

ESTIMATIVA DAS VAZÕES NATURAIS NAS SUB-BACIAS DO VACACAÍ MIRIM ATRAVÉS DE MODELO SIMPLIFICADO

Rodrigo C. D. Paiva¹; Eloiza M. C. D. Paiva² & João Batista D. Paiva³

RESUMO --- O objetivo deste trabalho é propor, aplicar e avaliar metodologia de determinação de vazões tendo por fim obter informações para enquadramento dos cursos d'água em regiões com carência de dados hidrológicos observados. A área em estudo é a bacia do Rio Vacacaí Mirim, com 1120 km², localizada no centro do estado do Rio Grande do Sul, no sul do Brasil. Caracteriza-se por regiões com alta taxa de urbanização, sérios conflitos de uso de água devido à irrigação de arroz e áreas com alta degradação ambiental, além de escassez de dados hidrológicos. Foi concebido um modelo distribuído em sub-bacias, implementado em ambiente MATLAB, que utiliza o SMAP para simular a vazão nas sub-bacias, o algoritmo SCE-UA para ajuste dos parâmetros e propaga os volumes de forma simplificada, considerando as retiradas de água. A metodologia proposta mostrou-se eficiente, indicando graves problemas referentes à demanda de irrigação e confirmando o cenário que se repete periodicamente na bacia do Rio Vacacaí Mirim, que é do rio principal quase “seco” na época de irrigação da lavoura de arroz.

ABSTRACT--- The idea of the present work is to propose, apply and validate a methodology for flow series determination to obtain information for water resources management studies in basins with hydrological data deficiency. The study area is the Vacacaí Mirim River basin, that drains an area of 1120 km² and is located at the center of de Rio Grande do Sul state, in the south of Brazil. It has some regions with high urbanization density, serious conflicts of water use caused mainly by flood irrigated rice farming and areas with high environmental degradation, besides lack of hydrological data. A semi distributed hydrologic model was implemented in MATLAB. It uses the SMAP rainfall-runoff model to simulate flows in the sub-catchments, the SCE-UA algorithm to calibrate the parameters and it propagates the volumes with a simple methodology, considering water uses. The proposed methodology showed to be efficient and indicates serious problems related with the use of water in irrigation of rice. The simulations confirmed what periodically happens in the Vacacaí Mirim River basin, which is the main river almost dry in the irrigation period of the rice farms.

Palavras-chave: simulação hidrológica, SMAP, algoritmo de otimização global.

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil, Bolsista de Iniciação Científica do CNPq, GHIDROS, UFSM, Cidade Universitária, Camobi, 97105-900 Santa Maria, RS. E-mail: rodrigocdpaiva@gmail.com

² Professora adjunto, GHIDROS, HDS, UFSM, Cidade Universitária, Camobi, 97105-900 Santa Maria, RS. E-mail: eloiza@ct.ufsm.br

³ Professor titular, GHIDROS, HDS, UFSM, Cidade Universitária, Camobi, 97105-900 Santa Maria, RS. E-mail: paiva@ct.ufsm.br

INTRODUÇÃO

O planejamento adequado dos recursos hídricos somente é possível a partir do conhecimento dos valores quantitativos, tendo em vista sua distribuição nas escalas temporal e espacial. Este conhecimento requer a implantação de um sistema de monitoramento hidrológico, de longo período, que permita esta quantificação. Estas informações estão disponíveis somente em grandes bacias hidrográficas e em áreas com grande interesse econômico. No entanto, atualmente, com a implantação dos sistemas nacional e estadual de recursos hídricos, aliado aos problemas oriundos das distorções e má utilização dos recursos hídricos, torna-se necessário seu conhecimento, apesar da inexistência de séries históricas de registros hidrológicos. Neste sentido, os modelos de simulação hidrológica apresentam importante aplicabilidade na geração de informações não disponíveis. Existe um grande número de modelos disponíveis, variando com os objetivos, escala espacial e temporal e principalmente com o número de informações de entrada exigidas. Tais informações representam, a maioria das vezes, reais impedimentos na aplicação de modelos complexos, como por exemplo o SWAT 2000, Neitsch *et al.* (2002). Desta forma, modelos simplificados e de fácil aplicação, que tenham sido testados em condições regionais, podem representar boas perspectivas na atual situação de carência de informações hidrológicas. Em nível nacional já foram desenvolvidos vários modelos determinísticos de geração de séries contínuas de vazões, como IPHII (Tucci (2005)) , SMAP (Lopes *et al.* (1981)) e MODHAC (Lanna & Schwarzbach (1989)). Além de escassez de dados hidrológicos, existe uma grande dificuldade em reproduzir o comportamento hidrológico em bacias muito perturbadas pela ação antrópica, principalmente na forma de retiradas d'água, onde os dados fluviométricos existentes não representam as vazões naturais e não existe um registro histórico das intervenções ocorridas. Nestes casos, os modelos concentrados do tipo chuva-vazão podem ser ineficientes, existindo a necessidade de utilização de um sistema que considere estas intervenções.

O objetivo deste trabalho é propor, aplicar e avaliar metodologia de determinação de vazões tendo por fim obter informações para enquadramento dos cursos d'água em regiões com carência de dados hidrológicos observados. A área em estudo é a bacia do Rio Vacacaí Mirim.

METODOLOGIA

Área em estudo

A bacia do Vacacaí Mirim está localizada no sul do Brasil, no centro do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 53° 46' 30" e 53° 49' 29" de longitude oeste e 29° 36' 55" e 29° 39' 50" de latitude sul e possui cerca de 1120 km², conforme a Figura 1. Diversas pesquisas (e.g. Meller (2004), Dias (2003), Casagrande (2004), Paz (2004)) já foram desenvolvidas pelo GHIDROS na região e a maioria delas aponta problemas graves relacionados aos recursos hídricos.

