

XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO MODHAC NAS BACIAS DA MATA SUL DO ESTADO DE PERNAMBUCO COM VISTAS NO DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ALERTA DE ENCHENTES

José Guimarães de C. Neto¹; Suzana Maria Gico L. Montenegro²; Alfredo Ribeiro Neto³ & Javier Tomasella⁴

RESUMO – Diante da recorrência de desastres naturais no país, medidas no âmbito político estão sendo feitas no sentido de procurar antever e minimizar os impactos causados dos eventos desastrosos. O presente trabalho visa colaborar com o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) quanto à ocorrência de enchentes no Estado Pernambuco. Com este objetivo, o modelo hidrológico MODHAC foi aplicado em quatro bacias hidrográficas, Sirinhaém, Una, Mundaú e Paraíba do Meio, localizadas no Sul do Estado. Neste trabalho será apresentada a metodologia utilizada no emprego do modelo e alguns resultados obtidos referentes às estações fluviométricas da Bacia do Una. A metodologia buscou abranger a variabilidade do regime hidrológico, sem comprometer a equidade dos picos. Para tal, utilizou-se o processo de calibração cruzada, ajustando o conjunto de parâmetros para três diferentes períodos. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios e a operacionalização do modelo está em andamento.

ABSTRACT– The recurrence of natural disasters in Brazil, encouraged political measures in order to promote actions to anticipate and minimize the impacts of disastrous events. The present work aims to collaborate with the National Center for Monitoring and Warning of Natural Disasters (CEMADEN) regarding to the occurrence of floods in Pernambuco State. In order to achieve this, the hydrological model MODAHC was applied to four watersheds, Sirinhaém, Una, Mundaú and Paraíba do Meio, located in the southern of the State. This work presents the methodology used in the application of the model and some results concerning the fluviometric stations of the Una River Basin. The methodology aimed to cover the variability of the hydrological regime, without compromising the equity of the peaks. It was used the process of cross-calibration by adjusting the set of parameters for three different time periods. The results were satisfactory and the operationalization of the model is in progress.

Palavras-Chave – Sistema de Alerta de Enchentes, Modelagem Hidrológica, Pernambuco

INTRODUÇÃO

Diversos riscos estão envolvidos na gestão de desastres naturais, sendo assim esta gestão deve considerar o planejamento de ações de prevenção, ações emergenciais, ações de mitigação e

1) Afiliação: Bolsista Rede Clima, cooperação Universidade Federal de Pernambuco e Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais, ze.ambiental@gmail.com

2) Afiliação: Departamento de Engenharia Civil/Laboratório de Hidráulica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE – Brasil, suzanam.ufpe@gmail.com

3) Afiliação: Departamento de Engenharia Civil/Laboratório de Hidráulica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, alfredoribeiro@ufpe.br

4) Afiliação: Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais, javier.tomasella@cemaden.gov.br

recuperação. Com isto, sistemas de previsão e alerta são uma componente fundamental no conjunto de medidas necessárias para reduzir o impacto econômico e social dos desastres naturais.

Desastres naturais podem ser entendidos como eventos primariamente de curso natural, tal qual inundação, deslizamento de terra, vulcanismo, terremotos, furacões e outros, que originem vítimas ou causem prejuízos econômicos – devido a danos em estruturas ou culturas agrícolas. Desta maneira, não há grandes possibilidades de se evitar um desastre natural, mas sim de prevenir os mais diversos efeitos negativos, seja através de medidas estruturais (que tratam do trabalho físico em campo, tal qual barragens para contenção de enchentes ou mesmo a simples colocação de lonas plásticas em encostas desprovidas de vegetação) ou medidas não-estruturais (conscientização da população quantos aos riscos eminentes de uma situação de risco ou mesmo um sistema de previsão e alerta para desastres visando remoção dos possíveis afetados).

O presente trabalho trata de uma medida não estrutural da aplicação de um modelo hidrológico visando implantação em um sistema de previsão e alerta quanto à ocorrência de enchentes. A previsão compreende previsões meteorológicas de estimativas quantitativas de precipitação (baseados em análises de modelos numéricas para previsão do tempo, medições em tempo real de pluviômetros, ou combinação de ambos), que venham a permitir alimentar o modelo hidrológico e avaliar a ascensão do hidrograma de um determinado trecho de rio. Através dos valores de vazão, é possível inferir o aumento da cota do rio, com relativa antecedência, permitindo avisar as populações ribeirinhas da situação de alerta para que desocupem as áreas sujeitas a inundações.

Dito isto, o conhecimento multidisciplinar entre as ciências de meteorologia e hidrologia envolvem a aplicação de modelos matemáticos que vislumbam a realidade, de maneira simplificada, de modo a buscar entendimento e compreensão de seus complexos fenômenos. A representação de um sistema, pelo modelo, responde a uma entrada com uma saída (Tucci, 2005). Ou seja, no caso específico e básico de modelos hidrológicos é possível haver diversos dados de entradas, cujo principal é o de precipitação, e o resultado almejado é a vazão do rio estudado. Sendo assim, para viabilizar o sistema de alerta do Estado de Pernambuco, nos municípios inseridos nas bacias hidrográficas dos rios Sirinháem, Una, Mundaú e Paraíba do Meio, faz-se necessário, em uma primeira etapa, utilizar um modelo hidrológico de modo a viabilizar um melhor entendimento do processo de transformação de chuva intensa em vazão de pico de determinados trechos de rio.

O modelo hidrológico selecionado para o estudo foi o MODHAC (Modelo Hidrológico Auto-Calibrável). O critério de seleção foi o uso comum deste modelo em diversas bacias da região do Nordeste, sendo, inclusive, modelo definido para os Planos de Recursos Hídricos para todas as

bacias hidrográficas do Estado do Ceará e algumas da Bahia (Lanna, 1997), como também todas as bacias do Estado de Sergipe (Sergipe, 2010) e outras da Paraíba (Paraíba, 2006).

A execução do MODHAC se deu em diversos trechos, conforme a presença de estações fluviométricas, para as bacias do Sirinhaém, Una, Mundaú e Paraíba do Meio. No presente trabalho, será exposta a metodologia para execução da modelagem e discutidos os resultados referentes à bacia do Rio Una, que possui relevantes fatos históricos de desastres naturais causados por enchentes.

