

# PERFORMANCE DO OTIMHUD - PROGRAMA COM OS ALGORITMOS SCEM-UA E MOSCEM-UA ACOPLADOS AO MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO II - MHUDII

*Antonio Amaro Pagnossi<sup>1</sup> & Ademir Paceli Barbassa<sup>2</sup>*

**RESUMO** - Apresentam-se, neste trabalho, resultados da utilização de técnicas de calibração automática de parâmetros com os algoritmos SCEM-UA e MOSCEM-UA acoplados ao Modelo Hidrológico Distribuído Urbano II – MHUD II, através da implementação da ferramenta computacional desenvolvida e denominada de projeto OTIMHUD. Foi aplicado à bacia do Córrego do Gregório, na cidade de São Carlos, S.P., a qual possui um índice considerável de urbanização e está sujeita a inundações. Foi utilizado evento mensurado em 1999 e foram processadas calibrações de parâmetros nos modo mono e multi-objetivo, com números variados de iterações, elementos e complexos. As calibrações no modo mono-objetivo demonstraram problemas relacionados à convergência dos parâmetros para números pequenos de iterações e aos ajustes entre as vazões observadas às calculadas. Calibrações multi-objetivo mostraram eficiência nos ajustes das vazões. A otimização obteve boa definição da região de Pareto e atenderam aos critérios e limites estabelecidos no algoritmo. Com as análises de resultados foi possível avaliar o comportamento dos modelos, a sensibilidade dos parâmetros calibrados e os ajustes das vazões calculadas às observadas.

**ABSTRACT** --- This paper presents results obtained by the use of automatic parameter calibration techniques, namely, SCEM-UA and MOSCEM-UA coupled with Distributed Urban Hydrological Model II - MHUDII computationally implemented as the program OTIMHUD. This program was applied to the urban watershed of Gregório Creed in the city of São Carlos - SP. This watershed has a high urbanization level and is subjected to repeated inundations. Data from a 1999 rainfall and runoff event were employed in the parameter calibrations in mono and multi-objective modes experimenting with varying numbers of iterations, elements and complexes. The mono-objective calibrations showed problems with convergence of parameters for smaller number iterations as well as with fitting observed and calculated discharge. Multi-objective calibration showed efficiency in fitting discharges. The optimization procedure obtained a good definition of the Pareto region and obeyed the criteria and limits imposed by the algorithm. The analysis of results showed the behavior of hydrologic and optimization models.

**Palavras-chave:** Modelo Hidrológico, Calibração de parâmetros, Multi-objetivo.

---

<sup>1</sup> Professor da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo de São José do Rio Preto, SP. Av. José Munia, 7470, Jd. Vivendas, São José do Rio Preto, SP, CEP 15090-500. e-mail: pagnossi@terra.com.br.

<sup>2</sup> Professor Associado do PPG-EU da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP. e-mail: barbassa@ufscar.br.

## 1 – INTRODUÇÃO

As enchentes podem ser atribuídas a duas causas básicas: uma natural outra antrópica. A primeira ocorre devido a fortes precipitações, ou seja, aos valores extremos das precipitações. A segunda causa é normalmente atribuída à intromissão do homem no meio natural e na maioria dos casos está relacionada às inundações urbanas que ocorrem devido à ocupação desordenada dos terrenos, às obstruções dos canais dos cursos d'água, à modificação das seções dos canais, à implantação de pontes, aterros e drenagens inadequadas, à ocupação do solo com superfícies impermeáveis, lançamentos de resíduos em vias públicas, entre outras causas.

A urbanização causa uma inter-relação prejudicial aos sistemas de saneamento que acabam se misturando e causando danos irreparáveis à saúde pública devido ao lançamento de resíduos sólidos, esgotos sanitários e resíduos dos sistemas de tratamento de água nos sistemas de drenagem urbana e que atingem os cursos d'água utilizados pela população.

Para avaliação de impactos causados pela urbanização estuda-se a bacia hidrográfica envolvida, avalia-se o futuro projeto e os efeitos que possíveis modificações na bacia poderão provocar, visando com isso evitar grandes problemas.

O modelo hidrológico permite a simulação dos dados através de formulações matemáticas, podendo-se dispor de técnicas de calibração para ajuste dos parâmetros do modelo hidrológico. As calibrações podem se desenvolver no modo mono ou multi-objetivo, que significa utilizar uma ou mais funções objetivo, respectivamente. Podem ser feitas manualmente, semi-automática ou automática entre outras classificações.

Basicamente as simulações executadas pelos modelos consistem em três etapas: calibração ou ajuste, validação ou verificação e previsão, sendo que cada uma destas etapas possui uma função específica.

Tais técnicas só puderam ser amplamente utilizadas com o desenvolvimento de equipamentos computacionais mais robustos, das linguagens de programação, que atualmente permitem processar cálculos com maior rapidez e com muita segurança nos dados obtidos.

Nesse trabalho aborda-se a calibração do Modelo Hidrológico Urbano Distribuído II (MHUD II), desenvolvido por Barbassa (1991, 2005), elaborada através de acoplamento com o SCEM-UA (Shuffled Complex Evolution Metropolis – Universidade do Arizona) e MOSCEM-UA (Multi-Objective Shuffled Complex Evolution Metropolis – Universidade do Arizona), desenvolvido por Vrugt et al (2003).

## **2 - OBJETIVOS**

Analisar o funcionamento dos algoritmos SCEM e MOSCEM-UA acoplado ao Modelo Hidrológico Urbano Distribuído II (MUHD II) e sua capacidade de calibração frente a diferentes configurações.

## **3 - O AMBIENTE DE CALIBRAÇÃO - PROJETO OTIMHUD**

O projeto OTIMHUD constitui-se de um módulo hidrológico, que consiste no acoplamento do Modelo Hidrológico Urbano Distribuído II (MHUD II) a um módulo de calibração que engloba os modelos de calibração SCEM-UA e MOSCEM-UA com denominação convencional de MOSCEM-MHUD e o módulo de pós-processamento denominado POSTPROC-MHUDII.

### **3.1 - O módulo hidrológico - MHUDII**

O modelo hidrológico calibrado MHUD II (Barbassa, 1991, 2005) foi desenvolvido em linguagem Pascal, atualmente em Delphi, para efetuar simulações hidrológicas em bacias urbanas.

No MHUDII admitem-se sub-bacias tão pequenas quanto um lote, representam-se múltiplas redes de sarjetas e de canais abertos ou fechados e calculam-se seus escoamentos cinematicamente, variam-se a precipitação variável espacial e temporalmente. A organização dos dados fisiográficos é feita automaticamente por software específico. As informações fisiográficas de plantas foram obtidas por SIG e àquelas cadastrais manualmente. A calibração realizada pelo método de Powell foi substituída pelos métodos aqui expostos.

#### *3.1.1 - Parâmetros calibráveis e evento de testes*

O número de parâmetros calibráveis do MHUD II, em particular, é muito grande, posto que cada uma das centenas de sub-bacias e de trechos de canal poderiam ter seus principais parâmetros calibrados, o que inviabilizaria o uso de qualquer tipo de modelo de calibração. Optou-se para desenvolver este ambiente de calibração usar os mesmos parâmetros já empregados na calibração manual efetuada.

O MHUDII foi calibrado com dados das bacias do Córrego do Gregório e do Monjolinho mostradas na figura 1, na cidade de São Carlos, SP. A figura mostra também a posição dos oito postos pluviográficos e dos dois postos fluviométricos. Esse monitoramento foi uma continuidade de outras experiências, conforme Barbassa (1991, 1997). Neste trabalho usaram-se os dados da bacia do Córrego do Gregório cuja área é 18,47 km<sup>2</sup>.