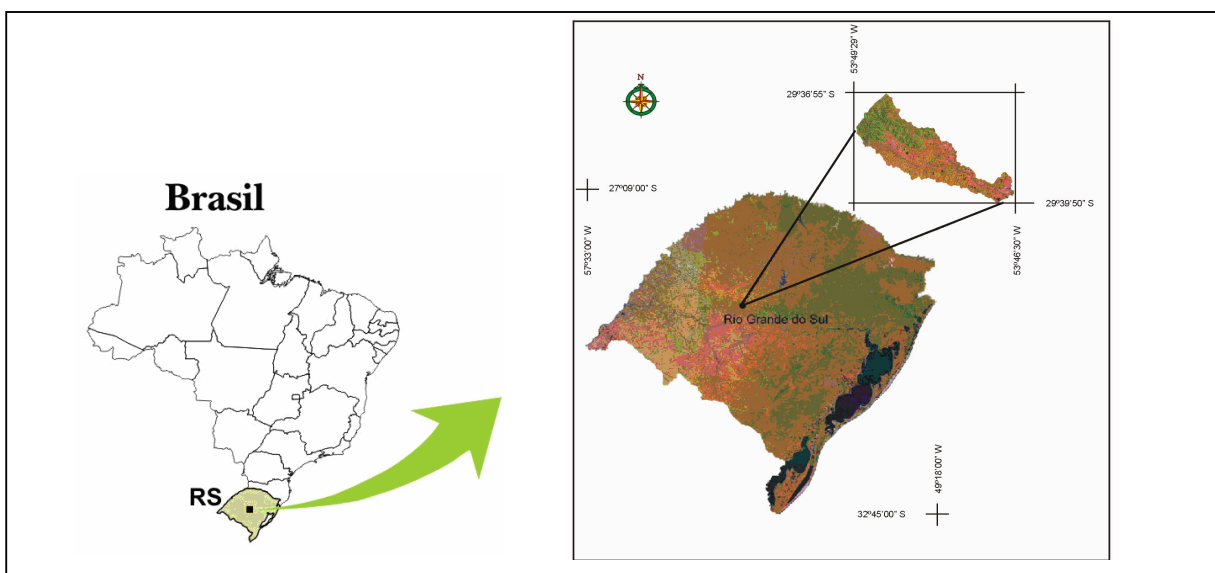


Figura 1 – Localização da bacia Vacacaí Mirim.

A bacia é responsável por cerca de 40% de abastecimento público da cidade de Santa Maria, através do reservatório do Vacacaí Mirim, que capta água de uma área de aproximadamente 29 km², tem cerca de 0,74 km² de área alagada, capacidade de 3,8 x 10⁶ m³ e localiza-se na cabeceira do rio Vacacaí Mirim. Além disso, na bacia existem algumas áreas com elevado grau de urbanização, principalmente em sua parte média, na região da cidade de Santa Maria, onde os problemas de enchentes têm se agravado. Em sua parte alta há predominância de mata nativa além de algumas pequenas áreas de agricultura e pecuária. Na parte baixa encontram-se campos e principalmente arroz irrigado por inundação, onde em períodos de estiagem as vazões no curso de água ficam extremamente baixas devido aos altos volumes que são bombeados para as lavouras de arroz.

A área em estudo caracteriza-se então por algumas regiões com alta taxa de urbanização, sérios conflitos de uso de água, áreas com alta degradação ambiental, além de uma escassez de dados hidrológicos, o que representa um obstáculo na busca de soluções para estes problemas.

Modelo proposto

O modelo de simulação hidrológica utilizado foi implementado em ambiente MATLAB e sua concepção geral foi baseada no sistema PROPAGAR, que faz parte do SAGBAH 2000 (Sistema de Apoio ao Gerenciamento de Bacias Hidrográficas) descrito em Viegas F^o e Lanna (2003). No modelo utilizado, a bacia é simulada como um sistema hidrológico composto por diversas sub-bacias e pontos característicos (PCs). A idéia geral, Figura 2, é gerar séries de vazão em cada sub-bacia através do modelo chuva-vazão SMAP e propagá-las pelos PCs, onde na saída de cada sub-bacia e de cada PC são descontados as demandas e retornos difusos e concentrados respectivamente.

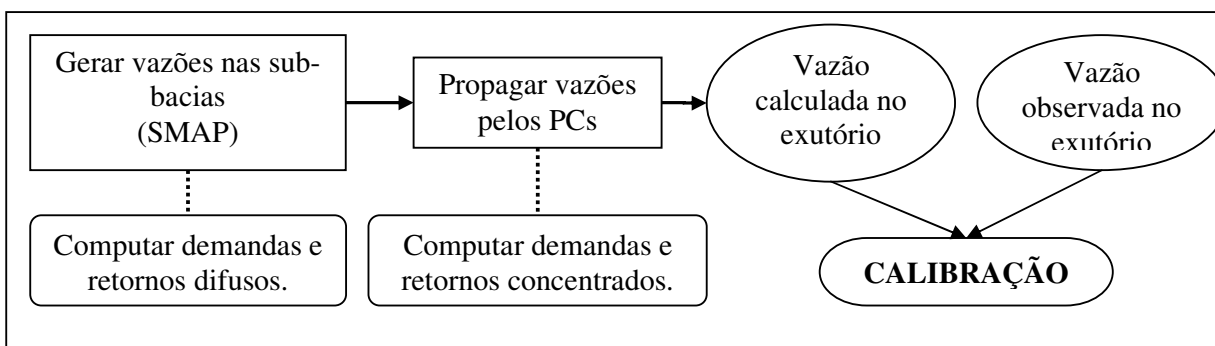


Figura 2 – Concepção geral do modelo proposto.

Os parâmetros do modelo SMAP para as sub-bacias são calibrados a partir de uma série de vazões no exutório da bacia e do algoritmo de otimização global SCE-UA.

Neste trabalho optou-se por fazer as simulações com três diferentes intervalos de tempo: geração de vazões em nível mensal através do SMAP versão mensal e propagação em nível mensal; geração de vazões médias de 7 dias através de uma modificação SMAP versão mensal para adequá-lo a este intervalo de tempo e propagação das vazões médias de 7 dias; geração de vazões diárias através do SMAP versão diária e propagação das vazões médias de 7 dias.

Modelo SMAP

O modelo chuva-vazão SMAP (“Soil Moisture Accounting Procedure”), desenvolvido por Lopes *et al.* (1981), é um modelo determinístico, com uma estrutura relativamente simples. O modelo utiliza séries diárias ou mensais de precipitação e evapotranspiração potencial para gerar séries de vazão, sendo inicialmente desenvolvido para intervalo diário de simulação e posteriormente adaptado para intervalo mensal.

O modelo na versão diária simula o balanço hídrico em 3 reservatórios hipotéticos, conforme a Figura 3, que são atualizados a cada intervalo de tempo. Os dados de entrada são a área Ad e as séries diárias de precipitação e evapotranspiração potencial. O modelo possui 6 parâmetros, descritos a seguir: Sat que é o volume máximo armazenado no reservatório do solo (mm), AI é a

abstração inicial (mm), $CAPC$ é a capacidade de campo do solo, $Crec$ é um parâmetro que regula a recarga subterrânea e $k2t$ e kkt são coeficientes de recessão do escoamento direto e de base, na forma de número de dias em que estes caem a metade de seu valor. Duas variáveis que descrevem as condições inicial da bacia, $Tuin$ que é o teor de umidade do solo inicial ($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$) e $Ebin$ é a vazão de base inicial ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Além disso, permite ajuste da precipitação de evapotranspiração potencial através dos coeficientes $Pcoef$ e $Epccoef$.