DADOS E METODOLOGIA

Área de Estudo

Com cerca de 6,3 mil km², a bacia hidrográfica do Rio Una, localizada ao sul do Estado de Pernambuco, entre as latitudes sul 8°17'14" e 8°55' 28" e entre as longitudes oeste 35°07'48" e 36°42'10", possui 42 municípios inseridos total ou parcialmente na área, sendo que 19 possuem suas sedes na área da bacia (Pernambuco, 2006). A população que vive na área da bacia é de cerca de 553,3 mil habitantes (Pernambuco, 2011). O Rio Una, com seus 255km de extensão, apresenta em sua parte alta escoamento intermitente até o município de Altinho, quando torna-se perene. Esta perenização se dá essencialmente pelo aumento dos índices de pluviométricos (Pernambuco, 2006). A Figura 1 apresenta a área de estudo, e define as estações fluviométricas utilizadas.

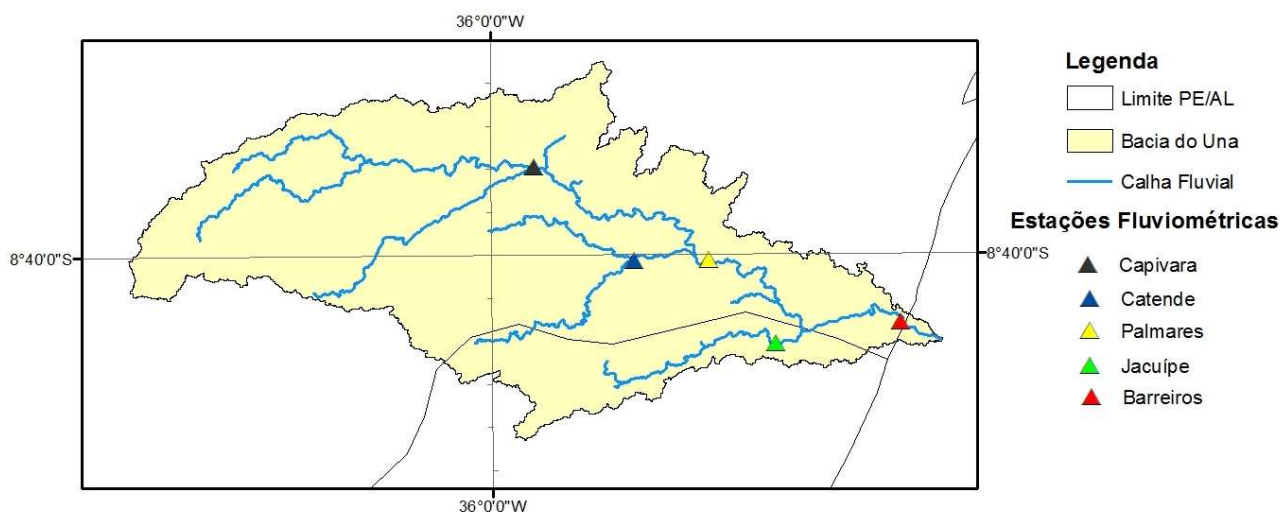


Figura 1 Delimitação da Bacia do Una e localização das estações fluviométricas trabalhadas

A bacia do rio Una apresenta duas regiões climáticas distintas, sendo o município de Agrestina referencial divisor entre o clima semi-árido e quente úmido. A primeira região com índices de precipitação total média anual entre 500 a 800 mm e a segunda com totais anuais superior a 1000 mm. Desta maneira, a vegetação também busca adaptação ao clima, com existência da

Caatinga na porção semiárida e manchas de Mata Atlântica na região quente úmida. Inclusive, há diversas Áreas de Proteção Ambiental na área da bacia do Rio Una (Pernambuco, 2006).

Quase toda área da referida bacia é representada por rochas cristalinas, enquanto que área sedimentar apresenta-se próximo ao litoral. Os solos da região são pouco desenvolvidos, medianamente a pouco profundos, com baixa permeabilidade e capacidade de retenção (Pernambuco, 2006).

Ocupação urbana e industrial, monocultura da cana-de-açúcar, agropecuária e manchas de vegetação nativa são os principais usos do solo da região. Há na bacia dez barragens com capacidade superior a 500 mil m³ para atendimento da demanda hídrica, entre eles destaca-se o açude Prata, no município de Bonito, com cerca de 42 milhões de m³ para fins de abastecimento público e o açude Gurjão, no município de Capoeiras, com aproximadamente 4,7 milhões de m³ com fins de irrigação e perenização (Pernambuco, 2006). São barragens situadas, em sua maioria, na parte alta da bacia e essencialmente em rios tributários do Una. Isto deve ser bem evidenciado uma vez que as barragens foram ignoradas no processo de simulação com o MODHAC.

MODHAC

O Modelo Hidrológico Auto Calibrável (MODHAC) busca simular a realidade da fase terrestre do ciclo hidrológico através de equações matemáticas empíricas (Lanna, 1997). Equações empíricas não consideram, efetivamente, as leis físicas que regem os diversos processos hidrológicos, ou seja, são equações ajustadas de acordo com observações dos processos (Rennó, 2004) – utilizam-se regressões para relacionar a precipitação com a vazão (Tucci, 2005).

O MODHAC não considera a variabilidade espacial das variáveis hidrológicas na bacia hidrográfica, de tal forma que o modelo é dito globalizado ou concentrado (Lanna, 1997). Isto significa que todas as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda a área estudada (Rennó, 2004), sendo assim visa-se adquirir valores médios ou ponderados dos mais diversos parâmetros. Outra característica importante do modelo são seus cálculos executados de forma determinística, não possuindo variável alguma com comportamento aleatório (Rennó, 2004). Em outras palavras, para as mesmas condições iniciais, haverá os mesmos resultados.

Os dados de entrada necessários para a devida execução do modelo são: área da bacia, precipitação e evapotranspiração médias na área estudada, além da vazão observada. O nível básico dos dados de entrada enaltecem o grau de empirismo intrínseco ao modelo.

Este modelo é um aperfeiçoamento do Modelo Hidrológico para o Trópico SemiÁrido (MOHTSAR), do ano de 1986, direcionado para as bacias hidrográficas do semiárido do Brasil (Lanna, 1997). Após três anos, houve a primeira versão do MODHAC, sendo continuamente aprimorada até o ano de 2000, em sua última versão, que é executada em interface *Windows®*

(Filho, 1999). A versão final do modelo apresenta 16 parâmetros e procedimento automático de calibração para ajustes de valores de 14 deles.

Dito isto, é possível expor um esquema do funcionamento do MODHAC, conforme figura 2.

