

Influência do Modelo Hidrológico na Avaliação da Sensibilidade dos Recursos Hídricos a Cenários de Mudanças Climáticas em Região Semiárida

Rodrigo Dutra Escarião

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis/PB

rdescariao@gmail.com

Suzana Maria Gico Lima Montenegro, José Roberto Gonçalves de Azevedo, Alfredo Ribeiro Neto

Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Hidráulica/UFPE

Recebido: 30/08/10 - revisado: 14/09/11 - aceito: 03/03/12

RESUMO

O trabalho avalia a influência do modelo hidrológico nos desflúvios superficiais de uma bacia hidrográfica da região semiárida do Brasil, quando aplicado a cenários de mudanças climáticas. Os cenários foram construídos considerando variações de 1°C a 4°C nos dados de temperatura, as quais foram refletidas nos dados de evapotranspiração potencial, e alterações variando de -20% a +20% nos dados históricos de precipitação pluviométrica, formando conjuntos de dados de entrada para os modelos utilizados. O estudo foi aplicado na bacia hidrográfica do rio Piancó, localizada integralmente em região semiárida do Nordeste brasileiro. São quatro os modelos utilizados nesse trabalho: um modelo hidrológico empírico-estatístico, um modelo hidrológico conceitual concentrado, um modelo hidrológico conceitual distribuído e um modelo em rede neural artificial. Os resultados mostram que os modelos utilizados têm capacidade de reproduzir de forma satisfatória a série histórica de vazão e que claramente há diferenças nas vazões simuladas pelos modelos, tanto em nível anual quanto em nível mensal, demonstrando que o modelo hidrológico utilizado no estudo da resposta hidrológica a variações climáticas influencia diretamente os resultados.

Palavras-chave: modelagem hidrológica; aquecimento global; região semiárida.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, devido ao efeito estufa, podem causar efeitos ambientais adversos, traduzidos em aumento de temperatura; mudança no regime hidrológico, com aumento de precipitações em algumas regiões e diminuição em outras, além de intensificarem as variações temporais e espaciais das chuvas; alteração na evapotranspiração de regiões; e outros efeitos como elevação do nível médio do mar, favorecimento de queimadas e perda de biomassas (IPCC, 2007 e Bates *et al.*, 2008).

A avaliação de impactos de mudanças do clima sobre os recursos hídricos de uma bacia hidrográfica ou região pode ser realizada a partir das simulações dos próprios modelos climáticos (Milly *et al.*, 2005 e UK Met Office, 2005) ou utilizando-se a precipitação e a temperatura do ar calculados por esses modelos como dado de entrada em modelos hidrológicos (Vicuna *et al.*, 2007, Maurer *et al.*, 2009).

Para se avaliarem os efeitos causados pelo efeito estufa, traduzidos na forma de aumento global de temperatura e variação na precipitação, sobre os recursos hídricos de uma dada região, é necessário o acoplamento de modelos climáticos globais (GCM) com modelos hidrológicos. Nesse caso, os primeiros fornecem previsões de alterações no regime climático e os segundos refletem essas alterações na forma de alterações nos escoamentos, via transformação chuva-vazão.

Entretanto, observa-se na literatura especializada que existem significativas diferenças nos resultados fornecidos por diferentes modelos climáticos globais, quando aplicados a um mesmo caso. Essas diferenças dão-se, entre outros motivos, pela limitação ainda existente de tais modelos e metodologias na modelagem matemática de fenômenos naturais complexos, como os observados na atmosfera terrestre, com grande interação entre elementos físicos (Prudhomme, 2003).

Por essa razão, diante das incertezas e das dificuldades de se prever com segurança o cenário futuro decorrente de mudanças climáticas, ainda é

satisfatório estudar os impactos causados com base em vários cenários sintéticos de mudança climática, buscando-se a compreensão dos mecanismos hidroclimatológicos de uma dada bacia hidrográfica (Jiang *et al.*, 2007).

Além da variação dos resultados de previsão de mudança climática decorrentes da adoção de um ou outro modelo climático global, há uma segunda fonte de incerteza a ser considerada: a definição do modelo hidrológico ou da técnica matemática de transformação de chuva em vazão. O resultado do modelo hidrológico será utilizado na avaliação dos impactos sobre os escoamentos decorrentes dos cenários de mudança climática na escala da bacia hidrográfica.

