatórios.

Dados Reais e Simulados do volume d'água dos açudes, em hectômetros cúbicos.

Período	Apertado		França		Pedra do Cavalo		São José do Jacuípe	
	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado	Real	Simulado
30-jun-2001	109,40	137,80	18,77	16,25	3.983,78	3.683,78	125,67	143,03
31-jul-2001	108,56	130,07	18,55	14,96	3.995,39	3.654,67	128,00	139,94
31-ago-2001	109,26	122,03	17,86	13,60	4.014,30	3.624,19	125,66	136,69
30-set-2001	108,18	110,88	16,65	11,59	4.065,60	3.588,62	120,98	132,07
31-out-2001	107,40	99,75	15,32	9,59	4.123,39	3.552,75	117,74	127,26
30-nov-2001	103,12	88,44	14,15	7,69	3.953,45	3.515,64	112,88	122,38
Erro Final (%)	-14,24		-45,67		-11,07		8,42	

Através da análise das tabelas é possível observar uma incompatibilidade entre os dados simulados de altura e volume d'água do açude de Apertado, nos meses de junho, julho, agosto e setembro; neste período os volumes simulados são maiores do que os reais, enquanto que a altura

d´água simulada é menor. A inconsistência destes dados se deve a não completa adequação da equação do reservatório, adotada pelo modelo ($V = \alpha.h^3$), com os dados de cota-área-volume do açude de Apertado.

Na realidade o programa de cálculo dos volumes (V) dos reservatórios em função das suas alturas d´água (h) poderia ser feito diretamente com a equação que melhor se adaptasse aos dados. Entretanto, neta fase, por simplicidade adotou-se a equação $V = \alpha.h^3$ para todos os reservatórios.

Nos reservatórios com dados de volumes para os diversos valores de altura d´água, o valor de alfa foi calculado pelo método dos mínimos quadrados, isto é:

$$\alpha_1 = \frac{\sum V_i}{\sum (h_i)^3}$$

Nos reservatórios onde apenas se conhecia os valores do volume máximo do reservatório ($V_{MÁX}$) e da sua altura máxima ($h_{MÁX}$), estimou-se α por:

$$\alpha_1 = \frac{V_{iMÁX}}{(h_{iMÁX})^3}$$

Como pode-se observar na **FIGURA 6** para valores elevados de altura d´água o valor do volume calculado através do parâmetro alfa é superestimado. O reservatório de Apertado no período analisado apresentava uma altura d´água de 16 a 17 metros, faixa que apresenta um erro absoluto de cerca de 20 a 40 hm^3, entre o volume real e o estimado. Este erro pode explicar os resultados da simulação do açude de Apertado.