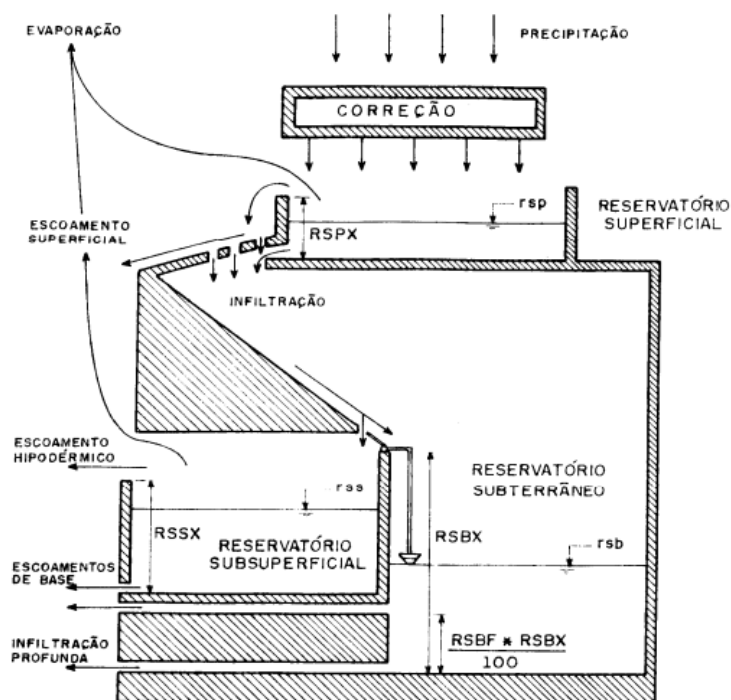


Figura 2 Esquema do MODHAC. Fonte: Lanna, 1997

Metodologia

O primeiro passo trata da aquisição dos dados de entrada do modelo. Para a sua devida execução, o MODHAC requer dados médios de precipitação e evapotranspiração potencial para a área de estudo, além das vazões observadas da seção em estudo. A área de contribuição para a estação estudada também deve ser inserida no modelo.

Dados de precipitação foram adquiridos diretamente no banco do supercomputador do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Neste banco, estão inclusos dados originados de diversas agências: Agência Nacional de Águas (ANA), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) além do Programa de Monitoramento Climático em Tempo Real da Região Nordeste (ProClima).

Utilizou-se o método do inverso do quadrado da distância para definição da precipitação média. Este método atribui pesos para os pontos de maneira inversamente proporcional ao quadrado da distância, assim quanto mais próximo uma amostra estiver de um ponto, maior será seu peso no valor interpolado do mesmo (Oliveira, 2010).

A evapotranspiração potencial foi adquirida diretamente de dados do INMET para estações e os dados de vazão das estações fluviométricas da ANA, disponíveis no Hidroweb. O modelo foi aplicado para cada área de contribuição das estações fluviométricas da ANA.

Buscou-se limitar o tempo de estudo quando ocorreram as enchentes mais recentes, com dados disponíveis entre 2000 e 2008. Este curto espaço de tempo permitiu abranger a sazonalidade da variação da vazão, a exemplo a estação fluviométrica de Palmares, que apresenta vazão média na ordem de 32 m³/s, registrou no ano 2000 uma vazão de 1134 m³/s e em 2005 de 630 m³/s e ambas causaram desastres, ressaltando ainda o fluxo normal da vazão entre os anos de 2006 a 2008. Ou seja, desde o início, trata-se de uma situação difícil para apreciação do modelo empírico. Com isto, realizou-se o processo de calibração cruzada para as estações fluviométricas estudadas. Sendo assim, a execução do modelo seguiu os seguintes passos:

- I. Distinção de três períodos, de 2000 a 2002, de 2003 a 2005 e de 2006 a 2008, para cada uma das estações fluviométricas;
- II. Calibração do modelo para cada um dos períodos para as funções objetivos inseridas no modelo. Um ajuste fino manual também é realizado, buscando melhores resultados;
- III. Verificação dos parâmetros ajustados, em cada período, nos outros dois períodos;

Em outras palavras, foram definidos intervalos de tempo para se calibrar o modelo, adquirindo os valores dos parâmetros que melhor se ajustaram àquela realidade e em seguida fez-se a verificação do ajuste nos outros períodos. Assim, na calibração cruzada busca-se ajustar os valores dos parâmetros em toda a extensão do período utilizado para a simulação hidrológica, e analisar aquele conjunto de parâmetros que melhor respondeu diante de todo conjunto de vazões observadas.

Como se trata de um modelo empírico, pouco robusto, com seus parâmetros definidos para determinadas condições aos quais foram ajustados (Rennó, 2004), o procedimento de calibração cruzada favorece a uma varredura capaz de abranger a variação do regime hidrológico, representado pela vazão entre os anos de 2000 e 2008.

A análise dos resultados do presente trabalho foi de complexa interpretação, pois o objetivo geral do trabalho é o de apresentar um modelo que fosse capaz de contribuir com o sistema de alerta, de tal maneira que respondesse bem a altas vazões – sem comprometer as mínimas. Contudo, o modelo está passível de superestimar ou subestimar qualquer evento, influenciando diretamente os coeficientes de eficiência comumente usados nos trabalhos de modelagem hidrológica: coeficiente de Determinação (R^2) e Nash-Sutcliffe (Nash). Com isto, os referidos coeficientes foram utilizados como ferramenta auxiliar na análise dos resultados, sendo a averiguação dos hidrogramas, observando a consonância entre os picos, observados e simulados, e os gráficos de dispersão dos diferentes períodos os principais norteadores para definição dos melhores conjuntos de parâmetros.

O coeficiente (R^2) possui a capacidade de indicar o quanto da dispersão dos dados observados pode ser explicado pelos dados simulados, enquanto que o Nash mostra-se bastante sensível às vazões máximas (Tucci, 2002). Valores do coeficiente de Nash superior 0,75 indicam uma boa simulação e entre 0,36 e 0,75 é considerado aceitável (Tucci, 2002). A saber, que o valor do coeficiente de Nash varia entre menos infinito até 1, quando seria apresentada a simulação perfeita. O erro de volume (ΔV) também é aplicado visando complementar o desvio geral do volume total calculado em relação ao observado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir da auto-calibração pela função objetivo 4, da minimização das diferenças dos logarítmicos das vazões, ofereceram resultados, em via de regra, ruins e por este motivo logo foi descartado o prosseguimento de seu uso.

Para a bacia do rio Una, cinco estações foram selecionadas para o processo de simulação. Apenas a estação de Palmares foi trabalhada nos três períodos. As estações de Catende e Barreiros apresentavam o período mais consistente, com a presença de dados, a partir de 2003, enquanto que as estações de Capivara e Jacuípe não apresentaram vazões significativas no período entre 2006 a 2008. Sendo assim, com exceção da estação de Palmares, foram três conjuntos de parâmetros, para cada um dos dois períodos, sendo verificados no outro. A estação de Palmares apresentou três conjuntos de parâmetros, para cada um dos três períodos, e cada conjunto de parâmetro foi verificado nos outros dois períodos. Desta maneira, foi possível realizar uma análise geral de cada conjunto de parâmetro ajustado, no período de calibração, e sua resposta no período de verificação, e apontar um único conjunto de parâmetros que melhor respondesse às necessidades do sistema de alerta.