O objetivo do trabalho é avaliar a influência do modelo hidrológico ou da técnica matemática de transformação de chuva em vazão utilizados no estudo da resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica da região semiárida do Brasil, em nível anual e mensal, quando aplicados a cenários sintéticos de mudanças climáticas.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Rio Piancó, com área de 9.205 km², é a principal sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu, que possui nascente no alto sertão paraibano, estendendo-se por esse Estado e pelo Rio Grande do Norte, onde deságua no oceano Atlântico (Figura 1).

A bacia do rio Piancó apresenta-se como uma bacia hidrográfica típica do clima semiárido, possuindo todas as características físicas e hidroclimatológicas representativas do semiárido do Nordeste brasileiro. Além disso, possui grande importância em termos de abastecimento de água para o sertão paraibano.

A bacia caracteriza-se pela predominância de solo Litólico Eutrófico, com textura arenosa e pedregoso, pouco profundo (menos de 2 metros) e ocupando cerca de 68% da área da bacia (SEPLAN/PB, 1997). A vegetação nativa é do tipo xerófita, pertencente ao bioma caatinga.

DADOS HIDROCLIMATOLÓGICOS

A bacia do rio Piancó possui pluviometria média em torno de 800 mm anuais, sendo caracteri-

zada por intensa variabilidade espacial e temporal ao longo do ano hidrológico.

Os eventos de precipitação se dão praticamente nos primeiros seis meses do ano, sendo que o período mais intenso se dá entre os meses de fevereiro e abril, com pico no mês de março.

Com relação aos postos pluviométricos, existem 66 postos disponíveis para análise na bacia do rio Piancó e na sua vizinhança. Foram realizadas análise de consistência dos dados e preenchimento de falhas de observação (método do vetor regional) e cálculo de séries de precipitação média mensal (método de Thiessen) para o período de 1962 a 1990. Do total de postos pluviométricos da bacia, foram utilizados 22 postos para o cálculo da precipitação média na área de estudo.

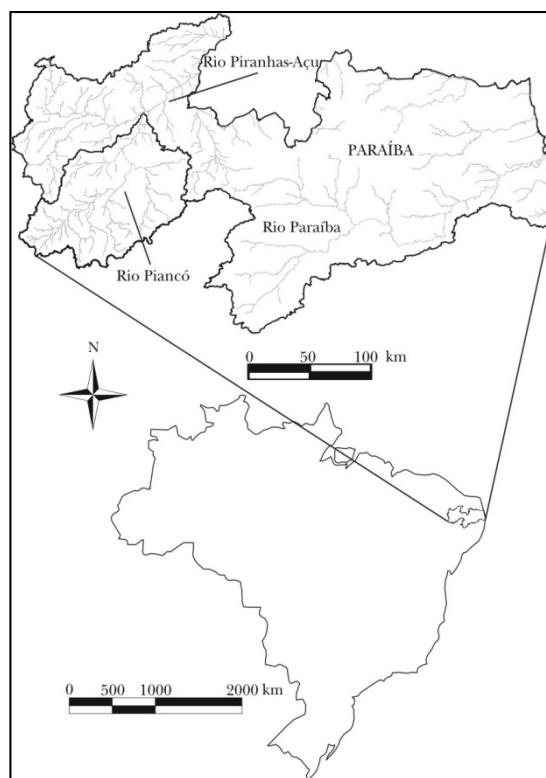


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Piancó.

Para a calibração dos modelos, foi utilizada a série de vazões do posto fluviométrico Piancó (Código ANA 37340000). Esse posto possui área de drenagem de 4.554 km², localiza-se a montante do açude Curema e possui dados consistidos a partir de 1963. Todas as simulações com os modelos e os resultados obtidos referem-se à área de drenagem até o posto Piancó conforme mostrado na Figura 2.

A série de evapotranspiração potencial foi determinada utilizando-se o método de Hargreaves, aplicado com dados de temperatura e umidade relativa do ar mensais registrados na Estação Meteorológica de Observação de Superfície Convencional São Gonçalo (código INMET 82689) correspondente ao período de janeiro de 1961 a dezembro de 1990. O método de Hargreaves foi desenvolvido especificamente no Nordeste Brasileiro para cálculo da evapotranspiração potencial, apresentando a seguinte formulação (Cunha e Millo, 1984):

$$ETP = MF.(32 + 1,8.T).CH \quad (1)$$

$$CH = 0,158.(100 - U)^{0,5} \quad (2)$$

Em que,

ETP = evapotranspiração potencial (mm/mês);

MF = fator de evapotranspiração potencial (mm/mês);

T = temperatura média mensal ($^{\circ}$ C);

CH = coeficiente em função da umidade relativa do ar;

U = umidade relativa do ar (%).