A versão mensal é semelhante à diária. A diferença é que simula 2 reservatórios hipotéticos, Figura 3, e possui 4 parâmetros: Sat que é o volume máximo armazenado no reservatório do solo (mm), Pes regula o escoamento superficial, $Crec$ é um parâmetro que regula a recarga subterrânea e kkt é um coeficiente de recessão do escoamento de base, na forma de número de meses em que seu valor cai a metade.

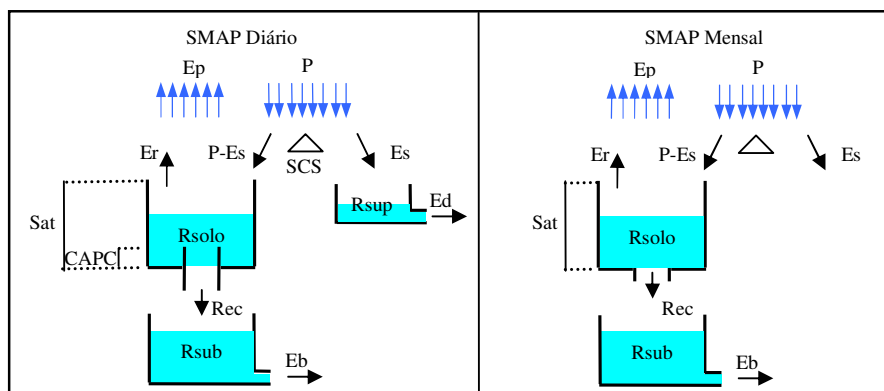


Figura 3 – Estrutura do modelo SMAP diário e mensal. (modificado de Lopes *et al.* (1981)).

O modelo SMAP vem sendo aplicado satisfatoriamente em vários locais do Brasil, além de já ter sido utilizado em muitas pesquisas e trabalhos publicados. Entre eles estão Lopes e Porto (1991) e Azevedo *et al.* (1991) que apresentam técnicas para calibração do modelo, Alexandre *et al.* (2005) que apresenta uma metodologia para regionalização dos parâmetros do SMAP mensal e Souza Fº e Porto (2003) que mostram o acoplamento de um modelo climático ao SMAP para previsão de vazões.

Balanço hídrico

A propagação das vazões pelos PCs e a computação das demandas são feitos de maneira semelhante ao sistema PROPAGAR, Viegas Fº e Lanna (2003). A bacia é simulada adotando-se algumas simplificações:

- os efeitos de armazenamento e amortecimento de ondas de cheias nos rios são desconsiderados;

- como a variabilidade diária das retiradas d'água é desconhecida e depende de tomadas de decisões que são complexas para serem simuladas, consideram-se valores característicos de demanda e retorno para cada intervalo de tempo do ano, sendo estes valores repetidos anualmente.

Desta maneira, torna-se importante que os intervalos de tempo de simulação utilizados sejam superiores aos valores em que as simplificações adotadas começam a gerar erros significativos nos resultados.

Através das séries de vazão geradas pelo SMAP, para cada intervalo de tempo i calcula-se a vazões de cada sub-bacia j pela equação 24.

$$Q_{sub_{i,j}} = Q_{subnat_{i,j}} - DD_{r,j} + DD_{r,j} \cdot RD_{r,j} \quad (1)$$

onde Q_{subnat} é a vazão natural efluente gerada pelo SMAP ($m^3.s^{-1}$), Q_{sub} é a vazão efluente ($m^3.s^{-1}$), DD é a demanda difusa ($m^3.s^{-1}$), RD é o retorno difuso (adimensional) e r um índice relativo a fração do ano simulada.

A relação entre as sub-bacias e os PCs é dada pelas matrizes de contribuição $MC_{nB \times nP}$ e de propagação $MP_{nP \times nP}$, onde nB e nP são o número total de sub-bacias e PCs. Os valores de $MC_{j,k}$ e $MP_{k,m}$ podem ser 0 ou 1 quando a sub-bacia j drena para o ponto característico k ou quando o ponto característico k contribui para o ponto característico m .

Para cada intervalo de tempo realizam-se nos PCs de montante para jusante a computação da contribuição das sub-bacias e PCs e o balanço hídrico.

$$Q_{pc'_{i,k}} = Q_{pc_{i,k}} - DP_{r,k} + DP_{r,k} \cdot RP_{r,k} \quad (2)$$

onde Q_{pc} é a vazão no PC antes de considerar a demanda e o retorno ($m^3.s^{-1}$), $Q_{pc'}$ é a vazão no PC depois de considerar a demanda e o retorno ($m^3.s^{-1}$), DP é a demanda pontual ($m^3.s^{-1}$) e RP é o retorno pontual (adimensional).

Quando existe um reservatório no PC a equação 2 é substituída pela equação 5 e o volume armazenado é atualizado.

$$S_{i,k} = S_{i-1,k} + (Q_{pc_{i,k}} - DP_{r,k} + DP_{r,k} \cdot RP_{r,k}) \cdot \Delta t - 1000 \cdot (Ep_{i,k} - P_{i,k}) \cdot A_{i,k} \quad (3)$$

onde

$$A_{i,k} = a \cdot \left(\frac{S_{i,k} + S_{i-1,k}}{2} \right)^b \quad (4)$$

e quando $S_{i,k} > S_{max}$

$$Q_{pc'_{i,k}} = \frac{(S_{i,k} - S_{max})}{\Delta t} \quad (5)$$

onde S é volume armazenado no reservatório no fim do intervalo de tempo (m^3), Ep é evapotranspiração potencial (mm), P é a precipitação (mm), Δt é o tamanho do intervalo de

simulação (s), A é a área da lamina d'água do reservatório, $S_{\max}$ é o volume armazenado máximo do reservatório (m^3) e a e b são constantes da relação entre S e A .

Algoritmo de calibração

Os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão vêm sendo utilizados satisfatoriamente pelos engenheiros nos mais diversos estudos e projetos, entretanto, sua eficiência tem se mostrado muito dependente da qualidade de sua calibração. Inicialmente, métodos manuais e algoritmos de busca local como os métodos univariacional e o de Rosembrock, descritos em Tucci (2005), eram as únicas opções disponíveis, onde, devido a características da função objetivo como a existência de vários mínimos locais e descontinuidades, dificilmente se chegava a um conjunto único de parâmetros para o modelo. A fim de diminuir a subjetividade do processo de calibração, vários métodos de busca global começaram a ser utilizados.