As estações trabalhadas nesta bacia são apresentadas na tabela 1, com as respectivas áreas de contribuição. A tabela 2 exhibe os valores dos coeficientes de eficiência dos melhores resultados da calibração cruzada.

Tabela 1 Estações fluviométricas da bacia do Una e suas respectivas áreas de contribuição para o escoamento superficial

Estações Fluviométricas	Capivara	Catende	Jacuípe	Palmares	Barreiros
Área de contribuição (km ²)	2611.5	736.34	756.46	4920.4	6564.01

Tabela 2 Valores dos coeficientes de eficiência para as estações fluviométricas inseridas na Bacia do rio Una e o procedimento definido para cada período

Estação	Período	Procedimento	R ²	Nash	ΔV
Capivara	2000 a 2001	Calibração	0.294	-0.111	-5.146
	2003 a 2005	Verificação	0.816	0.678	-27.691
Catende	2003 a 2005	Verificação	0.832	0.759	-0.228
	2006 a 2008	Calibração	0.643	0.632	-3.966
Jacuípe	2000 a 2002	Calibração	0.522	0.059	-0.773
	2003 a 2006	Verificação	0.492	0.337	-10.442
Palmares	2000 a 2002	Calibração	0.690	0.674	-22.718
	2003 a 2005	Verificação	0.594	0.547	-31.887
	2006 a 2008		0.515	0.404	-25.025
Barreiros	2003 a 2005	Calibração	0.670	0.622	4.217
	2006 a 2008	Verificação	0.378	0.296	0.215

Os valores de coeficientes de eficiência para as estações apresentam-se bastante variados e desempenham seu papel em analisar conforme suas finalidades os resultados da simulação. Contudo, o objetivo específico deste trabalho é o de verificar se MODHAC seria apto em responder a eventos extremos – sem necessariamente comprometer todo o período com maus resultados. Assim, para promover uma melhor percepção dos resultados dos coeficientes de eficiência, os hidrogramas das estações de Capivara, Palmares e Barreiros serão mais bem discutidos, pois localizam-se na calha principal do rio Una e estão próximas das principais cidades da bacia.

A estação de Capivara apresenta sua área de contribuição completamente inserida no semiárido e sobre a geologia do cristalino, de tal modo que o rio Una possui regime intermitente nesta região. Com isto, o processo de auto-calibração buscava equiparação dos eventos de vazão nula, comprometendo a equidade dos eventos de pico. Por este motivo o período de calibração limitou-se ao ano 2000 a 2001.

O hidrograma para o período de calibração na estação de Capivara é exposto na figura 3.

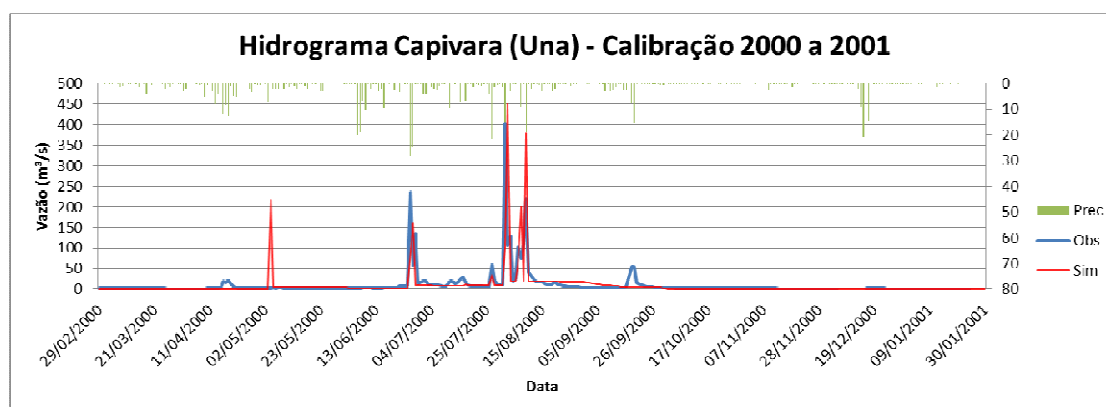


Figura 3 Hidrograma das vazões observadas e simuladas para a estação fluviométrica de Capivara, no período de calibração.

Na figura 3, percebe-se um atraso dos picos simulados. A tabela 3 apresenta os dados quantitativos dos principais picos, que causaram desastres, do ano 2000, para a estação de Capivara.

Tabela 3 Exposição dos valores de precipitação e dos picos observados e simulados para a estação fluviométrica de Capivara.

Data	Prec. (mm)	Qobs (m ³ /s)	Qsim (m ³ /s)
30/07/2000	0.03	8.89	10.22
31/07/2000	1.39	9.25	10.13
01/08/2000	23.22	403.75	101.77
02/08/2000	46.04	105.67	451.15
03/08/2000	3.17	129.31	20.13
04/08/2000	0.19	19.16	19.95
05/08/2000	0.06	24.12	19.80
06/08/2000	11.85	101.50	60.72
07/08/2000	9.45	75.81	200.40
08/08/2000	0.06	109.93	20.04
09/08/2000	18.81	220.04	379.85
10/08/2000	0.07	41.41	20.04

A resposta da vazão observada para os valores de precipitação, também obtidos de dados observados, aparenta não estar em conformidade. Assim, os resultados do MODHAC para os eventos de precipitação, nos dias a que foram atribuídos, não respondem com harmonia aos observados, indicando falhas quanto à aquisição dos dados de chuva. Contudo, os resultados ainda indicam um nível satisfatório no sentido de que, diante de bons dados de previsão de precipitação, o modelo responderia apontando a necessidade da situação de alerta perante o risco de enchente.

Na figura 3, é possível observar um pico simulado diante de uma chuva de aproximadamente 70mm, em que não houve registro algum de vazão observada. Trata-se de um evento bastante importante, uma vez que leva ao questionamento da confiabilidade dos dados para aquisição da precipitação média e mesmo de vazão observada.

A verificação dos parâmetros ajustados para a estação de Capivara mostra-se bastante satisfatório, conforme os valores dos coeficientes de eficiência na tabela 2, e o hidrograma, figura 4 e o gráfico de dispersão, figura 5.