O fator de evapotranspiração potencial é função da latitude e do mês considerado, podendo ser encontrado em forma de tabela em Cunha e Millo (1984).

A Figura 2 mostra as estações pluviométricas, fluviométrica e climatológica utilizadas nas simulações, assim como a área de drenagem correspondente à estação Piancó.

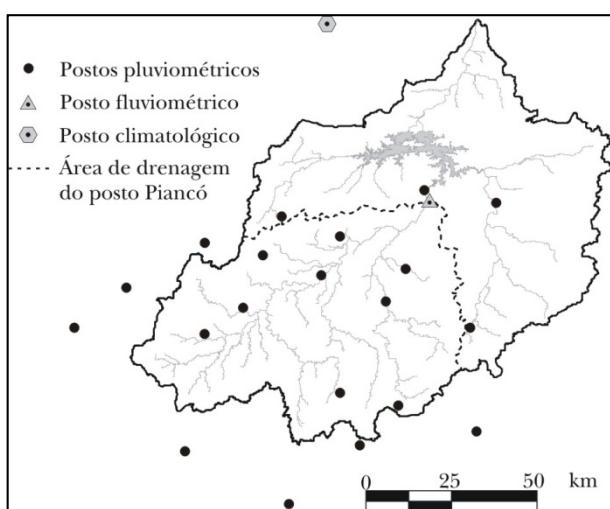


Figura 2 – Postos hidroclimatológicos na área de estudo.

MODELOS HIDROLÓGICOS

Diversos autores têm se dedicado ao estudo de comparação entre modelos hidrológicos, buscando analisar a capacidade desses modelos em representar os fenômenos hidrológicos de transformação de chuva em vazão. De maneira geral, esses estudos se desenvolvem seguindo o padrão de selecionar alguns modelos, aplicá-los em uma ou mais bacias hidrográficas, realizando as fases de calibração e validação. Como exemplo, pode-se citar os trabalhos de Franchini e Pacciani (1991), Refsgaard e Knudsen (1996), Perrin *et al.* (2001), Johnson *et al.* (2003) e Cooper *et al.* (2007).

No trabalho de Jiang *et al.* (2007), é realizada uma comparação dos resultados da aplicação de seis modelos hidrológicos conceituais concentrados, quando aplicados a cenários de previsão de mudanças climáticas na bacia Dongjiang na China, em região de clima subtropical úmido. Os resultados foram avaliados em termos de escoamentos hídricos, evapotranspiração e umidade do solo, sendo aferidas as diferenças de previsão entre os modelos, as quais os autores consideraram significativas.

Maurer *et al.* (2009) realizaram a comparação das mudanças previstas para vazões de três rios da Sierra Nevada, Califórnia, utilizando *downscaling* estatístico sobre os dados de 22 projeções climáticas globais. Os dados foram utilizados para simular dois modelos hidrológicos: o modelo *Sacramento Soil Moisture Accounting* (SacSMA) e o modelo de capacidade de infiltração variável (VIC). Os dois modelos diferem na sua resolução espacial, passo de tempo computacional, e no grau e objetivo da calibração, produzindo, assim, simulações significativamente diferentes dos fluxos atuais e futuros. Os autores concluem que para fluxos baixos, a seleção do modelo hidrológico torna-se um fator importante na avaliação dos impactos das alterações climáticas previstas.

Para este trabalho, alguns critérios foram determinantes na definição dos modelos hidrológicos escolhidos: o número de parâmetros não deve ser excessivo (parcimônia); os parâmetros, na medida do possível, devem ter relação física com os processos que representam; facilidade de uso; e disponibilidade dos dados requeridos para a região do estudo.

Da avaliação, foram selecionados o modelo empírico-estatístico SFMODEL (Azevedo, 1999), o modelo conceitual concentrado GRH (GRH/UFPE, 1999), o modelo conceitual distribuído de base física MIKE SHE (DHI, 2001) e a rede neural artificial

do tipo Perceptron Multicamadas (Valença e Ludermir, 1999).

Em sua versão original, o modelo hidrológico empírico-estatístico SFMODEL relaciona, por meio de equação de regressão linear múltipla, a vazão do rio com a precipitação e a temperatura, considerando cenários de mudanças climáticas. No presente trabalho, o modelo sofreu pequena modificação, de forma a relacionar a vazão média mensal com os dados de precipitação e evapotranspiração potencial.