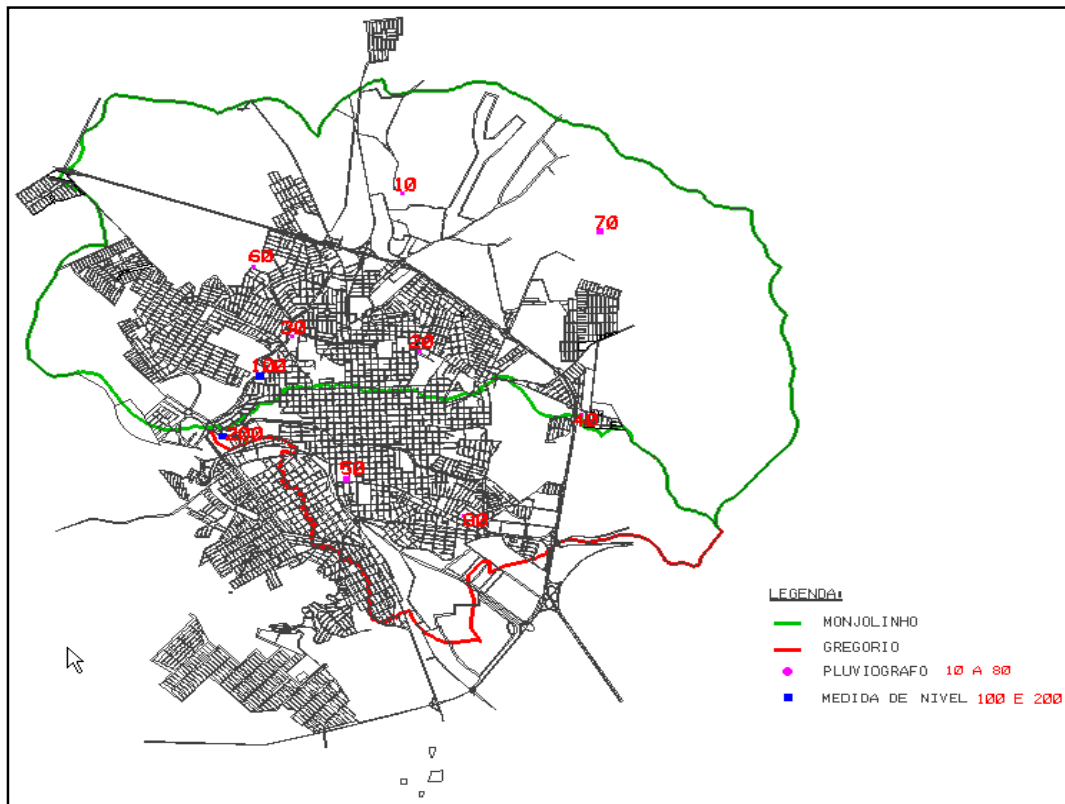


Figura 1 - Localização da rede de monitoramento sobre as bacias hidrográficas do Gregório e Monjolinho e planta de São Carlos. Fonte: Barbassa (2005).

Os parâmetros calibrados foram: taxa inicial de infiltração (D1INF), taxa final de infiltração (D2INF), taxa de decréscimo de infiltração (TECAI), retenção em áreas impermeáveis (CAMADI), retenção em áreas permeáveis (CAMADP).

Os projeto OTIMHUD foi desenvolvido com os dados pluviográficos e fluviométricos medidos no dia 06 de maio de 1999 na bacia do Córrego do Gregório. Os hidrogramas e pluviogramas foram discretizados a intervalos de tempo de 5 minutos. A figura 2 ilustra os hidrogramas das vazões observadas e também aquelas calibradas manualmente para o evento e bacia referidos.

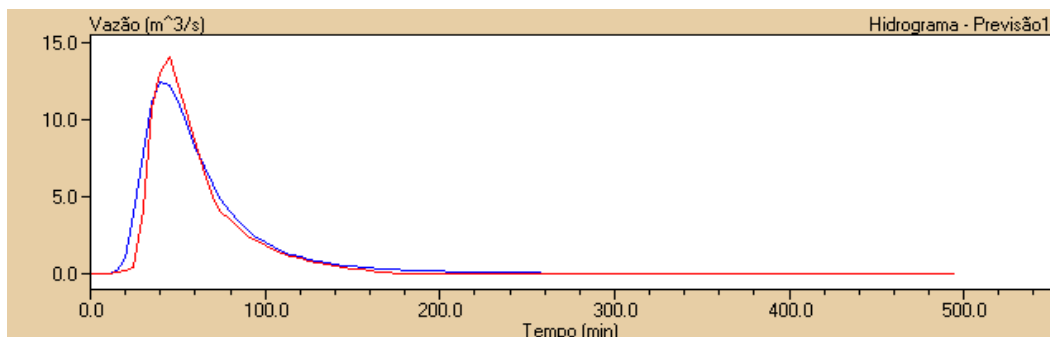


Figura 2 – Hidrogramas observados na bacia do Córrego do Gregório em 06/05/1999. A linha vermelha refere-se às vazões observadas e a linha azul às vazões calculadas através de calibração manual de parâmetros. Fonte: Barbassa (2005).

### 3.2 - O módulo de calibração

O módulo MOSCEM-MHUD possibilita calibrações hidrológicas automáticas, pode ser utilizado de forma contínua ou por evento, permite a seleção do tipo de calibração que se pretende, mono-objetivo ou multi-objetivo. Quando a opção de calibração é multi-objetivo o algoritmo utilizado é o MOSCEM-UA, e quando a opção de calibração é mono-objetivo o algoritmo é o SCEM-UA.

Desenvolveu-se uma estrutura de diretórios, interface gráfica e para não alteração dos códigos fontes originais do SCEM-UA e MOSCEM-UA, migraram-se os códigos para a linguagem de programação C++ com a utilização do software C++ Builder, da Borland.

A calibração deste módulo gera três arquivos de dados, conforme demonstrado na figura 3 e gera dois gráficos para análise de dados, o gráfico da convergência dos parâmetros e o gráfico da região de Pareto, o qual demonstra a plotagem das funções objetivo calculadas após a calibração dos parâmetros.

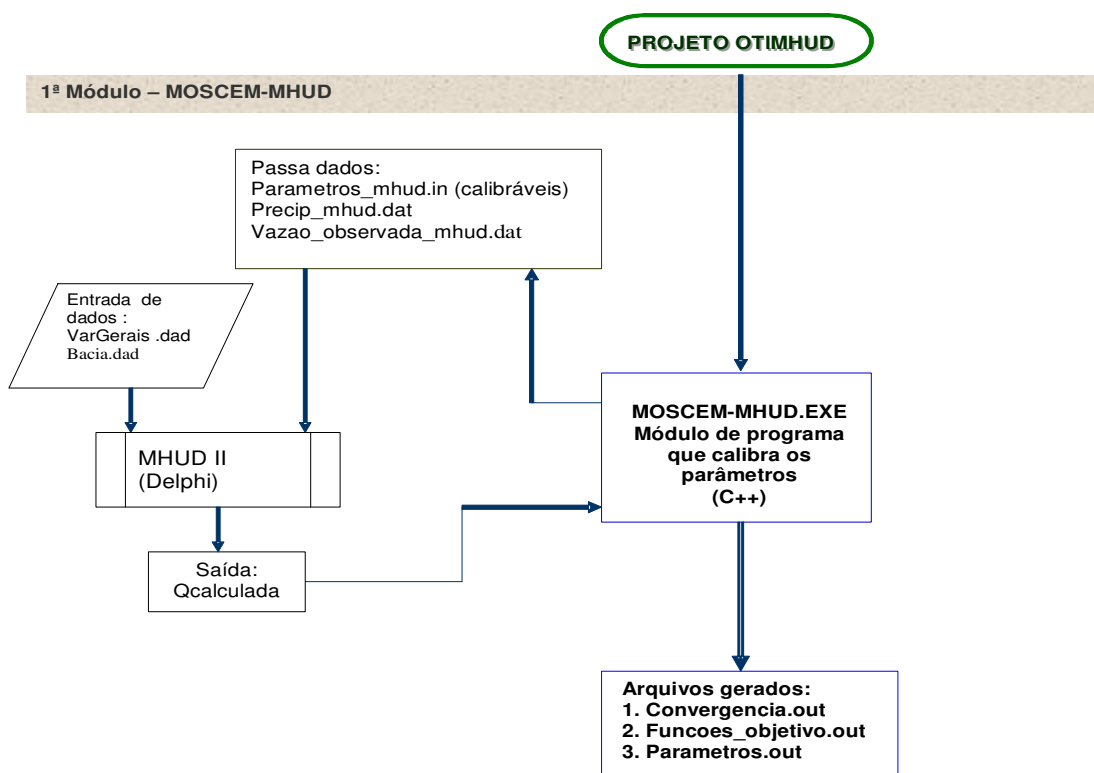


Figura 3 – Diagrama de blocos do 1º módulo – Programa de calibração MOSCEM-MHUD

#### 3.2.1 - Fator de redução de ajuste de escala

Quanto à convergência, Gelman e Rubin (1992) desenvolveram um diagnóstico para quantificar a convergência,  $\sqrt{SR}$ , que eles chamaram de Fator de Redução de Ajuste de Escala,