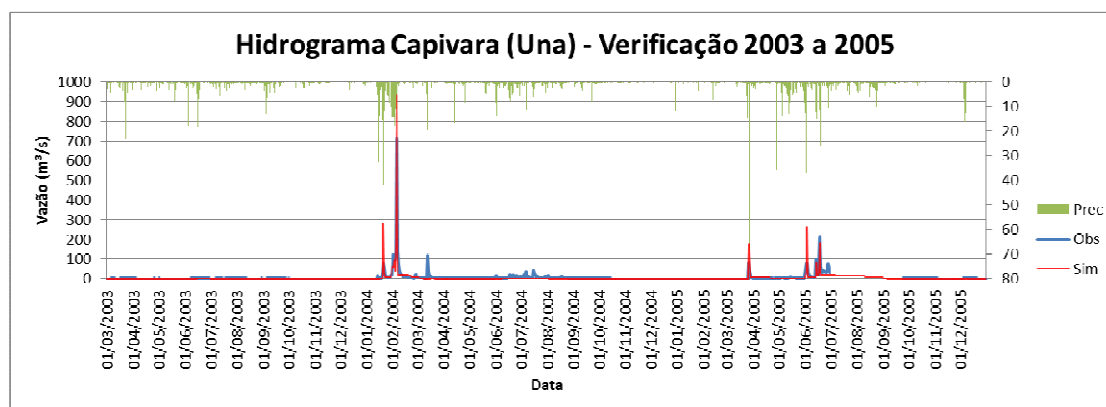


Figura 4 Hidrograma das vazões para o período de verificação entre 2006 a 2008

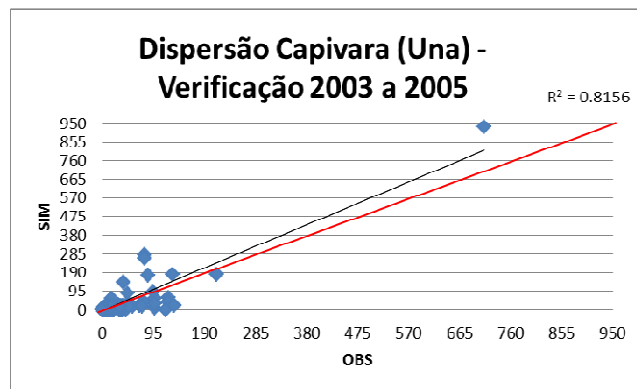


Figura 5 Gráfico de dispersão das vazões para o período entre 2003 a 2005

Uma observação cautelosa do hidrograma da figura 5 permite constatar que o MODHAC superestimou em 200 m³/s uma vazão observada de 700 m³/s, diante de um evento de precipitação de 35 mm, e dias antecedentes de eventos na ordem de 15 mm. No dia 27/03/2005, um evento de chuva de 68 mm originou uma vazão de 84,39 m³/s, em que o modelo estimou 176 m³/s – conforme figura 4. São resultados satisfatórios, considerando o empirismo e a conseqüente limitação do modelo.

A estação fluviométrica de Palmares possui uma elevada importância por estar localizada na cidade que leva o mesmo nome e apresenta um longo histórico de desastres devido a enchentes. Apresenta-se nas figuras 6 e 7 o resultado da calibração da estação.

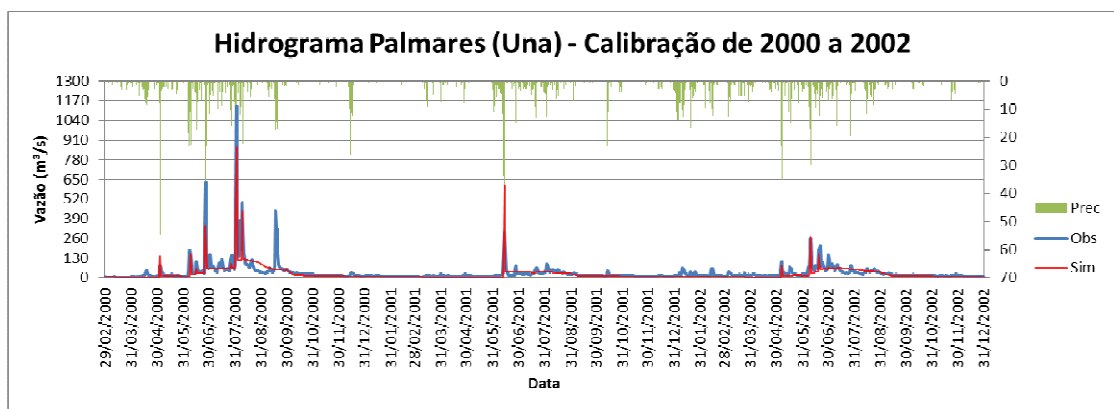


Figura 6 Hidrograma das vazões observadas e simuladas para a estação fluviométrica de Palmares, no período de calibração.

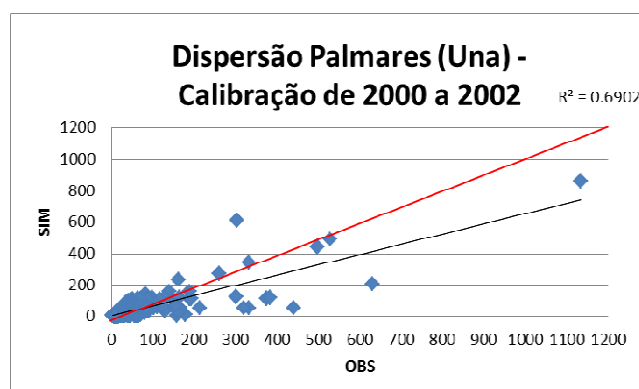


Figura 7 Gráfico de dispersão das vazões observadas e simuladas para a estação de Palmares.

Conforme a figura 7, o modelo, de um modo geral, subestimou vazões observadas em uma faixa de valor entre 300 a 600 m³/s. Nesta mesma figura, observam-se dois pontos, cujos pares de dados estão sob a linha de igual valor. No mês de Junho de 2000, o modelo não foi capaz de acompanhar a resposta da vazão que se acentuava conforme a tabela 4.