Duan *et al.* (1992) apresentam uma avaliação da performance de alguns algoritmos de busca global, além de um novo procedimento chamado SCE-UA (“Shuffled Complex Evolution”) que se mostrou mais eficiente que os demais. Ele é baseado em técnicas de busca aleatória, algoritmos genéticos e métodos de busca direta. Inicialmente é gerado aleatoriamente um conjunto de pontos dentro do espaço de pesquisa dos parâmetros. Fazendo-se uma analogia aos mecanismos de evolução dos seres vivos, cada ponto representa um indivíduo em uma população, sendo seus parâmetros as suas características genéticas e o valor da função objetivo uma medida da aptidão deste indivíduo se adaptar ao meio, sobreviver e gerar descendentes. A população inicial é dividida em várias sub-populações (“complexos”) que evoluem separadamente e periodicamente são recombinadas gerando novas sub-populações. Em cada complexo seleciona-se aleatoriamente um conjunto de indivíduos através de uma distribuição trapezoidal de probabilidade, dando preferência aos de melhor valor da função objetivo. Estes reproduzem e geram melhores indivíduos através do método de busca local Simplex, de Nelder e Mead (1965). A população tende então a convergir para o mínimo global da função objetivo.

O algoritmo SCE-UA tem sido utilizado em muitos trabalhos. Eckhardt e Arnold (2001) e Eckhardt *et al.* (2005) obtiveram bons resultados ao aplicar este procedimento para calibrar o modelo SWAT-G, que é uma versão do SWAT e possui muitos parâmetros. Santos *et al.* (2003) propõem modificações para aumentar a eficiência do SCE-UA e aplicam para um modelo hidrossedimentológico. Diniz (1999) apresenta em detalhes o SCE-UA.

Apesar da eficiência dos algoritmos de busca global, deve-se atentar ao fato de que o mínimo global de uma função objetivo nem sempre representa a melhor solução para o problema de calibração de um modelo hidrológico. Muitas vezes parâmetros obtidos possuem valores sem significado físico ou a função objetivo utilizada não é capaz de aproximar todas as características do

hidrograma. Para evitar estes problemas, podem-se adotar restrições aos valores dos parâmetros, onde quando estas são violadas aplica-se uma penalidade na função objetivo, Lacerda e Carvalho (1999). Pode-se também utilizar mais de uma função objetivo, através de pesos atribuídos a elas, descrito em Lacerda e Carvalho (1999), ou através de metodologia utilizada por Collischonn e Tucci (2003).

Informações utilizadas

Dados cartográficos

A partir de um mapa topográfico do Ministério do Exército na escala 1:50.000, a bacia do Vacacaí Mirim foi dividida em 14 sub-bacias e 14 PCs, sendo um deles o reservatório do Vacacaí Mirim, que abastece a cidade de Santa Maria, conforme a Figura 4.

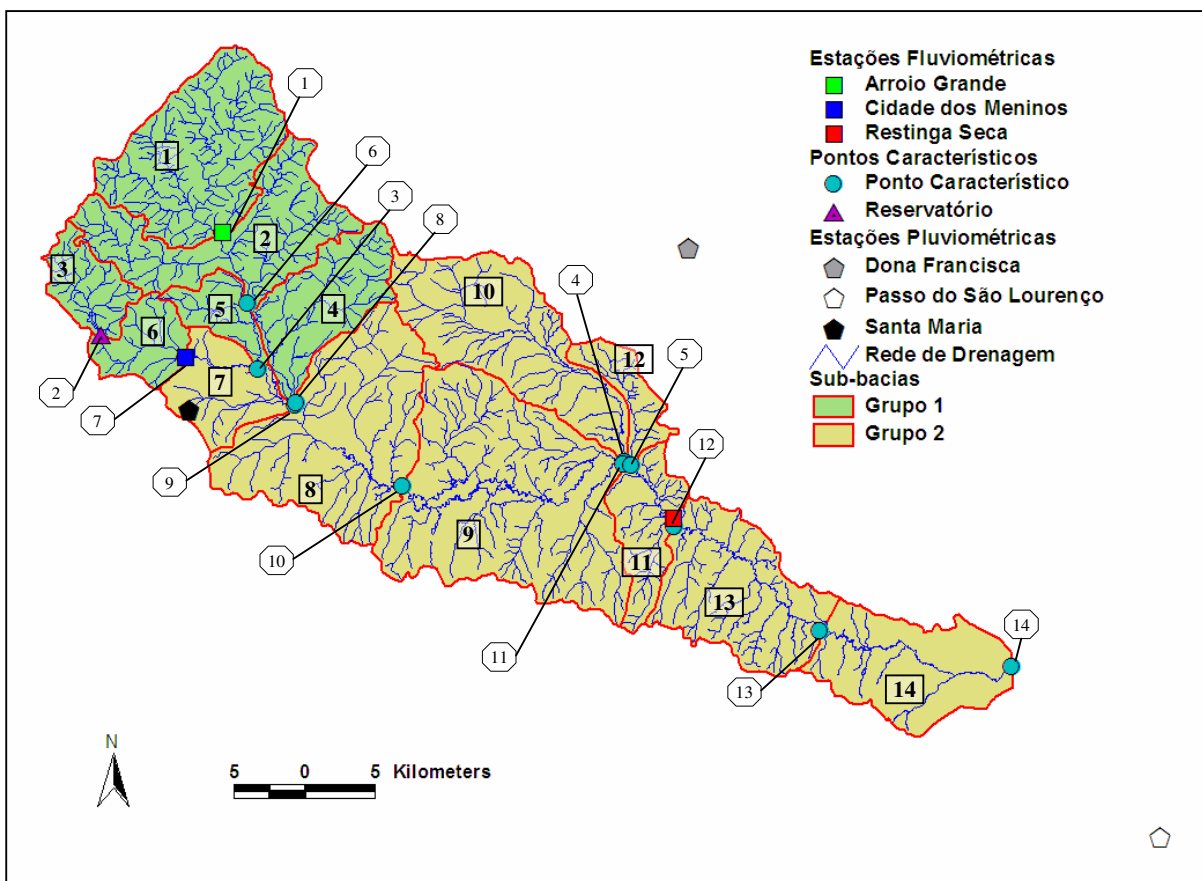


Figura 4 – Bacia do Vacacaí Mirim

Informações sobre os solos da bacia foram obtidas de um mapa de solos elaborado por Azolin e Mutti (1988) classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos da EMBRAPA (1999). A Tabela 1 traz as porcentagens dos usos do solo da bacia obtidas a partir de um mapa do Inventário Florestal Contínuo do Rio Grande do Sul confeccionado a partir de imagens

do satélite LANDSAT do ano de 1998 para a SEMA (Secretaria Estadual do Meio Ambiente). Estas informações cartográficas foram inicialmente organizadas por Casagrande (2004).

Tabela 1 – Porcentagens dos usos do solo na bacia Vacacaí Mirim.