baseada na variância entre as cadeias (seqüências) como se segue:

$$\sqrt{SR} = \sqrt{\frac{g-1}{g} + \frac{q+1}{q^*g} x \frac{B}{W}} \quad (1)$$

onde,  $g$  é o número de iterações dentro de cada seqüência,  $B$  significa a variância entre as  $q$  seqüências, e  $W$  é a variância média dentro das  $q$  seqüências para o conjunto de parâmetros considerado. O produto de  $q$  e  $g$  é idêntico para o número total de pontos,  $t$ . A convergência é alcançada caso se atinja o valor 1 (um) para  $\sqrt{SR}$ , para cada um dos parâmetros. Porém, como este número é muito difícil de ser alcançado por todas as seqüências dos parâmetros, Gelman e Rubin (1992) recomendaram utilizar valores inferiores a 1,2, em valor absoluto, para o Fator de Redução de Ajuste de Escala, para que se aceite que houve convergência para uma distribuição posterior estável.

### 3.2.2 - Funções Objetivo

As funções objetivo descritas e utilizadas no código fonte do módulo de otimização “MOSCEM-MHUD” e de verificação “POSTPROC-MHUD” são as seguintes:

a) RMSE - Erro médio quadrático

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{calc})^2}{n}} \quad (2)$$

Onde,  $Q_t^{obs}$  = Vazão observada,  $Q_t^{calc}$  = Vazão calculada e  $n$  = número de elementos.

b) STD – Desvio padrão do erro.

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n \left\{ (Q_t^{calc} - Q_t^{obs}) - \left[ \frac{(Q_t^{calc} - Q_t^{obs})}{n} \right] \right\}^2}{n-1}} \quad (3)$$

c) NSE - Coeficiente de Nash-Sutcliffe ou de determinação (R2).

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{calc})^2}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (4)$$

### 3.3 - O módulo de pós-processamento ou verificação

O POSTPROC-MHUD é um programa, cujo diagrama de blocos está demonstrado na figura 4, que processa os resultados das calibrações executadas no primeiro módulo, ou seja, permite que se façam três tipos de verificações diferentes para subsidiar a análise dos resultados:

a) Opção 1: refere-se à seleção do tipo de verificação sem a utilização dos parâmetros calibrados. Neste caso o programa executa a simulação hidrológica utilizando o conjunto de parâmetros “default” ou arbitrados ou calibrados manualmente, na forma original configurada.

b) Opção 2: refere-se à utilização de um conjunto de parâmetros selecionado pelo usuário. Importante abordar que nessa opção normalmente se utiliza um dos conjuntos de parâmetros dentro do ranking. Observa-se que os valores explicitados nas funções objetivo devem ser analisados previamente para a utilização de um determinado conjunto de parâmetros, pois normalmente existem diversos conjuntos de parâmetros de mesma classificação ou ranking.

c) Opção 3: o modelo utiliza todos os conjuntos de parâmetros possíveis e fará os cálculos hidrológicos utilizando cada conjunto de parâmetros separadamente e armazenando matricialmente os dados. Esta opção é também denominada de “trade-off” ou ambiente de troca de conjuntos de parâmetros e a sua função é criar uma matriz de dados contendo dados com as vazões máximas, médias e mínimas, visando compará-las com as outras duas opções através do estabelecimento de limites máximos, mínimos para as vazões e analisar se as vazões calculadas, após a calibração dos parâmetros, encontram-se satisfatoriamente entre estes limites e obviamente tirar conclusões sobre a qualidade da calibração executada. Esse módulo permite a criação gráfica dos hidrogramas de todos os tipos três tipos de verificações simuláveis.

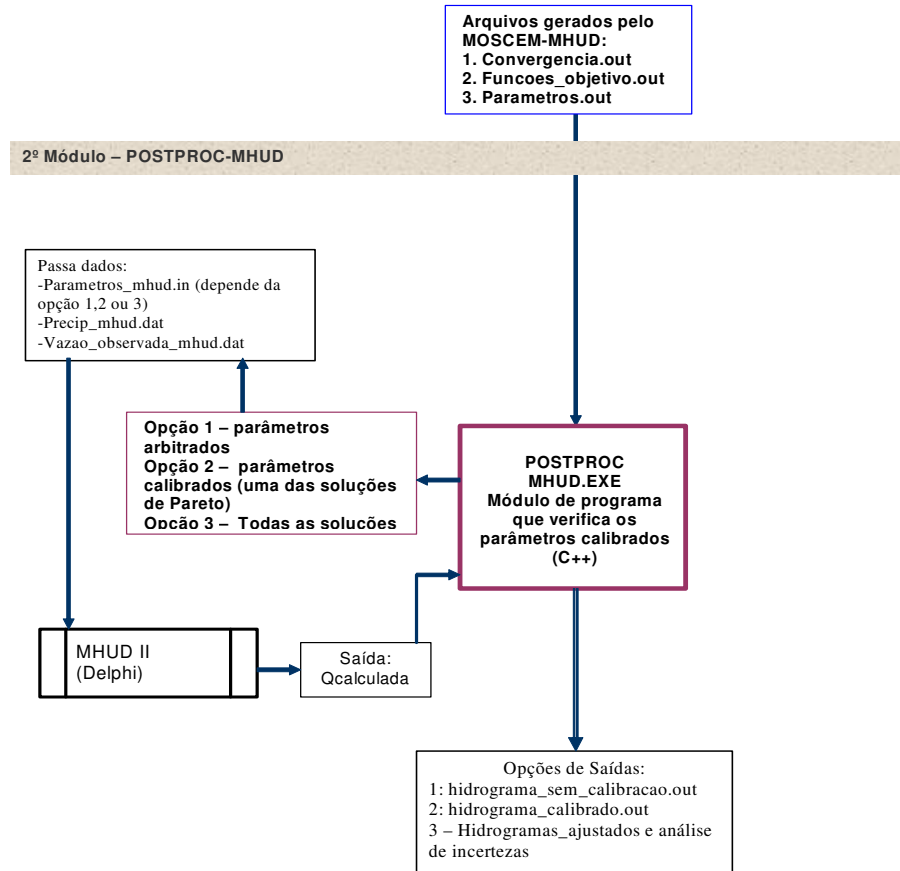


Figura 4 - Diagrama de blocos do 2º módulo - programa de verificação POSTPROC-MHUD.

### 3.4 – Configurações no OTIMHUD

As calibrações testadas na bacia do Córrego do Gregório empregaram as bases de dados disponíveis para o MHUD II. Foram feitos ensaios utilizando 1000, 5000, 7500 e 10000 iterações, ou simulações, e o uso de um número exagerado de iterações visando haver a convergência naturalmente nos modos mono e multi-objetivo, havendo neste caso uma parada automática do programa através de um dispositivo de cálculo pré-estabelecido no código, caso a convergência não evolua 0,001 por duas iterações consecutivas.

Como população ou número de elementos foram feitos ensaios com 50, 75, 100, 200 e 500. Foram utilizados os números de 5 ou 10 complexos.