O GRH é um modelo de simulação hidrológica mensal do tipo conceitual, caracterizando-se pela combinação de dois reservatórios lineares e funções de transferência. O modelo possui estrutura semelhante ao modelo SMAP (Lopes *et al.*, 1982), porém com modificações e adaptações que o tornam mais adequado para a aplicação em regiões semiáridas. A separação do escoamento superficial é feita por meio de uma equação não-linear em função da precipitação. O balanço de umidade do solo é realizado utilizando-se dois reservatórios que representam, respectivamente, as zonas não-saturada e saturada do solo, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada passo da simulação.

O MIKE SHE é um modelo hidrológico conceitual, determinístico, distribuído e de base física adaptado do código original do SHE – *Système Hydrologique Européen* (Abbott *et al.*, 1986). O modelo simula as seguintes fases do ciclo hidrológico terrestre: interceptação, infiltração, evapotranspiração, fluxo subsuperficial na zona não-saturada, fluxo subterrâneo na zona saturada, fluxo superficial e fluxo nos canais.

A rede neural artificial do tipo Perceptron Multicamadas é reconhecida por seu poder de funcionar como aproximador universal de funções lineares e não-lineares. Para sua implementação, é necessário definir duas características da rede: a arquitetura e a função de ativação dos neurônios.

CENÁRIOS DE MUDANÇAS DO CLIMA

Para a realização de estudos do comportamento futuro do clima global se faz necessária a previsão da evolução de determinados contextos e variáveis que influenciam direta ou indiretamente o comportamento desse clima. Tais contextos e variáveis são traduzidos em evolução do crescimento populacional, desenvolvimento econômico, desenvolvimento tecnológico, investimentos para o desenvolvimento de processos produtivos menos danosos

ao meio ambiente, evolução cultural, entre outros aspectos.

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) tem desenvolvido trabalhos com o objetivo de produzir e avaliar as informações científicas, técnicas e sócio-econômicas relevantes para a compreensão dos riscos de mudanças climáticas induzidas pelo homem. Um desses trabalhos é o Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (SRES) (IPCC, 2000). O relatório descreve o conjunto de cenários de emissões utilizado no Terceiro e Quarto Relatórios de Avaliação do IPCC. Os cenários do SRES têm sido construídos para pesquisar futuros desenvolvimentos no meio ambiente global com especial referência à produção dos gases do efeito estufa e emissões de aerossóis.

Em geral, para a avaliação do impacto do efeito estufa sobre o clima, os cenários do IPCC são utilizados para a simulação dos GCM's. Alternativamente a essa metodologia, pode-se criar cenários a partir da geração de séries sintéticas de possíveis mudanças climáticas devido ao efeito estufa conforme proposto por Azevedo (1999) e Jiang *et al.* (2007). Essa metodologia possui as seguintes etapas:

- Variação de temperatura ($T_{Variação}$): +1°C a +4 °C com passo unitário;
- Variação de precipitação ($P_{Variação}$): -20% a +20% com passo de 10%.

Geração de séries sintéticas mensais de T e P (mudança climática) por meio das seguintes equações:

$$T_{Gerada} = T_{Histórica} + T_{Variação} \quad (3)$$

$$P_{Gerada} = P_{Histórica} \cdot (1 + P_{Variação}/100) \quad (4)$$

Em que,

T_{Gerada} = temperatura mensal gerada;

$T_{Histórica}$ = temperatura mensal histórica;

$T_{Variação}$ = variação de temperatura;

P_{Gerada} = precipitação mensal gerada;

$P_{Histórica}$ = precipitação mensal histórica;

$P_{Variação}$ = variação de precipitação.

A utilização dessa metodologia é justificada em razão de estar em consonância com as amplitudes de variação de precipitação e de temperatura estimadas para regiões do Nordeste Brasileiro e apresentadas nos trabalhos de INPE (2007), Souza Filho (2003) e Azevedo (1999).

As séries sintéticas de evapotranspiração potencial necessárias como dados de entrada para os modelos hidrológicos foram geradas com o método de Hargreaves citado na seção anterior, utilizando-se também as séries sintéticas de temperatura, contemplando assim, os efeitos provenientes da mudança climática também nessa variável.

De posse das cinco séries sintéticas de precipitação média mensal e das quatro séries sintéticas de evapotranspiração potencial média mensal, é possível definir 20 cenários sintéticos de mudanças climáticas na região.

A Tabela 1 apresenta a interação entre as séries sintéticas e a construção dos cenários de mudanças climáticas.