Tabela 4 Exposição dos valores de precipitação e dos picos observados e simulados para a estação fluviométrica de Palmares

Data	Prec (mm)	Qobs (m ³ /s)	Qsim (m ³ /s)
23/06/2000	0.12	44.88	30.47
24/06/2000	0.24	44.19	30.35
25/06/2000	1.45	29.78	30.30
26/06/2000	41.2	332.01	346.08
27/06/2000	23.25	630.03	206.27
28/06/2000	1.13	164.98	59.00
29/06/2000	0.14	82.80	58.60
30/06/2000	1.02	62.42	58.15
01/07/2000	11.56	93.11	60.02
02/07/2000	5.03	153.99	61.16

A tabela 4 permite verificar a consonância da simulação para o dia 26/06/2000 e como o modelo não foi eficiente em responder para o dia 27/06/2000. Ou seja, a precipitação de 23.25mm, do dia 27/06/2000, resultou em uma lâmina escoada simulada de 3.62mm, uma subestimava aquém do esperado pelo modelo – haja vista a baixa consideração quanto às condições de umidade antecedentes do solo, que uma vez saturado deveria prover mais escoamento superficial e a consequente maior vazão. Contudo, é preciso salientar o pico de cheia observada, do dia 02/08/2000, que atingiu 1134 m³/s, no qual a simulação resultou em 800 – conforme figura 6. Esta subestimativa em muito pouco influenciaria a qualidade do resultado obtido, uma vez que o objetivo da presente modelagem é o de se prover mecanismos para que se trabalhe com previsão proporcionando a emissão do alerta para a população. Ou seja, tal subesmativa não afetaria a qualidade do hipotético alerta emitido, sendo por este motivo um resultado satisfatório.

A verificação dos parâmetros ajustados forneceu resultados bastante discrepantes sob a análise dos hidrogramas. O período de 2003 a 2005 ocasionou cheias com vazões entre 500 a 650m³/s, enquanto que o período de 2006 a 2008 a vazão máxima registrada foi de 230m³/s. Diante disto, os parâmetros previamente ajustados para a previsão de altas vazões, do período entre 2000 a 2002, tenderam a subestimar as vazões dos outros dois períodos. As figuras 8 a 11 ilustram os hidrogramas e gráficos de dispersão do período de verificação.

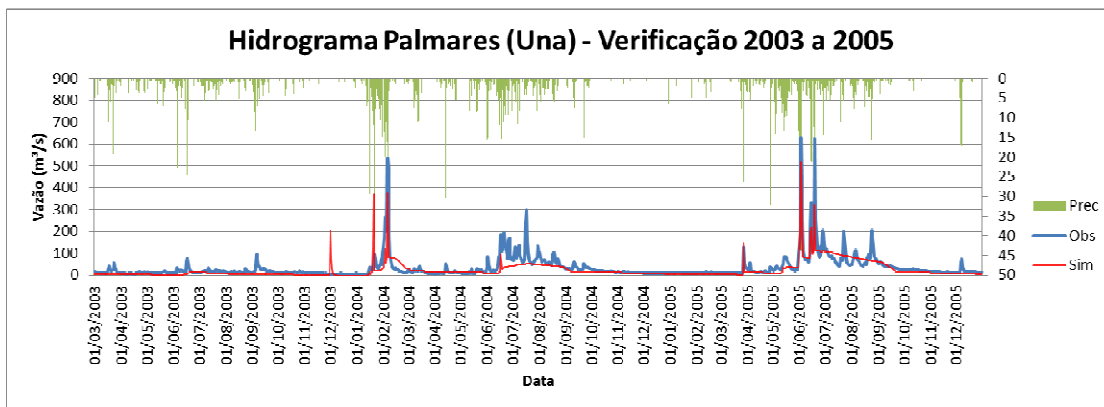


Figura 8 Hidrograma das vazões para o período de verificação entre 2003 a 2005

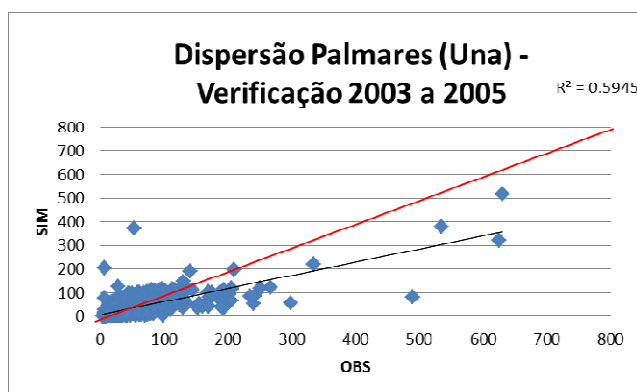


Figura 9 Gráfico de dispersão das vazões para o período entre 2003 a 2005

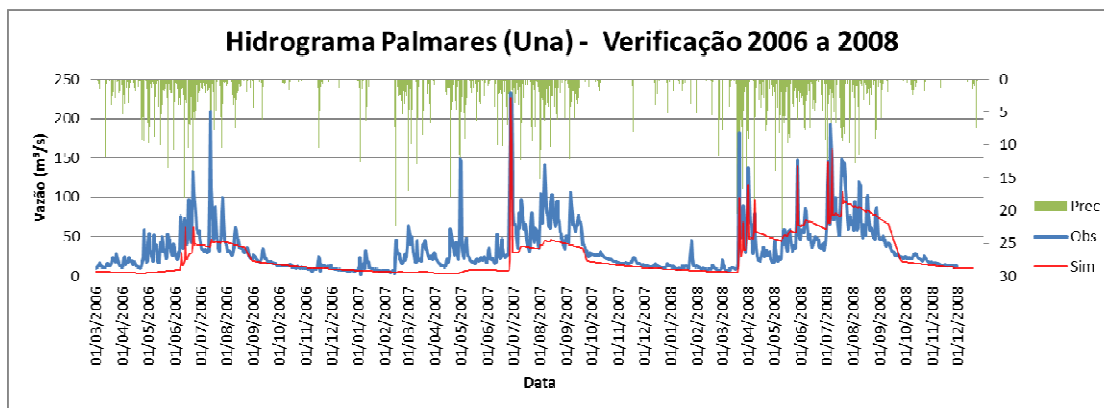


Figura 10 Hidrograma das vazões para o período de verificação entre 2006 a 2008

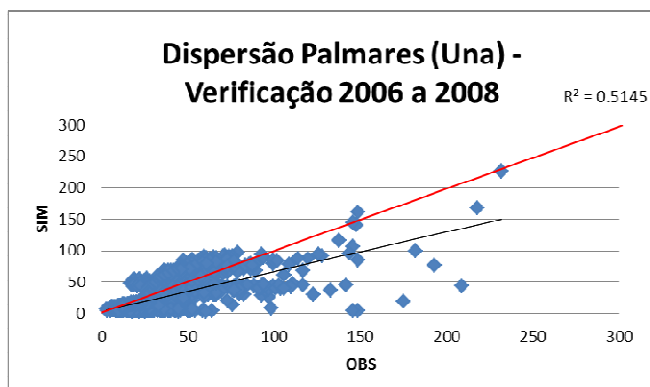


Figura 11 Gráfico de dispersão das vazões para o período entre 2006 a 2008

O hidrograma referente ao período de 2003 a 2005, representado na figura 8 mostra como o modelo mostrou-se pouco sensível a vazões médias – entre Junho a Outubro de 2004. Apresentando, inclusive, uma tendência já mencionada em subestimar alguns picos. A tabela 5 exibe os dados quantitativos.