## 4 - RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES

Algumas configurações do OTIMHUD são apresentadas nas tabelas 1 e 2, para o evento e bacia definidos anteriormente. Na tabela 1 apresentam-se resultados no modo mono-objetivo, opção SCEM-UA, e na tabela 2 no modo multi-objetivo, opção MOSCEM-UA. As calibrações assinaladas



como asteriscos tiveram o número de elementos, de complexos e de iterações iguais para mono e multi-objetivos.

Observou-se que o OTIMHUD operando com o SCEM-UA o tempo computacional para uma iteração no modo mono-objetivo demanda aproximadamente 5,17 segundos no modo mono-objetivo, e no modo multi-objetivo aproximadamente 5,61 segundos. Utilizou-se como equipamento um micro computador Pentium IV 2600 Mhz, placa mãe Asus P4S8X-X, 512 Mb de memória RAM, memória de cache com 512 Kb, memória de vídeo de 128 Mb, HD com 120 Gb.

Com a execução das calibrações no mono-objetivo, tabela 1, observou-se que os resultados de algumas configurações eram redundantes, pois geraram valores muito próximos de entre as funções objetivo e de fator de redução de ajuste de escala, sem melhorias ou deterioração de uma simulação para outra com configuração diferente.

De maneira genérica o que pode se observar nas diversas formas de configurações para as calibrações, observadas nas tabelas 1 e 2, foi que tanto no modo mono como multi-objetivo para um baixo número de iterações não há convergência de parâmetros aceitável. Portanto foi com base nestas experimentações iniciais que se adotou o critério de fazer ensaios mais consistentes a partir de 5000 iterações.

Tabela 1 – Resumo das calibrações executadas no modo mono-objetivo, através do módulo de programa MOSCEM-MHUD.

Índice da Calibração	Nº Iterações	Nº Elementos	Nº Complexos	Função Objetivo			Convergiu
				RMSE	STD	NSE	
1	1000	50	5	X			NÃO *
2	1000	50	5		X		NÃO
3	1000	50	5			X	NÃO
4	5000	50	5	X			SIM *
5	5000	50	5		X		SIM
6	5000	50	5			X	SIM
7	7500	50	5	X			SIM
8	7500	50	5		X		SIM
9	7500	50	5			X	SIM
10	22280	50	5	X			SIM *
11	1000	75	5	X			NÃO *
12	5000	75	5	X			SIM *
13	7500	75	5	X			SIM *
14	5000	100	5	X			SIM
15	5000	100	10	X			SIM *
16	5000	200	10	X			SIM *
17	7500	200	10	X			SIM *
18	10000	200	10	X			SIM
19	5000	500	10	X			SIM *
20	7500	500	10	X			SIM *
21	10000	500	10	X			SIM *

Tabela 2 – Resumo das calibrações executadas no modo multi-objetivo, através do módulo de programa MOSCEM-MHUD.

Calibração	Nº Iterações	Nº Elementos	Nº Complexos	Convergiu
22	1000	50	5	NÃO *
23	5000	50	5	SIM *
24	10000	50	5	SIM
25	22400	50	5	SIM *
26	1000	75	5	NÃO *
27	5000	75	5	SIM *
28	7500	75	5	SIM *
29	5000	100	10	SIM *
30	7500	100	10	SIM
31	5000	200	10	SIM *
32	7500	200	10	SIM *
33	5000	500	10	SIM *
34	7500	500	10	SIM *
35	10000	500	10	SIM *
36	51200	500	10	SIM

Exemplifica-se, na figura 6, um gráfico de convergência dos parâmetros para a calibração 1, definida na tabela 1, o significado gráfico de cada parâmetro está indicado na legenda. Na ordenada é representado o fator de redução de ajuste de escala para a calibração utilizando a função objetivo RMSE, onde se vê que o fator supera o limite aceitável.

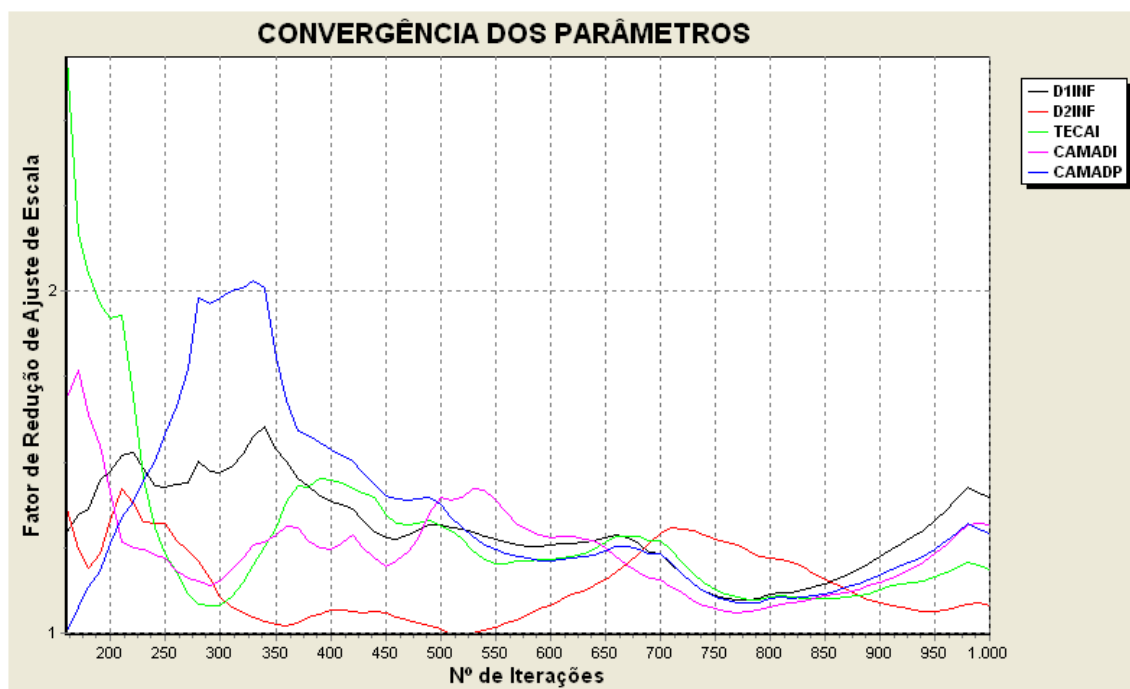


Figura 6 – Convergência dos parâmetros para a calibração com o MOSCEM-MHUD (modo mono-objetivo, função objetivo RMSE, 1000 iterações, 50 elementos, 5 complexos). Bacia do córrego do Gregório (18,47 Km<sup>2</sup>), evento de 06/05/1999. Na legenda observam-se as abreviações dos parâmetros que foram calibrados.

#### 4.1 - Análise da Convergência dos Parâmetros

Apresentam-se nas tabelas 3 e 4 resultados, forma resumida, para a convergência dos parâmetros nos modos mono e multi-objetivo. Dentro do critério já neste texto abordado de que o fator de redução de ajuste de escala deve ser igual ou inferior a 1,2, observa-se nessas configurações de calibrações que para todos os casos houve convergência.

Tabela 3 – Valores finais da convergência dos parâmetros, em valor absoluto do fator de redução de ajuste de escala, para o modo mono-objetivo.

CONFIGURAÇÃO	D1INF	D2INF	TECAI	CAMADI	CAMADP
22280 Iterações <sup>(3)</sup> 50 elementos 5 complexos	1,0361	1,0158	1,0263	1,0347	1,0215
5000 Iterações 500 elementos 10 complexos	1,1216	1,1013	1,1106	1,1060	1,1085
7500 Iterações 500 elementos 10 complexos	1,0754	1,0305	1,0933	1,0300	1,0751
10000 Iterações 500 elementos 10 complexos	1,0534	1,0577	1,0409	1,0379	1,0483

Tabela 4 – Valores finais da convergência dos parâmetros, em valor absoluto do fator de redução de ajuste de escala, para o modo multi-objetivo.