Agricultura	Água	Área Urbana	Banhado	Campo	Floresta Natural	Floresta Implantada	Solo Exposto(Arroz)
1%	2%	1%	1%	49%	29%	0%	16%

Demandas d'água

Foram estimadas as demandas de cada sub-bacia e PC. Adotaram-se como demandas difusas todas aquelas provenientes do abastecimento público (captações diretas, pequenas barragens, poços) e seus valores foram fornecidos pela CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento). Consideraram-se como demandas concentradas a captação no reservatório do Vacacaí Mirim e as demandas da irrigação das lavouras de arroz. Estas foram calculadas indiretamente através da localização geográfica das captações, da área irrigada das lavouras e estimativa do consumo médio por hectare. Todas estas considerações foram baseadas em Paiva *et al.* (2006). Para este trabalho, os retornos tanto para as demandas difusas como concentradas foram considerados nulos.

Dados hidrológicos

Foram utilizados dados de três estações pluviométricas para as simulações, Tabela 2. A distribuição espacial da precipitação foi estimada a partir do método dos polígonos de Thiessen e as eventuais falhas de registro foram preenchidas por uma regressão linear múltipla entre a estação com falhas e as demais. Dados de evapotranspiração potencial de tanque classe A foram obtidos da estação climatológica de Santa Maria localizada na UFSM, pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia, do INMET. Os dados foram corrigidos com o coeficiente do tanque Kp, Villa Nova e Reichardt (1989), e as falhas foram preenchidas com a evapotranspiração potencial calculada a partir do método de Penman, descrito em Tucci e Beltrame (2001), utilizando os dados climáticos da mesma estação. A relação Volume x Área do reservatório do Vacacaí Mirim foi obtida a partir de dados batimétricos contidos em Paiva *et al* (1998). A Tabela 2 traz também as estações fluviométricas utilizadas.

Tabela 2 – Estações Pluviométricas e Fluviométricas

Nome	Código	Tipo	Período utilizado	Fonte/Operador
Dona Francisca	2953008	Pluviométrica	jan/90 – dez/04	ANA
Passo do São Lourenço	2953037	Pluviométrica	jan/90 – dez/04	ANA
Santa Maria	2953017	Pluviométrica/Climatológica	jan/90 – dez/04	INMET
Restinga Seca	85438000	Fluviométrica	jan/90 – abr/04	ANA
Arroio Grande	-	Fluviográfica	mar/90 – set/90	Richter (1991) / GHIDROS
Cidade dos Meninos	-	Fluviográfica	jul/94– jul/95	Fronza (1995) / GHIDROS

Estratégia de calibração

Durante a fase de calibração dos parâmetros do modelo SMAP, a bacia do Vacacaí Mirim foi simulada como 12 sub-bacias e 12 PCs, até a estação fluviométrica Restinga Seca, e três etapas distintas foram realizadas:

- calibração dos parâmetros das sub-bacias através dos dados da estação Restinga Seca entre jan/1991 e dez/1998;
- validação através dos dados da estação Restinga Seca entre jan/1999 e abr/2004;
- validação através dos dados das estações Arroio Grande e Cidade dos Meninos.

Foram avaliadas duas estratégias de calibração. Na estratégia “A” optou-se por calibrar os parâmetros de cada sub-bacia permitindo que estes pudessem variar de forma independente. Já na estratégia “B” de calibração, buscou-se analisar características quanto ao uso e tipo do solo e as sub-bacias foram agrupadas de acordo com a Figura 4, onde:

- Grupo 1: predominância de Neossolos e de floresta nativa seguida de campos;
- Grupo 2: predominância de Argissolos e de campos e lavouras de arroz;

Segundo Embrapa (1999) os Argissolos e Neossolos, predominantes na bacia, são caracterizados por:

- Neossolos: solos pouco desenvolvidos, com ausência de horizonte B diagnóstico, com características do material originário, pequena espessura e muitas vezes com presença de fragmentos de rocha.
- Argissolos: são constituídos por material mineral, são argilosos, possuem horizonte B textural imediatamente abaixo do horizonte superficial e espessuras variadas.

A função objetivo utilizada para calibração foi o índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (1965), equação 6. A qualidade do ajuste foi avaliada através do erro no volume total escoado

(ΔV), coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação (R^2) e análise gráfica dos hidrogramas e curvas de permanência calculados e observados.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - Q_{calc_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (6)$$

onde E_{NS} é índice de eficiência de Nash e Sutcliffe, Q_{obs} é a vazão observada ($m^3.s^{-1}$), Q_{calc} é a vazão calculada ($m^3.s^{-1}$), $\overline{Q_{obs}}$ é a vazão média observada ($m^3.s^{-1}$), i é o intervalo de tempo e n é o número de intervalos de tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estratégia “A” de calibração, onde se buscou calibrar os parâmetros do modelo SMAP das 12 sub-bacias de forma independente não foi eficiente. Independente do intervalo de simulação adotado, o esforço computacional foi muito elevado e o algoritmo de calibração não foi capaz de encontrar uma mesma solução após sucessivas aplicações, o que pode ser atribuído ao grande número de parâmetros a serem calibrados. Além disso, fica muito complicado aceitar uma solução já que se podem ter valores razoáveis no exutório mesmo com vazões longe da realidade geradas em cada sub-bacia. Portanto, a seguir são discutidos somente os resultados relativos à estratégia de calibração “B”.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os parâmetros calibrados dos grupos 1 e 2 para os diferentes intervalos de simulação utilizados.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros calibrados do modelo chuva-vazão SMAP diário.

Intervalo de simulação	Grupo	<i>Sat</i>	<i>AI</i>	<i>CAPC</i>	<i>Crec</i>	<i>kkt</i>	<i>k2t</i>
Diário/7 dias	1	211	10	0,46	0,75	6	3,5
	2	242	10	0,53	0,52	6	4,5

Tabela 4 – Valores dos parâmetros calibrados do modelo chuva-vazão SMAP mensal e SMAP mensal adaptado para 7 dias.

Intervalo de simulação	Grupo	<i>Sat</i>	<i>Pes</i>	<i>Crec</i>	<i>kkt</i>
7 dias	1	400	7,14	70	0,02
	2	400	5,82	70	0,04
1 mês	1	454	7,34	59	0,04
	2	556	2,22	70	0,05

Percebe-se através da Tabela 5, que na simulação com geração diária e propagação das vazões médias de 7 dias obteve-se uma qualidade aceitável e superior na calibração dos parâmetros do modelo SMAP. É claro que ao se utilizar dados diários de precipitação e evapotranspiração potencial e simular o estado da bacia em nível diário se obtêm uma representação mais detalhada do ciclo hidrológico e conseqüentemente melhores resultados. Ao simular a bacia em nível mensal, considera-se por exemplo que a umidade do solo é constante durante o mês e se despreza a variabilidade temporal da precipitação e evapotranspiração, o que pode ser significativo em regiões como o centro do RS onde as chuvas são bem distribuídas durante o ano, entretanto sua variabilidade dentro de um mês é grande.