Tabela 1 – Cenários sintéticos de mudanças climáticas.

Precipitação	Temperatura			
	+1 °C	+2 °C	+3 °C	+4 °C
-20%	C _{-20;+1}	C _{-20;+2}	C _{-20;+3}	C _{-20;+4}
-10%	C _{-10;+1}	C _{-10;+2}	C _{-10;+3}	C _{-10;+4}
0	C _{0;+1}	C _{0;+2}	C _{0;+3}	C _{0;+4}
+10%	C _{+10;+1}	C _{+10;+2}	C _{+10;+3}	C _{+10;+4}
+20%	C _{+20;+1}	C _{+20;+2}	C _{+20;+3}	C _{+20;+4}

Nas simulações com os modelos hidrológicos, utilizou-se o período de 1964 a 1990 (denominado de base). Uma vez que o IPCC utiliza período base semelhante (1961 – 1990) em seus diversos estudos e relatórios, percebe-se que os resultados alcançados no presente trabalho poderão ser comparados aos resultados das previsões do IPCC, pois dizem respeito, praticamente, ao mesmo período, o que em tese deve abordar dados com as mesmas características hidroclimatológicas.

SIMULAÇÕES COM OS MODELOS

A calibração e a validação dos modelos hidrológicos foram realizadas com os dados hidrológicos das séries históricas, sem levar em consideração as mudanças climáticas devido ao efeito estufa. Foram definidos critérios utilizados como auxílio para demonstrar a qualidade dos ajustes dos modelos aos dados históricos.

Coeficiente de correlação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Qo_i - \bar{Qo})(Qc_i - \bar{Qc})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Qo_i - \bar{Qo})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Qc_i - \bar{Qc})^2}} \quad (5)$$

Coeficiente de Nash-Sutcliffe:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qo_i - Qc_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qo_i - \bar{Qo})^2} \quad (6)$$

Erro médio quadrático:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Qo_i - Qc_i)^2}{n}} \quad (7)$$

Erro percentual no volume:

$$EV = \left| \frac{Vo - Vc}{Vo} \right| \cdot 100 \quad (8)$$

Em que,

Qo_i = vazão observada no mês i;

Qc_i = vazão calculada no mês i;

\bar{Qo} = vazão média observada;

\bar{Qc} = vazão média calculada;

Vo = volume total observado;

Vc = volume total calculado;

n = número de dados da série.

Os melhores ajustes de cada modelo determinados com base nos critérios definidos são utilizados na próxima etapa da pesquisa, ou seja, na geração de deflúvios com base nos cenários de mudanças climáticas.

Calibração e Validação dos Modelos

Os modelos SFMODEL, GRH, MIKE SHE e as Redes Neurais Artificiais (RNA) foram aplicados na bacia hidrográfica delimitada na estação fluviométrica Piancó, utilizando-se os dados de precipitação, evapotranspiração potencial e vazão, além de dados específicos de cada modelo, a exemplo do modelo numérico do terreno e dos dados de solo e cobertura vegetal necessários ao MIKE SHE.

As séries temporais disponíveis dessas variáveis foram divididas em dois sub-períodos: de janeiro de 1964 a dezembro de 1983, utilizado na etapa de calibração do modelo, e de janeiro de 1984 a dezembro de 1990, utilizado na etapa de validação.

Após alguns testes com diferentes funções de regressão para o modelo SFMODEL, chegou-se a

expressão da equação 9 que relaciona a vazão na seção da estação Piancó com a precipitação média na bacia e a evapotranspiração potencial.

$$Q = 6,361 + 0,001073.P(t)^2 - 0,000202.ETP(t)^2 \quad (9)$$

onde,

Q é a vazão em m^3/s ;

$P(t)$ é a precipitação média mensal no tempo “ t ”;

$ETP(t)$ é a evapotranspiração potencial mensal no tempo “ t ”.

O modelo GRH foi calibrado com vistas a obter conjuntos de parâmetros que melhor representassem o processo de transformação de chuva em vazão. Em se tratando de um modelo hidrológico conceitual, foi possível atribuir valores iniciais de alguns de seus parâmetros, com base na física do problema a ser modelado e em aplicações anteriores do modelo, a exemplo de SECTMA/PE (1998) e Lacerda Júnior *et al.* (2005).