CONFIGURAÇÃO	D1INF	D2INF	TECAI	CAMADI	CAMADP
22400 Iterações <sup>(3)</sup> 50 elementos 5 complexos	1,0014	1,0055	1,0002	1,0008	1,0023
5000 Iterações 500 elementos 10 complexo	1,0558	1,0434	1,0471	1,0210	1,1196
7500 Iterações 500 elementos 10 complexos	1,0615	1,0323	1,0365	1,0250	1,0507
10000 Iterações 500 elementos 10 complexos	1,0460	1,0181	1,0214	1,0137	1,0285

Em análise dos dados de convergências tabulados, nota-se claramente que independentemente do número de elementos ou complexos estabelecidos, quanto maior o número de iterações melhor a convergência dos parâmetros. Visto que no caso em que a convergência ocorreu naturalmente, ou seja, sem o pré-estabelecimento de um número de iterações, os resultados obtidos são melhores. Nota-se também que a convergência no modo multi-objetivo apresenta resultados melhores que no mono-objetivo, entretanto ambos podem ser utilizados sem restrições. Na figura 7, é demonstrado

<sup>3</sup> Convergência de parâmetros naturalmente, sem o estabelecimento de um determinado número de iterações.

graficamente o resultado de uma das calibrações em que houve convergência. Observou-se nos dados e na figura 7 que o fator de redução de ajuste de escala esteve com valores baixos entre 15000 e 16500 iterações, entretanto só convergiu ao atingir 22280 iterações, embora não haja ganhos evidente no fator de ajuste.

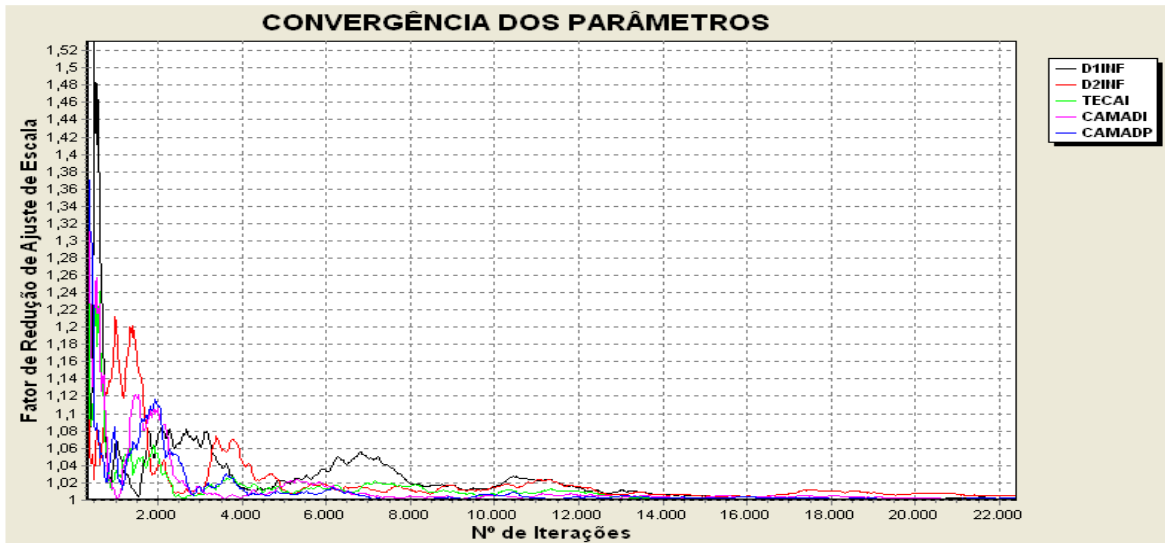


Figura 7 – Convergência dos parâmetros (multi-objetivo, convergiu ao atingir 22400 iterações, 50 elementos, 5 complexos), com o MOSCEM-MHUD. Bacia do córrego do Gregório (18,47 Km<sup>2</sup>), evento de 06/05/1999.

#### 4.2 Análises das funções objetivo

Os resultados das funções objetivo são usados na definição da região de Pareto para cada calibração. Utilizaram-se como exemplos a calibrações 21 da tabela 1, (mono-objetivo, 10000 iterações, 500 elementos, 10 complexos), cujos resultados são mostrados na figura 8; a calibração 25, tabela 2, (multi-objetivo, convergiu com 22400 iterações, 50 elementos, 5 complexos), mostrados na figura 9 e a calibração 35, tabela 2, (multi-objetivo, 10000 iterações, 500 elementos, 10 complexos), mostrados na figura 10.

Convencionou-se neste texto que nos gráficos ilustrativos da região de Pareto, representados nas figuras 8, 9 e 10, as abreviações “F.O.” dos eixos das ordenadas e abscissas referem-se às funções objetivos utilizadas para cada caso de calibração, já que no programa desenvolvido, não foi criada uma alteração dinâmica do nome da função objetivo utilizada a ser plotada nos eixos. De forma que quando se trata de calibração mono-objetivo os referidos eixos referem-se aos valores de uma das três funções objetivo (RMSE ou STD ou NSE) extraídas dos arquivos gerados no módulo MOSCEM-MHUD e no caso das calibrações multi-objetivo os valores referem-se as médias calculadas para as três funções objetivo utilizadas simultaneamente através do algoritmo MOSCEM-UA extraídas dos arquivos gerados no módulo de calibração MOSCEM-MHUD.

Observa-se na figura 8 que não houve definição da região de Pareto, ou seja, a calibração no

modo mono-objetivo gerou pontos de funções objetivo geradas aleatoriamente sem definição muito clara da frente de Pareto. As calibrações no modo multi-objetivo, figura 9 e 10, têm as frentes de Pareto bem definidas, sendo que na figura 10 pelo número de elementos, a densidade de pontos é maior na região.

A seleção do conjunto de parâmetros a ser utilizado deve ser feita criteriosamente, observando os resultados das vazões calculadas em comparações com as vazões observadas, possibilitando verificar a qualidade da calibração.

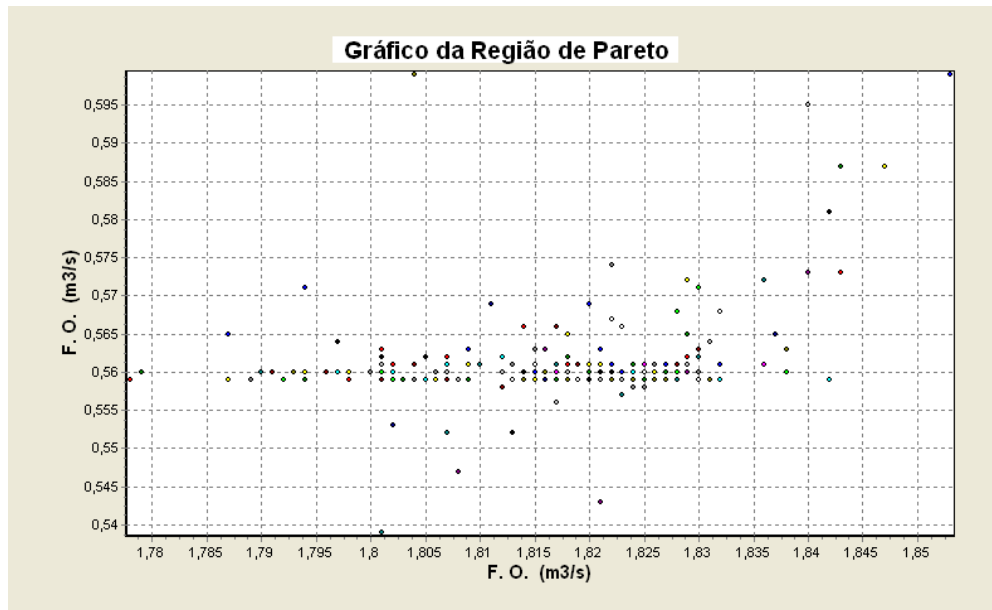


Figura 8 – Gráfico dos valores da função objetivo RMSE na região de Pareto (mono-objetivo, 10000 iterações, 500 elementos, 10 complexos), com o MOSCEM-MHUD. Bacia do córrego do Gregório (18,47 Km<sup>2</sup>), evento de 06/05/1999.