Tabela 5 – Avaliação da qualidade do ajuste dos hidrogramas na estação fluviométrica Restinga Seca.

Intervalo de simulação	Calibração jan/1991 – dez/1998				Validação jan/1999 – abr/2004			
	R^2	R	E_{NS}	ΔV	R^2	R	E_{NS}	ΔV
Diário/7dias	0,75	0,86	0,67	-20%	0,77	0,88	0,66	-23%
7 dias	0,62	0,79	0,58	8%	0,55	0,74	0,51	2%
Mensal	0,69	0,83	0,65	-2%	0,69	0,83	0,64	-5%

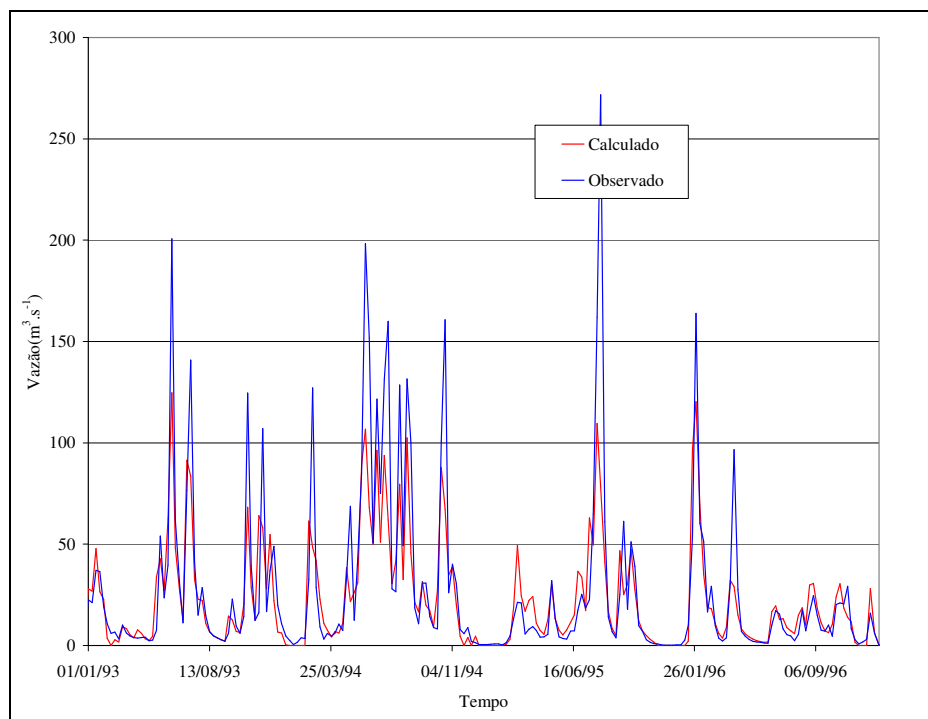


Figura 5 – Séries de vazões observadas e calculadas na estação fluviométrica Restinga Seca para intervalo de simulação diário/7dias entre 01/01/1993 e 31/12/1996.

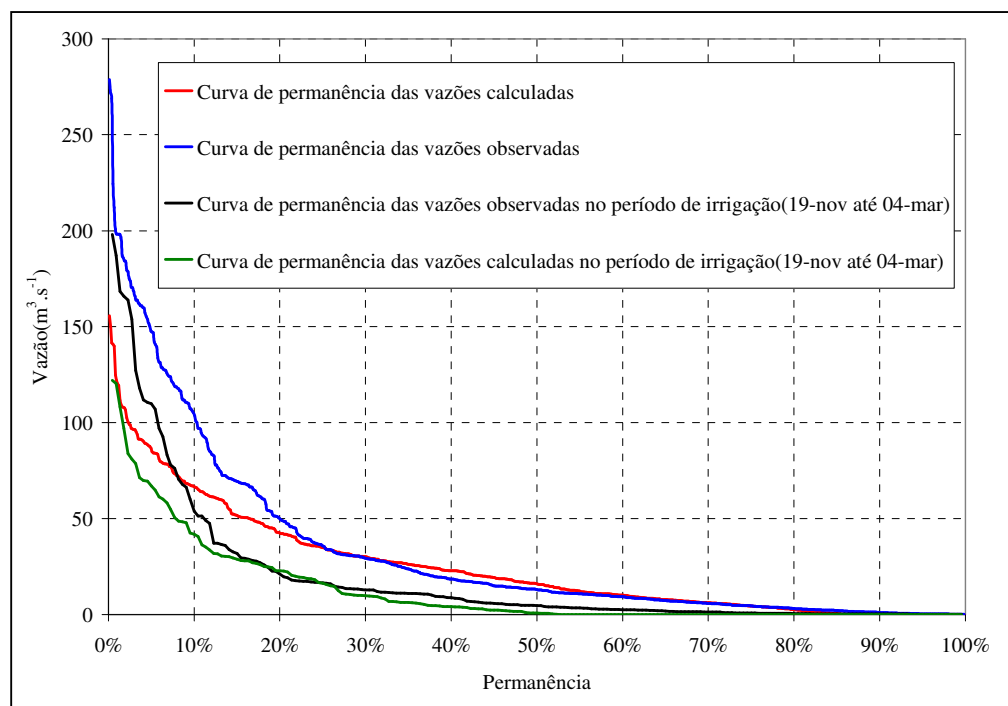


Figura 6 – Curvas de permanência das vazões para intervalo de simulação diário/7dias calculadas e observadas na estação Restinga Seca para o período de 1990 a 2004.

A qualidade do ajuste no período de validação foi semelhante a da calibração para todas simulações,. Apesar disto, de acordo com a Figura 5, percebe-se que o modelo não foi capaz de representar bem as vazões altas. A Figura 6 traz as curvas de permanência calculados e observados para as vazões médias de 7 dias. Novamente nota-se que as vazões altas foram subestimadas. Acredita-se que a estação fluviométrica Restinga Seca possa ter problemas na parte superior de sua curva-chave, já que seguidamente em períodos de cheia o rio extravasa a calha de seu leito principal, ficando difícil estimar as vazões nestes períodos. Percebeu-se então que o erro nas vazões altas foi significativo para diminuir a qualidade no ajuste do modelo, apesar deste tipo de estudo ser focado em vazões médias e baixas. Observando a curva de permanência, pode-se notar que as vazões médias e baixas calculadas estão bem próximas das observadas, e que o grande erro no volume total escoado foi devido aos erros nas vazões altas. Além disso, outros fatores foram significantes para prejudicar a qualidade dos ajustes, como a escassez de dados de chuva, incerteza nos valores de demanda adotados e as simplificações do modelo.