O modelo MIKE SHE foi simulado com passo de tempo diário. A bacia foi discretizada em células em que se representam a topografia, tipo de solo e vegetação e onde são aplicadas as equações que representam os processos hidrológicos. Inicialmente, os valores dos parâmetros foram fixados exclusivamente considerando a base física do modelo, ou seja, fixados com base em valores referenciados na literatura. Posteriormente, fizeram-se ajustes nos valores dos parâmetros para melhor qualidade no ajuste dos hidrogramas.

A reprodução matemática da série histórica de vazão com dados de precipitação e evapotranspiração potencial, utilizando redes neurais artificiais fez uso de uma rede do tipo Perceptron. Após diferentes testes, adotou-se uma arquitetura 4 – 6 – 1 (um neurônio para precipitação, um neurônio para evapotranspiração potencial, um neurônio para função seno e um neurônio para função cosseno para representar a sazonalidade), seis neurônios na camada intermediária e um neurônio na camada de saída (para vazão) e função de ativação dos neurônios do tipo sigmoide como sendo a representante da rede neural artificial.

Para visualização da qualidade dos ajustes dos hidrogramas observado e calculado na calibração, apresentam-se nas Figuras 3 e 4, respectivamente, os hidrogramas do modelo de melhor (GRH) e pior desempenho (SFMODEL). A Tabela 2 reúne os parâmetros estatísticos obtidos na fase de calibração e validação dos modelos hidrológicos. De maneira geral, os dados da Tabela 2 demonstram haver certa

compatibilidade entre a qualidade dos parâmetros estatísticos obtidos entre os modelos utilizados.

Da análise, pode-se destacar que o modelo hidrológico GRH apresenta os melhores resultados em termos de qualidade de ajuste, tanto na fase de calibração quanto na validação. O modelo MIKE SHE apresentou resultados menos satisfatórios, provavelmente, devido a sua parametrização ser menos adaptada às características de bacias do semiárido se comparado ao GRH. O SFMODEL apresentou erro no volume na fase de calibração e validação superior aos demais modelos, mas também satisfatório considerando a natureza do modelo. O bom resultado obtido com a rede neural artificial demonstrou o poder de aproximação de funções que essa técnica possui.

Quando se analisam os dados da Tabela 2, associados à comparação visual dos hidrogramas gerados, pode-se observar que os modelos demonstram capacidade de reproduzir a série histórica de vazão média mensal de forma satisfatória, não deixando de ressaltar as limitações e incertezas inerentes aos processos de modelagem matemática e a natureza dos modelos utilizados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a calibração dos modelos, os parâmetros foram mantidos fixos para geração dos deflúvios decorrentes da simulação que tem como dado de entrada as séries de precipitação e evapotranspiração potencial construídas para cada um dos cenários sintéticos de mudanças climáticas apresentados na Tabela 1.

As mudanças no escoamento são calculadas percentualmente em relação aos valores da série de vazão gerada por cada modelo em nível anual (vazão média anual de longo termo) e em nível mensal (vazão média mensal de longo termo) conforme a equação:

$$M = \frac{(Q_{cen} - Q_{base})}{Q_{base}} * 100 \quad (10)$$

Em que,

M = mudança percentual na vazão média anual (ou mensal);

Q_{base} = vazão média anual (ou mensal) calculada pelo modelo no período base;

Q_{cen} = vazão média anual (ou mensal) calculada pelo modelo nos cenários de mudanças climáticas;