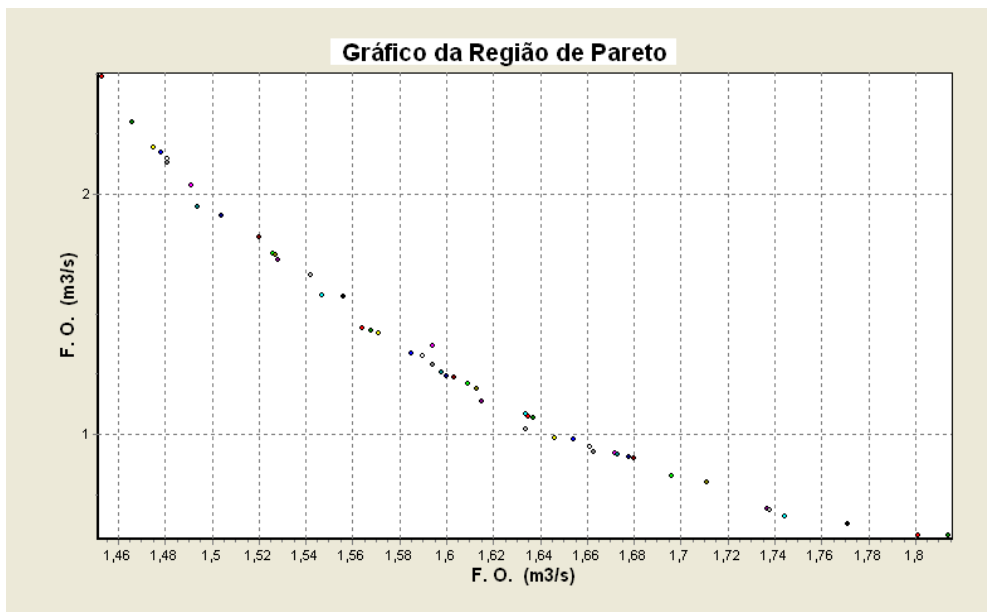


Figura 9 – Gráfico de plotagem dos valores das funções objetivo na região de Pareto (multi-objetivo, convergiu com 22400 iterações, 50 elementos, 5 complexos), com o MOSCEM-MHUD. Bacia do córrego do Gregório (18,47 Km<sup>2</sup>), evento de 06/05/1999.

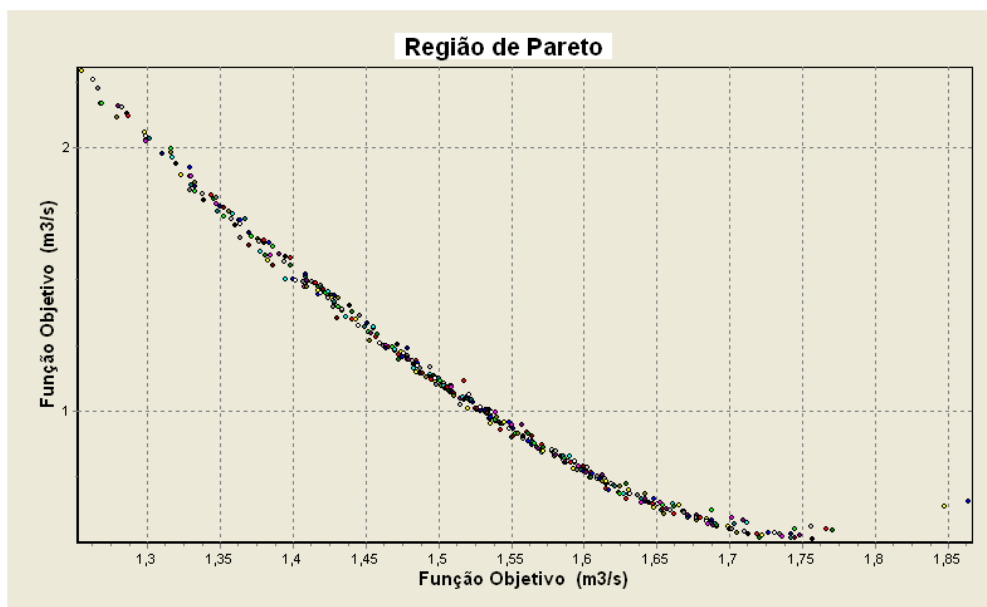


Figura 10 – Gráfico dos valores das funções objetivo na região de Pareto (multi-objetivo, 10000 iterações, 500 elementos, 10 complexos), com o MOSCEM-MHUD. Bacia do córrego do Gregório (18,47 Km<sup>2</sup>), evento de 06/05/1999.

### 4.3 - Análises dos Hidrogramas

Conforme já descrito nesse texto os hidrogramas são gerados no programa de verificação denominado de POSTPROC-MHUD. Como são vários tipos de hidrogramas que podem ser gerados

em uma simulação de verificação, abordam-se aqui apenas os mais significativos, visando apresentar de forma sintética os resultados das calibrações.

Os hidrogramas contendo as vazões observadas, vazões calculadas com parâmetros calibrados manualmente e vazões calculadas com parâmetros calibrados automaticamente (mono-objetivo, função objetivo RMSE, 22280 iterações, 50 elementos, 5 complexos) estão explicitadas na figura 11. Observa-se, nesta figura, que a calibração executada manualmente apresenta uma vazão de pico próxima à obtida pela calibração automática utilizando o SCEM-UA, não proporcionando melhoria. Quanto às calibrações utilizando 5000, 7500 e 10000 iterações, 500 elementos e 10 complexos observaram-se resultados ainda menos significativos, dispensando sua apresentação.

Na figura 12 utilizou-se resultados da calibração com 22400 iterações, 50 elementos, 5 complexos no modo multi-objetivo, os quais estão demonstrados nos hidrogramas comparativos entre as diferentes vazões obtidas através de ajustes de parâmetros, e já nesse caso observa-se que a vazão de pico calculada com calibração automática através da utilização do MOSCEM-UA melhor se aproximada da vazão observada, superando em qualidade a vazão calculada através da calibração manual.

Diferentemente das calibrações executadas no outro modo, as calibrações multi-objetivos notadamente apresentam maior significância, podem tais fatos ser observados nos dados e hidrogramas gerados nas simulações.

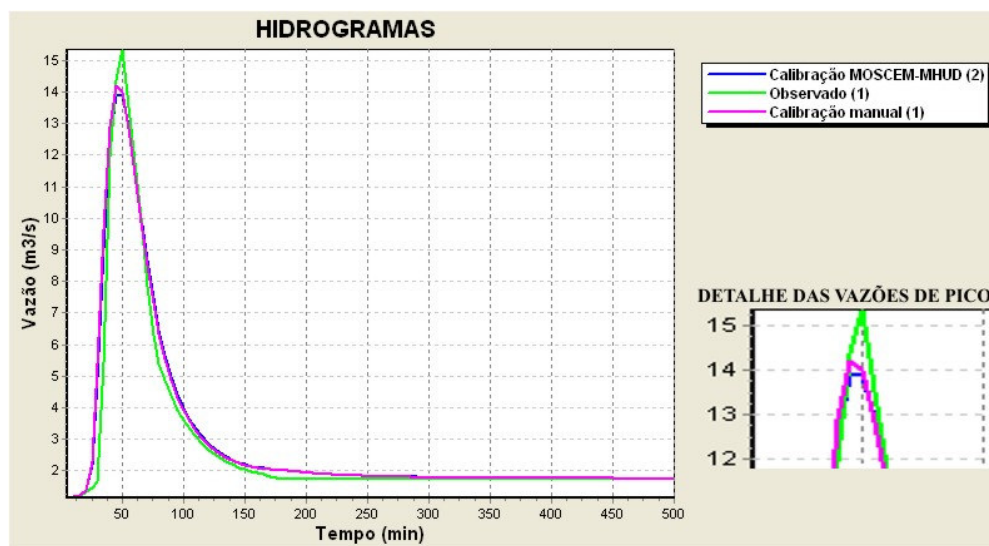


Figura 11 – Hidrogramas com as vazões observadas e calculadas, (mono-objetivo, convergiu ao atingir 22280 iterações, 50 elementos, 5 complexos), utilizando o POSTPROC-MHUD. Bacia do córrego do Gregório (18,47 Km<sup>2</sup>), evento de 06/05/1999.