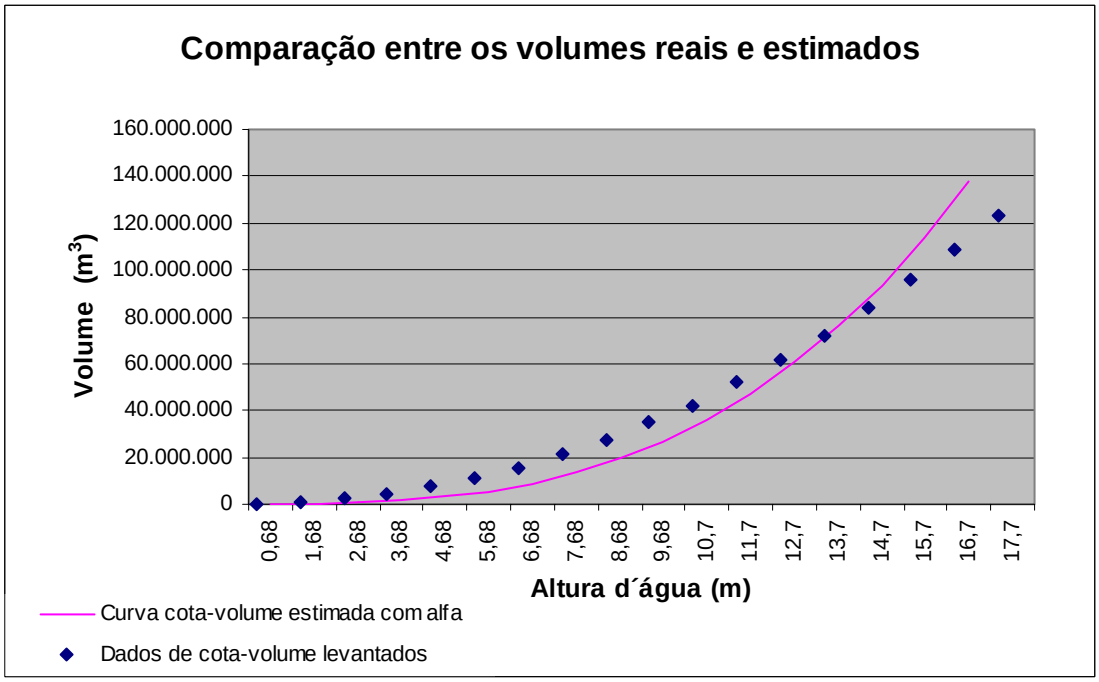

Figura 6: Comparação entre os volumes reais e estimados, por alfa, do açude de Apertado.

O açude de São José do Jacuípe também apresentou incompatibilidades nos dados reais e simulados de altura e volume d'água do açude, onde no período de julho a novembro os volumes simulados são maiores que os reais, enquanto que as alturas simuladas são menores. A análise do volume real, proveniente da curva cota-área-volume, e do estimado pelo valor de alfa também foi realizada e se observou que nas alturas de 33 a 34 metros de altura d'água (altura do açude no período de simulação) ocorria um erro no cálculo do seu volume em cerca de 3 a 5,5 hm^3.

A análise do resultado das simulações indica que as demandas estão provavelmente superestimadas, devido à ocorrência de erros negativos nas **TABELAS 1 e 2**. O período analisado acentuou ainda mais a discrepância entre os dados reais e simulados, por englobar os meses de setembro, outubro e novembro, período onde existe uma maior exigência do sistema de irrigação, que demanda 25% da vazão média destinada à atividade.

É importante reafirmar que a simulação foi feita por seis meses seguidos sem a atualização, mês a mês, dos dados de altura d'água real dos reservatórios, sendo assim ocorreu o acúmulo do erro dos seis meses simulados. No caso de simulações de menor período o modelo representaria melhor o sistema.

A verificação do modelo apresentou como resultado baixos erros dos valores simulados com relação aos dados reais, em termos de altura d´água dos reservatórios. Desta forma considera-se o modelo válido para ser aplicado nas simulações propostas. No entanto, recomendações são apresentadas posteriormente para que o modelo possa representar melhor o sistema.

Simulações

A operação do sistema de treze reservatórios da bacia do rio Paraguaçu foi simulada considerando um período de estiagem de sete meses, iniciando no inicio do mês de junho e finalizando no final de dezembro. As simulações foram feitas considerando quatro situações:

- Simulação 1: volume inicial dos reservatórios igual à sua capacidade máxima;
- Simulacao2: volume inicial dos reservatórios igual a 75% da sua capacidade máxima;
- Simulação 3: volume inicial dos reservatórios igual a 50% da sua capacidade máxima; e
- Simulação 4: volume inicial dos reservatórios igual a 25% da sua capacidade máxima.

A partir das alturas dos reservatórios, correspondentes aos volumes iniciais considerados, iniciou-se a simulação dos reservatórios por 14 (quatorze) quinzenas com a altura de chuva dos postos pluviométricos igual a 0 (zero). As **TABELAS 3, 4, 5 e 6** apresentam os resultados das simulações. A última coluna das tabelas apresenta o valor do tempo de abastecimento garantido (TAG) para cada reservatório na simulação proposta. Este tempo é fornecido em quinzenas e

representa um índice de vulnerabilidade do reservatório; deve-se ressaltar que este índice é calculado para períodos de estiagem.