Tabela 5 Exposição dos valores de precipitação e dos picos observados e simulados para a estação fluviométrica de Palmares

Data	Prec (mm)	Qobs (m³/s)	Qsim (m³/s)
29/05/2005	3.13	22.61	35.31
30/05/2005	13.41	35.48	35.08
31/05/2005	13.62	94.99	38.90
01/06/2005	22.57	139.98	188.44
02/06/2005	16.71	205.02	117.37
03/06/2005	44.1	630.03	516.47
04/06/2005	1.1	241.98	83.66
05/06/2005	3.39	110.03	82.86
06/06/2005	1.86	89.58	82.18
07/06/2005	1.04	70.39	81.44

É possível verificar que a simulação subestimou, inicialmente no dia 31/05/2005, a ascensão do hidrograma observado e, por consequência, apresentou a curva de recessão antecipada, no dia 04/06/2005. O ponto fundamental é a percepção da previsão da ocorrência de uma vazão que ocasione enchentes, e o MODHAC apresentou este ponto superestimando o dado observado no dia 01/06/2005. Isto é dito, pois a ocorrência efetiva do desastre se deu no dia 03/06/2005, no qual a vazão simulada foi capaz de responder bem – mesmo subestimando.

As figuras 10 e 11, do período de verificação de 2006 a 2008, denotam como os parâmetros ajustados não responderam bem a baixas vazões. Sendo este fato já esperado diante do empirismo do modelo. Importante ressaltar que entre 2006 e 2008 não foram registrados desastres no que diz respeito a enchentes, de tal modo que vazões de até 250m³/s estão dentro de um limiar seguro.

A simulação do modelo para a estação fluviométrica de Barreiros, localizada mais a jusante, apresentou resultados satisfatórios. O hidrograma das vazões, figura 12, indica uma aparente tendência do modelo em superestimar, contudo a observação do gráfico de dispersão, figura 13, indica que houve maior fração de vazão simulada subestimada. Exceção é dada a um evento singular, no qual o modelo estimou em dobro a vazão observada.

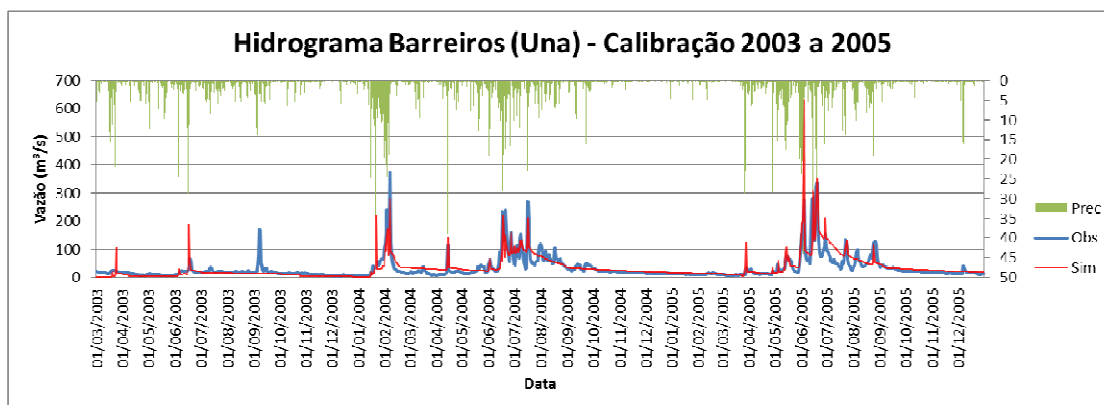


Figura 12 Hidrograma das vazões observadas e simuladas para a estação fluviométrica de Barreiros, no período de calibração.

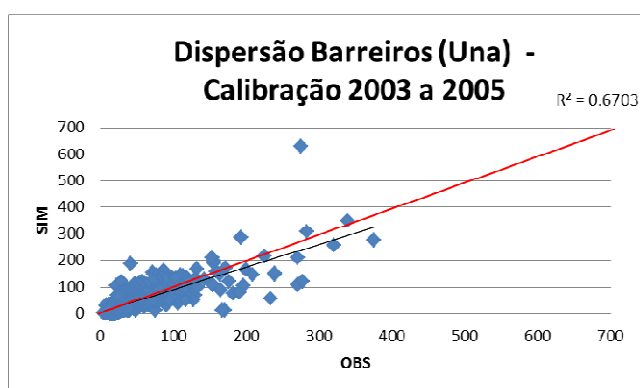


Figura 13 Gráfico de dispersão das vazões observadas e simuladas para a estação de Barreiros.

A tabela 6 expõe os dados quantitativos, e enaltecem o tempo de resposta da bacia de um (1) dia, no qual a precipitação do dia 03/06/2005 originou a vazão do dia seguinte – que em muito superestimou o dado observado.

Tabela 6 Exposição dos valores de precipitação e dos picos observados e simulados para a estação fluviométrica de Palmares

Data	Prec (mm)	Qobs (m³/s)	Qsim (m³/s)
31/05/2005	17.01	80.831	89.109
01/06/2005	23.86	105.435	125.881
02/06/2005	20.5	155.139	192.255
03/06/2005	43.96	155.139	198.206
04/06/2005	1.08	275.642	630.474
05/06/2005	4.35	115.467	94.258

Por fim, é possível expor as figuras 14 e 15 que tratam do hidrograma e do gráfico de dispersão, respectivamente, do período de verificação da estação de Barreiros.

A figura 14 permite observar falhas expressivas nos dados observados entre Julho a Setembro, além de Dezembro, de 2008, enaltecendo o período entre 2003 a 2005 como o de calibração. Os resultados mostram que o modelo variou bastante, com vários eventos subestimando e outros superestimando – conforme a figura 15. Estes resultados denotam atenção, de que, ao menos nesta estação, o modelo precisa ser mais bem trabalhado e estudado - porém a falta de dados é um problema recorrente.