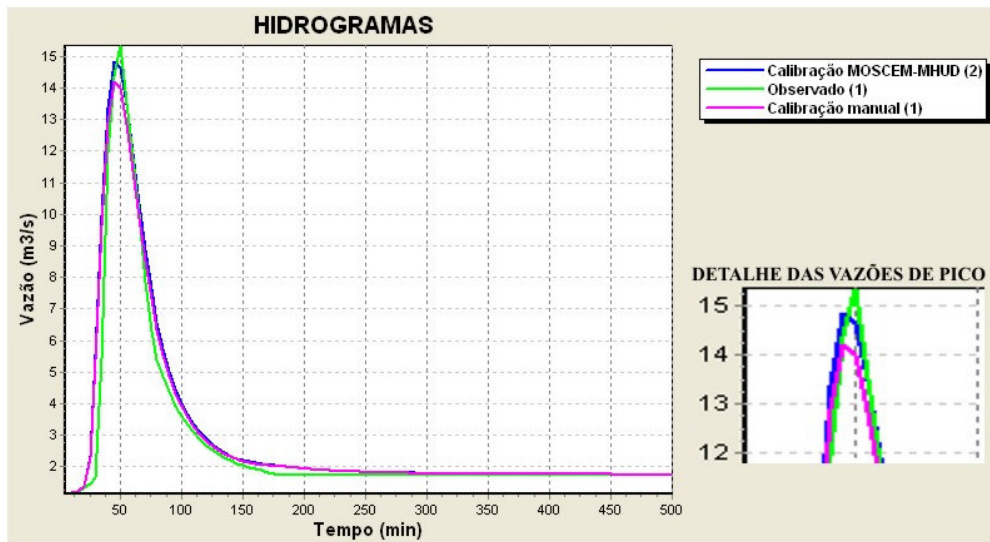


Figura 12 - Hidrogramas gerados pelo POSTPROC-MHUD, com as vazões observadas, calculadas com parâmetros calibrados manualmente e calculadas utilizando um conjunto de parâmetros selecionado através da calibração automática (multi-objetivo, 22400 iterações, 50 elementos, 5 complexos). Bacia do córrego do Gregório (18,47 Km<sup>2</sup>), evento de 06/05/1999.

#### 4.4 - Análises de sensibilidades

O módulo POSTPROC-MHUD através da opção 3, conforme descrito no item 3.2.1, calcula e gera dados de vazões a partir da utilização de todos os conjuntos de parâmetros, dois hidrogramas, um com vazões máximas (limite máximo) e outro com vazões mínimas (limite mínimo). Na figura 13 apresentam-se a justaposição dos seguintes hidrogramas: vazões máximas e mínimas (limites), vazões observadas, vazões calculadas calibradas manualmente e vazões calibradas com o conjunto de parâmetros selecionado pelo usuário, na qual foi utilizada a configuração mono-objetivo, convergiu com 22280 iterações, 50 elementos e 5 complexos.

Observa-se na figura 13 que as vazões observadas e calculadas através de calibração manual dos parâmetros encontram-se fora dos limites estabelecidos pelo processo de verificação, portanto a calibração não alcançou sucesso.



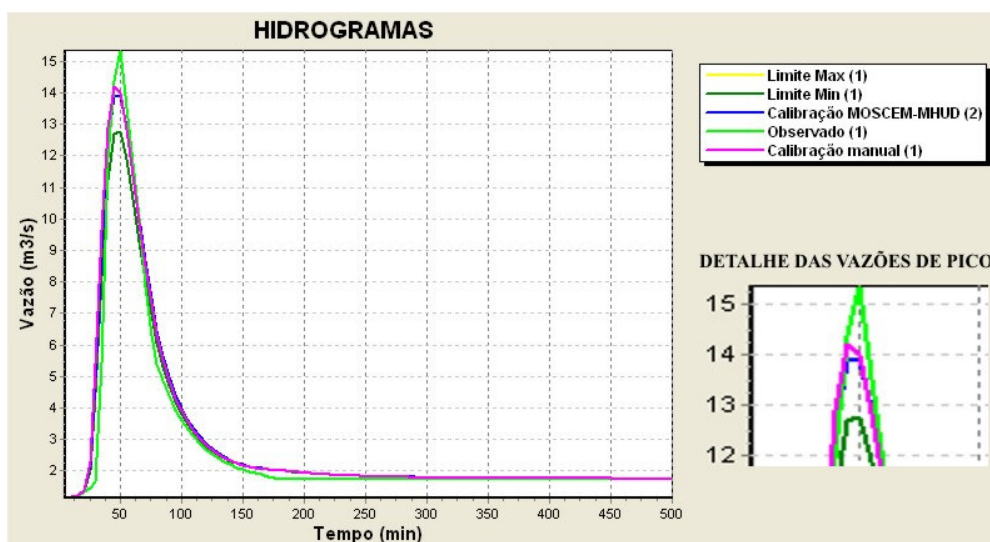


Figura 13 – Hidrogramas que representam os resultados com a plotagem dos limites justapondo com as vazões observadas e calculadas (mono-objetivo, convergiu com 22280 iterações, 50 elementos e 5 complexos), com o POSTPROC-MHUD. Bacia do córrego do Gregório (18,47 Km<sup>2</sup>), evento de 06/05/1999.

Usando a mesma opção 3, do POSTPROC-MHUD, agora no modo multi-objetivo, geraram-se dois hidrogramas limites, um de vazões máximas outro de mínimas. Apresentam-se na figura 14 os hidrogramas: vazões máximas e mínimas (limites), vazões observadas, vazões calibradas manualmente e vazões calibradas com o conjunto de parâmetros escolhido pelo usuário com o uso da configuração multi-objetivo, convergiu com 22400 iterações, 50 elementos e 5 complexos.

Verifica-se na figura 14 que os hidrogramas com as vazões observadas enquadram-se dentro dos limites para as vazões de pico, mas apresenta-se abaixo dos limites mínimos para as baixas e médias vazões. O hidrograma contendo as vazões calculadas com parâmetros calibrados manualmente apresenta-se dentro dos limites para as vazões de pico e para as baixas vazões. O hidrograma com as vazões calculadas com o conjunto de parâmetros calibrado selecionado pelo usuário está implícito dentro desses limites tanto para as vazões de pico como para as baixas vazões, portanto apresenta resultados satisfatórios.

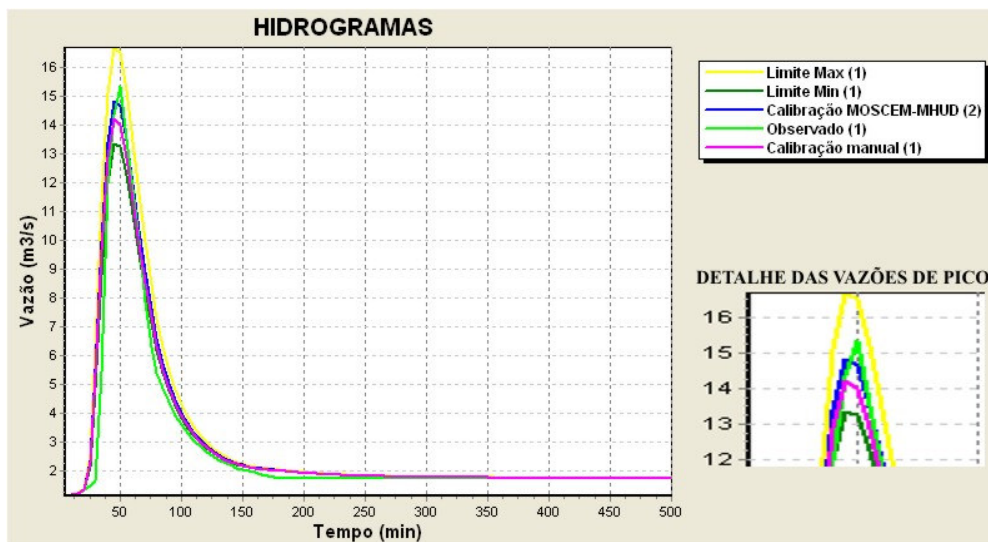


Figura 14 – Hidrogramas gerados pelo POSTPROC-MHUD com vazões observadas, vazões calculadas calibradas manualmente, vazões calculadas com parâmetros calibrados pelo MOSCEM-MHUD (multi-objetivo, 22400 iterações, 50 elementos, 5 complexos), os limites máximos e os limites mínimos das vazões calculadas com calibração dos parâmetros. Bacia do córrego do Gregório (18,47 Km<sup>2</sup>), evento de 06/05/1999.