Tabela 3: Simulação com volume inicial dos reservatórios igual a sua capacidade máxima.

Nome dos Açudes	Altura Inicial (m)	Altura Final (m)	Volume Inicial (hm^3)	Volume Final (hm^3)	% da vazão requerida liberada	Esvaziamento do açude	TAG (quinzenas)
França	14,60	11,65	24,20	12,29	100,0		14
Arroz	12,00	5,60	1,84	0,19	0,0	30/set	8
Angico	13,00	5,00	3,20	0,18	69,1		14
São Domingos	12,00	8,87	1,96	0,79	100,0		14
Valente	21,00	16,83	4,64	2,39	100,0		14
Quinji	13,00	5,50	1,64	0,12	0,0	30/nov	12
Cochó	7,50	2,00	0,90	0,02	0,0	15/nov	11
Gavião	9,00	3,00	0,70	0,03	0,0	15/out	9
Apertado	17,00	13,98	108,89	80,91	100,0		14
Riacho dos Poços	12,00	5,50	9,15	0,88	0,0	15/dez	13
Juracy Magalhães	12,00	5,50	4,63	0,45	0,0	31/out	10
São José do Jacuípe	41,00	39,00	357,00	220,22	100,0		14
Pedra do Cavalo	123,00	120,69	4.969,00	4.223,12	100,0		14

Tabela 4: Simulação com volume inicial dos reservatórios igual 75% da sua capacidade máxima.

Nome dos Açudes	Altura Inicial (m)	Altura Final (m)	Volume Inicial (hm^3)	Volume Final (hm^3)	% da vazão requerida liberada	Esvaziamento do açude	TAG (quinzenas)
França	12,77	9,06	18,15	5,79	100,0		14
Arroz	10,90	5,60	1,38	0,19	0,0	15/set	7
Angico	11,81	5,00	2,40	0,18	0,0	15/dez	13
São Domingos	10,90	7,04	1,47	0,40	100,0		14
Valente	19,08	13,95	3,48	1,36	100,0		14
Quinji	11,81	5,50	1,23	0,12	0,0	31/out	10
Cochó	6,81	2,00	0,68	0,02	0,0	31/out	10
Gavião	8,18	3,00	0,53	0,03	0,0	15/out	9
Apertado	14,84	10,97	81,67	39,04	100,0		14
Riacho dos Poços	10,90	5,50	6,86	0,88	0,0	15/nov	11
Juracy Magalhães	10,90	5,50	3,47	0,45	0,0	30/set	8
São José do Jacuípe	39,49	37,34	267,75	193,26	100,0		14
Pedra do Cavalo	113,91	111,38	3.726,75	3.318,65	100,0		14

Tabela 5: Simulação com volume inicial dos reservatórios igual 50% da sua capacidade máxima.

Nome dos Açudes	Altura Inicial (m)	Altura Final (m)	Volume Inicial (hm^3)	Volume Final (hm^3)	% vazão requerida liberada	Esvaziamento do açude	TAG (quinzenas)
França	10,81	4,88	12,10	0,90	100,0		14
Arroz	9,52	5,60	0,92	0,19	0,0	31/ago	6
Angico	10,32	5,00	1,60	0,18	0,0	15/nov	11
São Domingos	9,53	5,60	0,98	0,20	0,0	30/nov	12
Valente	16,67	9,07	2,32	0,37	98,4		14
Quinji	10,32	5,50	0,82	0,12	0,0	15/set	7
Cochó	5,95	2,00	0,45	0,02	0,0	15/out	9
Gavião	7,14	3,00	0,35	0,03	0,0	30/set	8
Apertado	12,29	5,70	54,45	5,48	93,3		14
Riacho dos Poços	9,52	5,50	4,58	0,88	0,0	31/out	9
Juracy Magalhães	9,52	5,50	2,32	0,45	0,0	31/ago	6
São José do Jacuípe	36,27	33,79	178,50	143,22	100,0		14
Pedra do Cavalo	103,29	100,38	2.483,00	2.429,46	100,0		14

Tabela 6: Simulação com volume inicial dos reservatórios igual 25% da sua capacidade máxima.