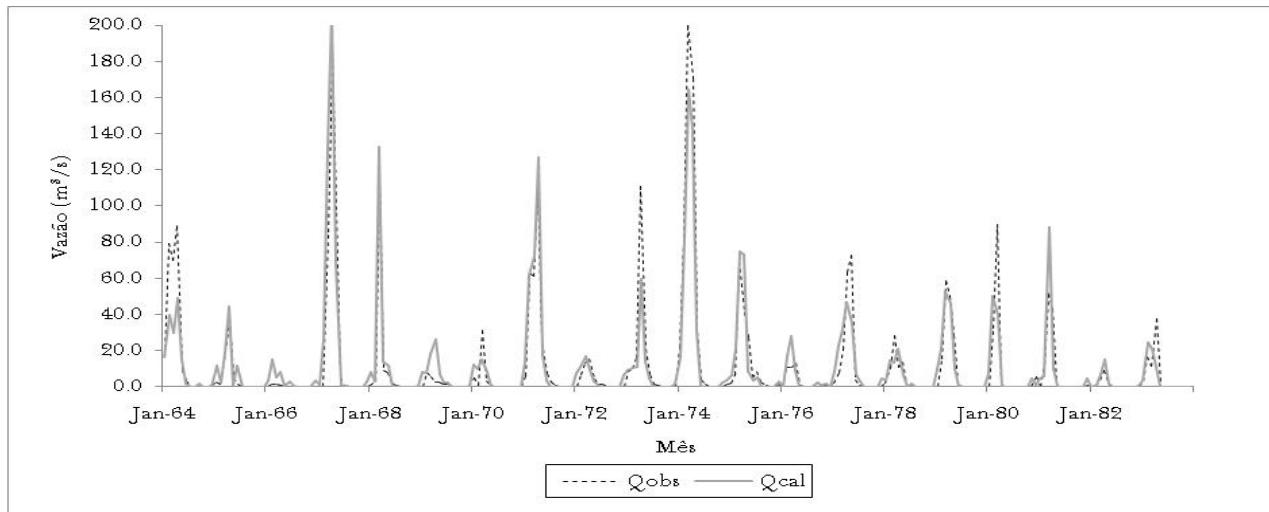


Figura 3 – Calibração do modelo GRH.

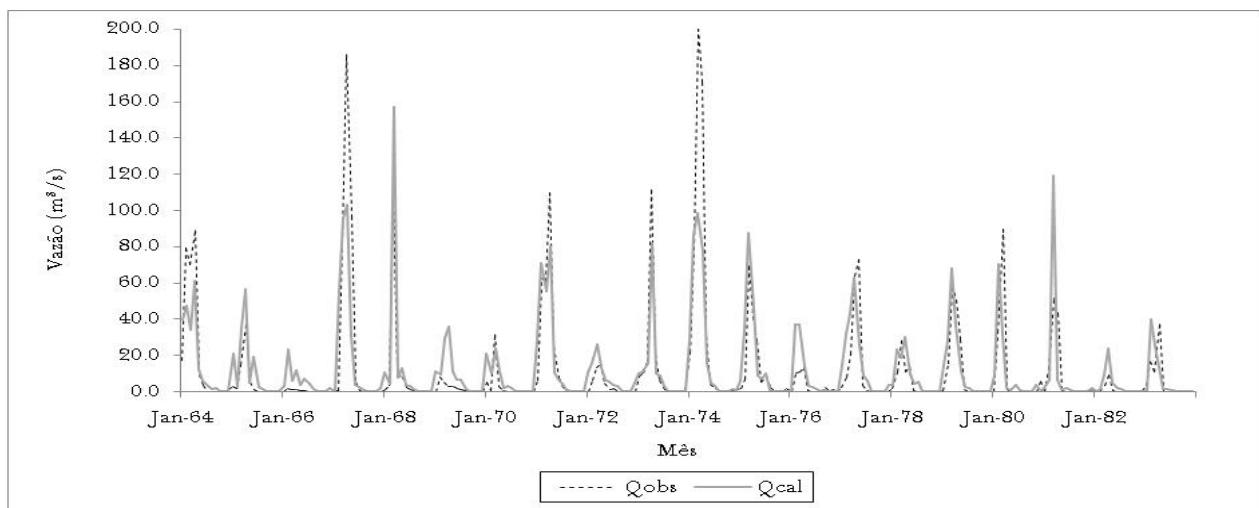


Figura 4 – Calibração do modelo SFMODEL.

Tabela 2 – Comparação dos resultados da calibração e validação para as diferentes categorias de modelo.

Fase	Qcal (m³/s)	Estatística	Modelo			
			SFMODEL	GRH	MIKE SHE	RNA
Calibração	11,8	Qcal (m³/s)	12,6	11,8	11,5	11,9
		Erro Volume (%)	6,90	0,19	1,80	1,01
		Erro médio (m³/s)	16,8	10,8	19,6	10,9
		Coef. Corr.	0,8199	0,9288	0,8486	0,9115
		R ²	0,6712	0,8623	0,5486	0,8308
Validação	23,7	Qcal (m³/s)	18,5	21,5	20,0	21,1
		Erro Volume (%)	21,91	9,13	15,51	10,87
		Erro médio (m³/s)	34,6	19,2	23,7	16,7
		Coef. Corr.	0,8416	0,9426	0,9143	0,8860
		R ²	0,6342	0,8867	0,8289	0,7707