## 5 - CONCLUSÕES

As conversões e adaptações executadas no MOSCEM-UA para com alteração do sistema operacional e da linguagem de programação mantiveram o desempenho e qualidade das respostas.

Com o desenvolvimento do Projeto OTIMHUD, pode-se estabelecer uma maior iteratividade com o usuário, com maior facilidade na inserção das configurações e seleção de diretórios e arquivos, permitindo também a visualização imediata dos gráficos gerados, nas diversas formas de simulações possíveis.

O módulo de calibração no modo multi-objetivo necessitou 5,67 segundos e no mono-objetivo 5,17 segundos. Saliente-se que o MHUD II é um modelo distribuído e representa a bacia do Gregório através de 1210 nós e 1907 sub-bacias.

Nas calibrações no modo mono-objetivo, mesmo as calibrações com número de iterações muito altas não resultaram melhoria significativa da qualidade dos resultados.

Em todas as simulações executadas no modo mono-objetivo ficou demonstrado que os hidrogramas contendo as vazões observadas e as calibradas manualmente extrapolam os limites máximos e mínimos utilizando todos os conjuntos de parâmetros no processo de verificação gerado pelos cálculos da opção 3 (Trade-off).

No modo multi-objetivo o número de iterações mostrou-se sem muita influência nas calibrações que envolveram pequenas quantidades de elementos, entretanto o número de iterações passa a possuir maior importância quando se utiliza um grande número de elementos. A elevação do

número de elementos melhora o ajuste das vazões de pico e tendem a aproximar as vazões médias e baixas calculadas das vazões observadas.

Observou-se que os valores das vazões calculadas com os conjuntos de parâmetros selecionados calibrados pelo MOSCEM-MHUD, no modo multi-objetivo, em todos os casos utilizando um número maior ou igual a 5000 iterações supera os ajustes executados com os parâmetros calibrados manualmente por Barbassa (1999, 2005).

Genericamente o número de complexos não influencia nos valores das vazões e sim na forma do processamento, pois quanto maior o número de complexos maior o agrupamento das iterações e maior o tamanho do bloco de dados, influenciando minimamente no tempo computacional, já que o grande consumo de tempo computacional é exigido pelo número de iterações.

Os hidrogramas observado e calculado por calibração automática no modo multi-objetivo posicionaram-se dentro da faixa de limites máximos e mínimos utilizando todos os conjuntos de parâmetros no processo de verificação gerado pelos cálculos da opção 3 (Trade-off).

Conclui-se pela análise das funções objetivo, do fator de redução de ajuste de escala, dos hidrogramas e dos hidrogramas limites que o OTIMHUD quando utilizado no modo multi-objetivo apresentou resultados satisfatórios em todos os itens.

## BIBLIOGRAFIA

ALVES, M. B. M.; ARRUDA, S. M. (2002). “*Como fazer referências Bibliográficas, Eletrônicas e Demais Formas de Documentos*”. Florianópolis: UFSC – SC. Disponível em: <<http://www.bu.ufsc.br>> Acesso em: 17 novembro de 2002.

BARBASSA, A.P. (1991). *Simulação do Efeito da Urbanização sobre a Drenagem Pluvial na Cidade de São Carlos*. Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento. EESC/USP São Carlos – SP, 327p.

BARBASSA, A.P. (1995). “*Qualidade de Registros Pluviométricos*”, in anais III Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Salvador - BA, Dez. 1996. ABRH, Vol. 1, pp. 25-31.

BARBASSA, A.P. (1997). “*Monitoramento Pluviométrico e de Escoamento Superficial em Áreas Urbana*”, in Seminário Internacional sobre Manejo del Agua Pluvial Urbana - Modelacion de Procesos e Cuencas Experimentales, Santa Fe - Argentina, Mai. 1997. AUGM, Vol. 1, pp. 1-11.

BARBASSA, A.P. et al. (2005). “*Estudo de enchentes urbanas associando rede de monitoramento densa, SIG e Modelo Distribuido*”, in XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Nov. 2005, João Pessoa – PB, ABRH, 2005, em CDrom.

BARBASSA, A.P.; RIGHETTO, A.M. (1995). “*Impacto da Urbanização em Sistema de Drenagem Urbana - Simulação sobre a bacia de São Carlos – SP*”, in anais do XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e II Simpósio de Hidráulica dos Países de língua Portuguesa - Recife - PE – Nov. 1995, Vol 3, pp. 353-358.

BASTIDAS, L. A.; GUPTA H. V., SOROOSHIAN S.; SHUTTLEWORTH, W. J., YANG Z. L. (1999). “*Sensitivity analysis of a land surface scheme using multicriteria methods*”. J. Geophys. Res., 104(D16), 19,481– 19,490.

- DUPAS, M.A. (2002). *Pesquisando e Normatizando*. 1ª Ed. São Carlos: EdUFSCAR. 73 p.
- GELMAN A. e RUBIN, D. R. (1992). - *A single series from the Gibbs sampler provides a false sense of security*, *Bayesian Statistics 4* (eds. J.M Bernardo et al), Oxford University Press, pp. 625-631.
- GUPTA H.V., SOROOSHIAN S. AND YAPO P.O. (1998). "*Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and noncommensurable measures of information*". *Water Resources Research*, 34, pp. 751–763.
- METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; A. H. TELLER A. H.; TELLER E. (1953). "*Equations of state calculations by fast computing machines*" *J. Chem. Phys.*, 21, pp. 1087– 1091.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. (1965). "*A simplex method for function minimization*". *Computer Journal*, v. 7, pp. 308-313.
- PAGNOSSI, A.A. (2006). "*Implementação de Técnica de Calibração Automática ao Modelo Hidrológico Urbano Distribuído*", *Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana*. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP. 150p.
- RIGHETTO, A. M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. 1ª ed. EDUSP. EESC/USP, 1998. 840p.
- SOROOSHIAN, S., GUPTA, H. V., BASTIDAS, L. A. (1998). "*Calibration of hydrologic models using multi-objectives and visualization techniques*". Final Report EAR 9418147. Dep. Hydrology and Water Resources. University of Arizona. 78p.
- TUCCI, C.E.M. et al. (2001). *Hidrologia Ciência e Aplicação*. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, ABRH, 943p.
- VRUGT, J.A.; GUPTA, H. V.; BASTIDAS, L. A.; BOUTEN, W., SOROOSHIAN, S. (2003). "*Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models*". *Water Resour. Res.* 39(8). 1214. doi:10.1029/2002WR001746.
- VRUGT, J. A.; GUPTA, H. V.; BOUTEN, W.; SOROOSHIAN, S. (2003). "*A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters*". *Water Resour. Res.* 39(8). 1201. doi:10.1029/2002WR001642.
- XIA, Y.; PITTMAN, A. J.; GUPTA, H. V.; LEPLASTRIER, M.; HENDERSON- SELLERS, A.; BASTIDAS, L. A. (2002): "*Calibrating a land surface model of varying complexity using multicriteria methods and the Cabauw dataset*". *J. Hydrometeor.*, 3, pp. 181–194.
- YAPO, P.O.; GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S. (1998). "*Multi-objective global optimization for hydrologic models*". *Journal of Hydrology*, Vol. 204, pp. 83-97.