Apesar de todas limitações, acredita-se que foi possível se obter uma boa estimativa das vazões em vários pontos da bacia e no período de irrigação. A qualidade do ajuste dos hidrogramas nas estações Arroio Grande e Cidade os Meninos, conforme a Tabela 6, foi semelhante à obtida na estação Restinga Seca, mesmo sem estes dados estarem sendo computados na função objetivo na fase de calibração. Isto mostra que as vazões geradas nos vários pontos da bacia devem estar perto

da realidade. Além disso, através da Figura 6, percebe-se que as vazões estimadas durante o período de irrigação estão próximas às observadas.

Tabela 6 – Validação do modelo nas estações fluviométricas Cidade dos Meninos e Arroio Grande para intervalo de simulação diário/7dias.

Estação	Período	R^2	R	E_{NS}	ΔV
Arroio Grande	mar/90 – set/90	0,80	0,90	0,76	-13%
Cidade dos Meninos	jul/94 – jul/95	0,80	0,89	0,67	17%

Dando então como aceitável as estimativas de vazão obtidas neste trabalho e através de simulações considerando as demandas para as lavouras de arroz e considerando que não houvesse nenhuma retirada (vazões naturais) pode-se chegar a seguinte conclusão: as demandas para a irrigação lavoura de arroz estão muito superiores às vazões disponíveis. Analisando a Figura 7, percebe-se que a curva de permanência das vazões naturais no verão, período de irrigação, está abaixo da curva de permanência das vazões considerando o ano inteiro, ou seja, as vazões naturais no verão realmente são inferiores às do resto do ano. Entretanto, nota-se que a diminuição brusca das vazões neste período se dá principalmente pelas retiradas para a irrigação, já que a curva de permanência do período de verão considerando as retiradas está muito abaixo das demais.

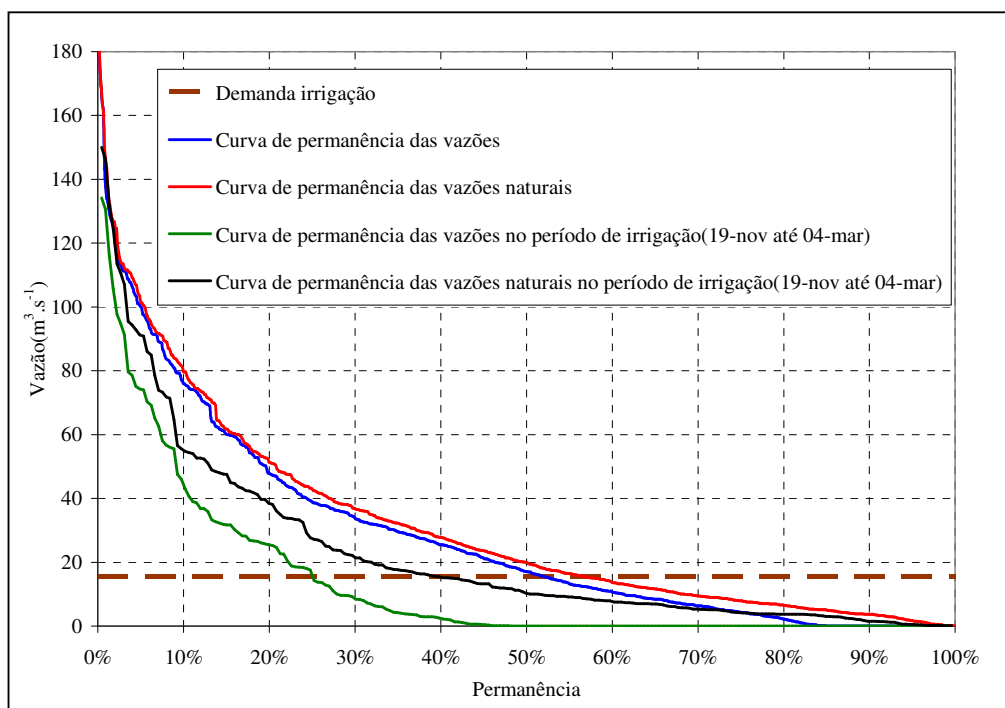


Figura 7 – Curvas de permanência das estimativas de vazões médias de 7 dias no exutório da bacia do Vacacaí Mirim para o período de 1990 a 2004 e demandas para a irrigação das lavouras de arroz.

Tabela 7 – Estimativa das vazões naturais, demandas para irrigação das lavouras de arroz e falhas de operação em cada PC.

PC	Área drenada (km ²)	Demanda acumulada de irrigação (m ³ .s ⁻¹)	% Falha	% Falha no período de irrigação	Vazões naturais (m ³ .s ⁻¹)		Vazões naturais no período de irrigação (m ³ .s ⁻¹)	
					Q ₉₅	Q ₈₀	Q ₉₅	Q ₈₀
1	116	0,061	1%	4%	0,183	0,709	0,052	0,367
2	30	0,000	0%	0%	0,018	0,180	0,000	0,076
3	23	0,485	19%	40%	0,037	0,142	0,010	0,074
4	114	2,313	20%	40%	0,123	0,578	0,034	0,331
5	23	1,040	24%	49%	0,027	0,123	0,005	0,063
6	211	0,300	3%	6%	0,334	1,295	0,095	0,671
7	61	0,000	0%	0%	0,067	0,368	0,014	0,167
8	275	1,649	9%	21%	0,434	1,683	0,123	0,872
9	128	1,279	14%	30%	0,163	0,759	0,052	0,370
10	549	4,897	12%	27%	0,785	3,252	0,266	1,718
11	756	7,316	14%	28%	1,154	4,482	0,344	2,462
12	936	11,543	14%	28%	1,486	5,662	0,453	3,187
13	1033	13,953	15%	29%	1,603	6,121	0,522	3,548
14	1120	15,418	0%	30%	1,712	6,564	0,574	3,716

A Tabela 7 mostra que para maioria dos PCs, a demanda de irrigação é muito superior à disponível e que a probabilidade de falhas no atendimento destas é muito elevado. Tudo isso apenas confirma o cenário que se repete periodicamente na bacia do Rio Vacacaí Mirim, que é do rio principal quase “seco” e situação de emergência entre os produtores de arroz. Na realidade, o sistema não entra em colapso, no período de irrigação, em virtude da grande quantidade de açudes nas propriedades rurais. Segundo Paiva *et. al.* (2005), a demanda de água para agricultura na bacia, na safra 2004/2005, que representou 92,47% de toda a demanda de água na bacia, em 2005, teve as seguintes fontes de suprimento: 52,18% de açudes, 3,26% de poços e 44,56% de rios, sangas e vertentes.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para estimativa das vazões naturais em uma bacia. Esta metodologia foi aplicada na bacia do Vacacaí Mirim, que se caracteriza por dados hidrológicos esparsos e por estar perturbada pela ação antrópica, principalmente através de retiradas para irrigação por inundação de lavouras de arroz.