Nome dos Açudes	Altura Inicial (m)	Altura Final (m)	Volume Inicial (hm^3)	Volume Final (hm^3)	% da vazão requerida liberada	Esvaziamento do açude	TAG (quinzenas)
França	8,16	3,00	6,05	0,21	0,0	30/nov	12
Arroz	7,56	5,60	0,46	0,19	0,0	31/jul	4
Angico	8,19	5,00	0,80	0,18	0,0	15/set	7
São Domingos	7,56	5,60	0,49	0,20	0,0	31/ago	6
Valente	13,23	9,00	1,16	0,37	0,0	15/set	7
Quinji	8,19	5,50	0,41	0,12	0,0	15/ago	5
Cochó	4,72	2,00	0,23	0,02	0,0	15/set	7
Gavião	5,67	3,00	0,18	0,03	0,0	31/ago	6
Apertado	8,94	4,00	27,22	1,89	0,0	31/out	10
Riacho dos Poços	7,56	5,50	2,29	0,88	0,0	15/ago	5
Juracy Magalhães	7,56	5,50	1,16	0,45	0,0	30/jul	4
São José do Jacuípe	31,46	27,86	89,25	80,32	100,0		14
Pedra do Cavalo	77,41	72,89	1.241,50	930,20	100,0		14

Através da análise dos resultados das simulações é possível observar que os reservatórios maiores foram capazes de resistir melhor à estiagem, mas deve-se considerar que a capacidade do

reservatório não é o único fator decisivo nesta análise, as demandas requeridas pelo reservatório também foram importantes para o esvaziamento.

O açude de São Domingos, com capacidade de 1,96 hm^3, foi capaz de atender a toda a demanda requerida no final da 2ª simulação, enquanto que o açude de Angico, com maior capacidade, esvaziou antes do final da simulação; este fato pode ser explicado pelo açude de São Domingos demandar um menor volume de água.

Na última simulação, onde ocorreu uma maior restrição do volume inicial, os únicos açudes que foram capazes de atender a demanda de água foram os açudes de São Jose do Jacuípe e de Pedra do Cavalo. O açude de Pedra do Cavalo é capaz de atender totalmente à sua demanda, não acarretando problemas para o abastecimento de Salvador.

O açude de São Jose do Jacuípe apresentou capacidade de atendimento total da demanda estimada. Deve-se ressaltar que não foi considerado o funcionamento da Adutora do Sisal, que demandaria uma média de 0,36m^3/s, além do projeto de irrigação da Secretaria da Agricultura, Irrigação e Reforma Agrária (SEAGRI) com demanda de 0,55 m^3/s. A consideração destas demandas foi feita em uma posterior simulação com o volume inicial dos reservatórios igual 25% da sua capacidade máxima; como resultado foi obtida uma altura d'água do açude de São José do Jacuípe de 24,47 metros e 54,40 hm^3 de volume, com o atendimento total da demanda.

Os cinco maiores açudes da bacia do rio Paraguaçu (Pedra do Cavalo, São José do Jacuípe, Valente, Apertado e França) apresentaram um bom comportamento frente ao período de estiagem, considerando um volume inicial igual a 50% da capacidade máxima do açude; atendendo de forma satisfatória às suas demandas.

DISCUSSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo OperRes tem como objetivo básico auxiliar os Comitês de Bacias Hidrográficas, fornecendo informações sobre o comportamento dos reservatórios em função do cenário gerado. O modelo apesar de ser generalizado poderá ser modificado no futuro com o objetivo de atender aos anseios específicos dos usuários do modelo, considerando peculiaridades da bacia hidrográfica em estudo.

O modelo OperRes apresentado foi aplicado a um sistema composto por treze reservatórios na bacia do rio Paraguaçu, Bahia. O resultado da verificação do modelo para a sua aplicação na área estudo apresentou resultados razoáveis, sendo o modelo considerado assim validado para as simulações propostas.

A equação do reservatório utilizada pelo modelo ($V = \alpha.h^3$) deve ser melhor estudada, podendo-se inserir uma nova equação que represente adequadamente o sistema, ou fazer uso direto

dos dados de cota-volume dos reservatórios como dados de entrada do modelo, procurando-se assim representar adequadamente o sistema, sem as inconsistências dos resultados ocorridas na verificação do modelo.

As condição de umidade e ocupação do solo da bacia do rio Paraguaçu deve ser melhor estudadas para que o parâmetro referente ao "número da curva" utilizado seja proveniente de uma caracterização mais precisa da região.

A melhora dos resultados apresentados só será possível a partir do momento que se faça uma maior esforço para o monitoramento dos recursos hídricos da bacia, através dos órgãos responsáveis ou com a criação e funcionamento do Comitê da Bacia do Rio Paraguaçu, pois os dados de demanda de água são extremamente importantes para a operação correta do modelo. A organização dos usuários tornará possível a atualização dos dados de entrada do modelo e sua posterior verificação, para auxiliar o Comitê na negociação das demandas de água a serem liberadas a fim de atender adequadamente os usuários.

Esforços já estão sendo feitos para a organização e atualização dos dados de demanda hídrica da região. LISBOA NETO et al. (2001) apresentaram um trabalho desenvolvido pelo Laboratório de Sistema de Suporte a Decisões da Escola Politécnica – USP para a SRH do Estado da Bahia; este projeto inclui um cadastro de usuários e dois módulos de cálculo de demandas hídricas, num ambiente GIS, com a integração de dois módulos de SSD, sendo um deles um modelo de rede de fluxo (ModSim). Espera-se que com a organização e disponibilização destes dados seja possível a maior compreensão do comportamento do Sistema Hídrico da bacia do Paraguaçu. Desta forma poderá ser melhor planejado o gerenciamento dos estoques de água, com vista à minoração dos impactos causados por eventos extremos.

Estudos futuros são recomendados para a atualização dos dados de entrada do sistema, para que haja uma maior confiabilidade no resultado do modelo. Outros modelos poderão ser estudados para auxiliar grupos como os Comitês de Bacias Hidrográficas no gerenciamento dos recursos hídricos da região, mas deve-se evitar modificações da versão atual do modelo OperRes que possam descaracterizar-lo e alterar os objetivos por ele proposto.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SHS NE - Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda. (1996). *Plano Diretor da Bacia do Curu*. Fortaleza.

Matzenauer, H.B.; Jardim, S.B.. (2001). *Estudo comparativo das metodologias MCDM e MCDA na gestão dos recursos hídricos*. (CD ROM) XIV Smpósio Basileiro de Rcursos Hdricos. V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Aracaju, SE. ABRH.

Lisboa Neto, H.; Porto0, R.L.; Zahed Filho, K.; Mello, A.V.; Carvalho, M.A.; Maecellini, S.S.; Zamprogno, D.; Blume, L.; Cavalcanti, R. (2001). *Sistema de Suporte a decisão em engenharia de recursos hídricos: desenvolvimento piloto para as bacias dos rios Paraguaçu e Itapicuru, no estado da Bahia*. (CD ROM) XIV Smpósio Basileiro de Rcursos Hdricos. V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Aracaju, SE. ABRH.