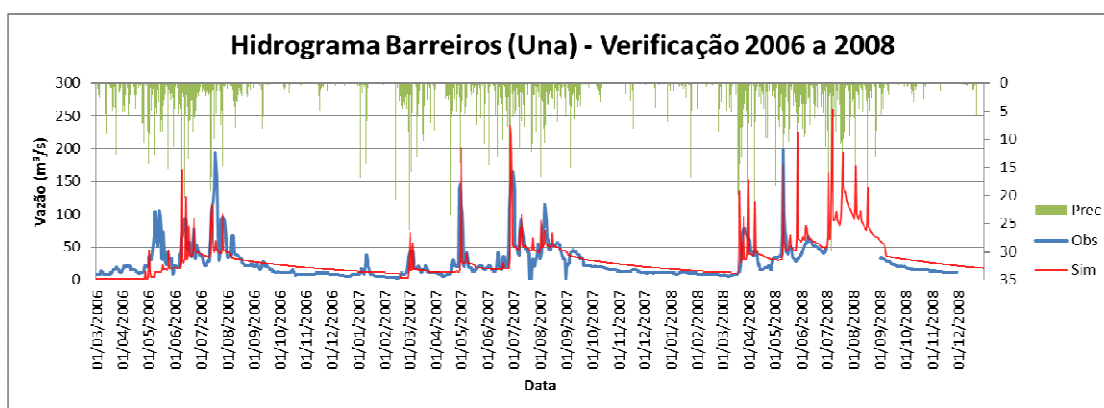


Figura 14 Hidrograma das vazões para o período de verificação entre 2006 a 2008

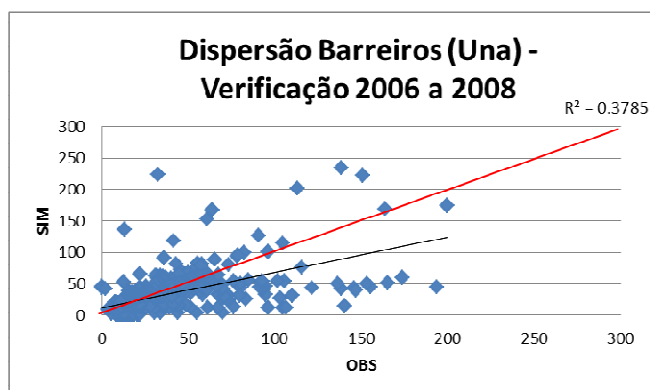


Figura 15 Gráfico de dispersão das vazões para o período entre 2006 a 2008

No geral, as simulações na bacia do Una são satisfatórias. O trabalho perante cinco estações fluviométricas favorecem a soma e complementação dos resultados, uma vez que mesmo as simulações nas estações de Catende e Jacuípe apresentaram bons resultados. Esta observação é pertinente mesmo diante da característica do MODHAC de ser concentrado, ou seja, considerando uma média para representar toda a área de estudo, uma vez que o presente estudo buscou aplicar o modelo nas estações fluviométricas mais significativas.

Os dados de precipitação média originaram, em determinados momentos, questionamentos pertinentes quanto a sua confiabilidade. Tal fato acarreta em uma necessidade de análise particular dos dados dos postos pluviométricos utilizados para a definição da precipitação diária média.

Em resumo, é possível manter diversas simulações, de várias sub-bacias de acordo com as estações fluviométricas disponíveis, e prover um resultado consistente sob uma análise cuidadosa.

CONCLUSÃO

A busca por um modelo que proporcione suporte junto ao sistema de alerta, quanto à ocorrência de enchentes, iniciou-se com o presente trabalho, ao realizar simulações com o MODHAC. Os resultados obtidos encorajam o prosseguimento com o passo seguinte da operacionalização, no qual acontecerá de forma automática a alimentação dos dados de entrada, precipitação e evapotranspiração, bem como a devida execução do modelo utilizando os parâmetros ajustados.

A operacionalização está sendo efetuada ainda sob os moldes de testes no Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), utilizando ferramentas de software livre que convirjam para a geração de gráficos diários, das áreas em estudo, com os dados da previsão da chuva.

Resultados obtidos pela execução do MODHAC nas cinco sub-bacias foram satisfatórios. A representação das vazões para a estação fluviométrica de Capivara superou as expectativas, com

uma alta concordância das vazões mínimas e dos picos – indicando uma boa adaptação do modelo a rios intermitentes. Apesar de terem aproximadamente o mesmo tamanho, os resultados obtidos para a estação fluviométrica de Catende foram melhores que aqueles da estação de Jacuípe. Isto pode ser indicado devido qualidade dos dados de entrada, em especial os de precipitação traduzidos pelo valor médio. O mesmo pode ser indicado diante das estações fluviométricas de Palmares e Barreiros, na qual a primeira apresentou resultados melhores que segunda. É possível que a aquisição de dados médios de precipitação favoreça a erros que se reflitam nos resultados da simulação. Diante da pouca exigência de caracterização da área, por parte do modelo, identificações mais detalhadas quanto ao uso e ocupação do solo não foram realizadas, de tal modo que há diversos fatores que podem influenciar bastante o regime hidrológico e estes não estarem sendo devidamente traduzidos na modelagem, a exemplo da mancha urbana.

Apesar dos resultados satisfatórios encontrados com o MODAHC, trabalhos futuros, com o estudo de outros modelos hidrológicos, aplicados às mesmas bacias, serão efetuados de modo a adquirir a segurança necessária quanto às eventualidades da natureza. Isto deve ser feito como forma de amadurecer o conhecimento quanto à resposta de diversos modelos aplicados à mesma área, de tal modo que se torne possível analisar as limitações de um e as vantagens de outro modelo hidrológico, fornecendo a confiança necessária em um trabalho de previsão e alerta de desastres naturais ocasionados por enchentes.

BIBLIOGRAFIA

- Oliveira, G. C.; Saldanha, D. L.; Guasseli, L. A. (2010). *“Espacialização e análises das inundações na bacia hidrográfica do rio Cai/RS”*. São Paulo. Geociências. V. 29. n. 3. pp. 413 – 427.
- Filho, J. S. V.; Lanna, A. E. L. (1999). MODHAC – *“Manual do Usuário”*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 26p.
- Lanna, A. E. (1999). MODHAC – *“Modelo Hidrológico Auto-Calibrável”*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. P58.
- Pernambuco (2006). *“Bacia Hidrográfica do Rio Una, GL4 e GI 5”*. SEPLAN, Recife, 84p.
- Pernambuco (2011). *“Relatório de Monitoramento da Qualidade da Água de Bacias Hidrográficas do Estado de Pernambuco em 2010”*. Agência Estadual de Meio Ambiente, Recife, 100p.
- Tucci, C. E. M.; Clarke, R. T.; Dias, P. L. S.; Collischon, W. (2002). *“Previsão de Médio prazo da influência de reservatórios com base na previsão climática”*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 122p.
- Tucci, C. E. M. (2005). *“Modelos Hidrológicos”*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 2ª ed. Porto Alegre, 678p.