Na tentativa de calibração dos parâmetros das bacias de forma independente (estratégia “A”) não se obteve sucesso. Na calibração das sub-bacias separadas por dois grupos (estratégia “B”) o

algoritmo de calibração SCE-UA foi eficiente. A escassez de dados de chuva, incertezas quanto aos dados de vazão e de demandas utilizadas e o fato da bacia já estar perturbada, além das próprias simplificações do modelo, foram fatores limitadores na qualidade dos resultados. Mesmo assim, a simulação com geração de vazões diárias e propagação de vazões médias de sete dias forneceu resultados considerados satisfatórios e próximos da realidade. Através destes resultados foi possível simular o cenário atual e a bacia sem demandas (vazões naturais), onde se percebeu uma grande diferença entre as demandas para irrigação das lavouras de arroz e as vazões disponíveis.

De forma geral a metodologia foi eficiente na aplicação da bacia do Vacacaí Mirim. Os resultados apresentados, bem como os conflitos devidos à irrigação deixam claro a necessidade de desenvolvimento de metodologias simplificadas e de fácil utilização para aplicação em bacias com dados esparsos e perturbadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FINEP e CTHIDRO pelos recursos financeiros e bolsas de pesquisa, ao Prof. Ruben La Laina Porto pelos esclarecimentos referentes ao SMAP, ao Departamento de Fitotecnia e ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFSM.

BIBLIOGRAFIA

ALEXANDRE, A.M.B; MARTINS, E.S.; CLARKE, R.T; REIS JR, D.S. (2005). “*Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos*” in Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, 17 p.

AZEVEDO, L.G.T.; FONTANE, D.G.; PORTO, R.L.L. (1991). “*Sistemas especialistas para calibração de um modelo chuva-vazão*” in Anais do IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, pp. 316-325.

AZOLIN, M.A.D.; MUTTI, L.S.M. (1988). “*Solos da bacia hidrográfica do Vacacaí Mirim*”. Relatório Técnico, Porto Alegre, 20 p (Não publicado).

CASAGRANDE, L. (2004). “*Determinação do parâmetro de propagação de sedimentos do modelo de Williams & Berndt (1975) na bacia do rio Vacacaí Mirim*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 150 p.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2003). “*Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 8(3), pp. 27 – 39.

DIAS, J.R. (2003). “*Aplicação do modelo hidrológico AGNPS2001 utilizando dados observados na bacia do arroio Vacacaí Mirim*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 120 p.

DINIZ, L. S. (1999). “Calibragem de modelos hidrológicos”, in *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Org. por Galvão, C.O. e Valença, M.J.S., ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, pp. 151 – 164.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1992). “Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models”. *Water Resources Research* 28(4), pp. 1015 – 1031.

ECKHARDT, K.; ARNOLD, J.G. (2001). “Automatic calibration of a distributed catchment model”. *Journal of Hydrology* 251, pp. 103 – 109.

ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H.G. (2005). “Automatic model calibration”. *Hydrological Processes* 19, pp. 651 – 658.

EMBRAPA (1999). “Sistema brasileiro de classificação dos solos”. Embrapa, Brasília, 412 f.

FRONZA, D. (1995). “Avaliação de modelos matemáticos precipitação vazão na bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, 147 p.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F. (1999). “Introdução aos algoritmos genéticos”, in *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Org. por Galvão, C.O. e Valença, M.J.S., ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, pp. 99 – 150.

LANNA, A. E.; SCHWARZBACH, M. (1989) “Modelo Hidrológico Auto-calibrável –MODHAC”. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, 55 p.

LOPES, J.E.G.; BRAGA JR, B.P.F.; CONEJO, J.G.L. (1981). “Simulação hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado” in *Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Fortaleza, pp. 42-62.

LOPES, J.E.G.; PORTO, R.L.L. (1991). “Técnica de pesquisa global de parâmetros para a calibração de modelos chuva-vazão” in *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro, pp. 305-315.

MELLER, A. (2004). “Simulação integrada de sistema de drenagem em Santa Maria - RS”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 166 p.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models, part I – a discussion of principles”. *Journal of Hydrology* 10, pp. 282 – 290.

NELDER, J.A.; MEAD, R. (1965). “A simplex method for function minimization”. *Computer Journal* 7(4), pp. 308 – 313.

PAZ, M.F. (2004). “Estudo comparativo de carga de lavagem em bacias urbana e rural”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 147 p.

PAIVA, J.B.D. et al (1998). “Monitoramento e modelagem matemática dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do arroio Vacacaí Mirim”. Relatório de Pesquisa, Santa Maria – RS, 200 p.

PAIVA, J. B. D.; GARCIA, J. B.; BRITES, A. P. Z.; SCAPIN, J.; BELING, F.; HAGEMANN, S. E.; ABELIN, SAIMON.; CARMO, J. A. R. (2006). “Demandas de água na bacia do rio Vacacaí Mirim” in *Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos Sul-Sudeste*, Curitiba, 18 p. (submetido)

RICHTER, L. A. (1992). “*Determinação da regularização de vazões da bacia do Arroio Grande utilizando metodologia para pequenas bacias com dados esparsos*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria.

SANTOS, C.A.G; SUZUKI, K; WATANABE, M. (2003). “*Modificação no algoritmo genético SCE-UA e sua aplicação a um modelo hidrossedimentológico*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 8(1), pp. 137 – 146.

SOUZA Fº, F.A; PORTO, R.L.L. (2003). “*Acoplamento de modelo climático e modelo hidrológico*” in Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, 10 p.

TUCCI C.E.M. (2005). “*Modelos Hidrológicos*” ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, 678 p.

TUCCI C.E.M.; BELTRAME, L.F.S. (2005). “*Evaporação e evapotranspiração*”, in *Hidrologia: ciência e aplicação*. Org. por Tucci, C.E.M., ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, pp. 253 – 288.

VIEGAS Fº, J. S.; LANNA, A. E. L. (2003). “*O paradigma da modelagem orientada a objetos aplicado a sistemas de recursos hídricos (II) Modelo de objetos aplicado ao planejamento de uso da água Propagar MMO*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 8(3), pp. 91 – 103.

VILLA NOVA N.A.; REICHARDT, K. (1989). “*Evaporação/Evapotranspiração*”, in *Engenharia Hidrológica. Vol.2*. Org. por Ramos, F. et al, ABRH, ed. UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, pp. 143 - 198.