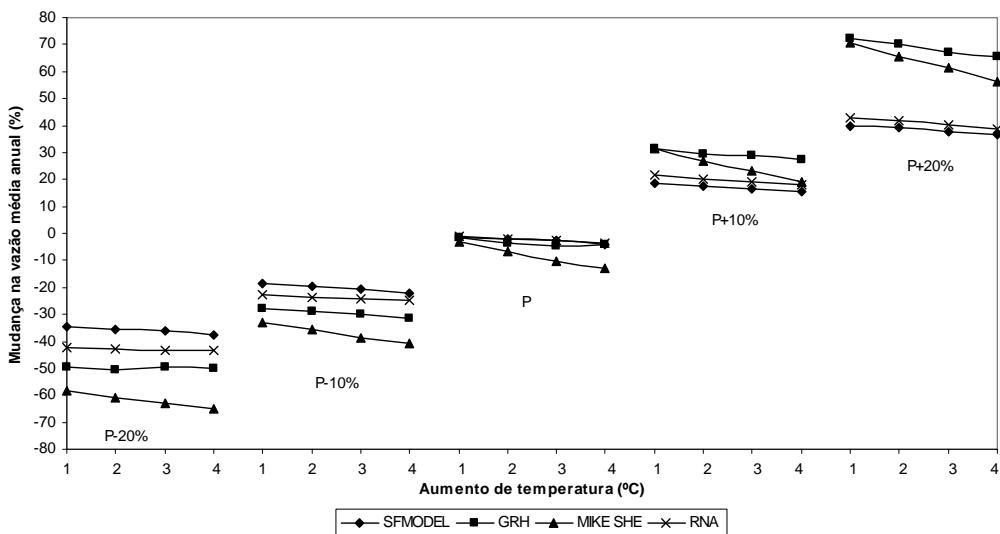


Figura 5 – Mudança percentual da vazão média anual calculada no período de base e nos cenários.

Os 20 cenários sintéticos da Tabela 1 foram simulados para cada modelo, perfazendo um total de 80 simulações, em nível mensal, englobando o período de 1964 a 1990. A extensa massa de dados obtida nessa etapa do trabalho foi consolidada em nível anual e em nível mensal, a fim de se procederem as análises das mudanças no escoamento previstas por cada um dos modelos e, principalmente, as diferenças entre as previsões de cada um desses métodos de simulação.

A Figura 5 mostra o resultado da aplicação da Equação 10 para a mudança percentual da vazão média anual. A mudança é apresentada para cada variação de precipitação, permitindo avaliar o comportamento de cada modelo com relação aos demais.

Fica evidenciado, por meio das declividades das linhas, que a mudança da vazão média anual é muito mais sensível à alteração na precipitação do que à alteração na temperatura, fato esse explicado pelo extenso intervalo da alteração na precipitação aplicado (-20% a +20%) e pela maior dependência da geração dos escoamentos em relação à precipitação, o que é inclusive mais acentuado em regiões de clima semiárido, como a região do presente estudo.

De forma geral, os modelos prevêem progressivamente mais redução no escoamento com o aumento de temperatura. O MIKE SHE foi o modelo que previu as maiores mudanças percentuais no escoamento médio anual quando se aumenta a temperatura, o que pode ser percebido pela maior declividade de sua linha nos blocos.

Verifica-se, ainda, que, à medida que se aumenta a variação da precipitação, fica maior a diferença entre os modelos. Os modelos conceituais GRH e MIKE SHE sofrem maior mudança que os empíricos SFMODEL e RNA.

Para a avaliação da mudança percentual do escoamento em nível mensal, utilizam-se as Figuras 6 e 7, que mostram os resultados obtidos para uma parte dos 20 cenários sintéticos de mudanças climáticas. Essas Figuras mostram, respectivamente, os cenários com maior redução de precipitação ($C_{-20,+1}$) e maior elevação de precipitação ($C_{+20,+4}$). Os dados apresentados limitam-se ao primeiro semestre em razão de que aproximadamente 98% do volume escoado na seção ocorrem nos primeiros seis meses do ano, sendo os demais meses caracterizados por vazões muito reduzidas ou nulas.

Na avaliação em nível mensal, observou-se que, no caso do modelo SFMODEL, a menor mudança percentual foi de apenas -0,4% (mês de abril do cenário $C_{0,+1}$), enquanto que a maior foi de 71,3% (mês de novembro do cenário $C_{+20,+1}$). Para o modelo GRH, a mudança percentual entre o valor do escoamento médio mensal dos cenários e o valor gerado no período de base foi nula no mês de janeiro de todos os cenários em que não se considerou alteração na precipitação, enquanto que a maior mudança foi de 85,9% (mês de março do cenário $C_{+20,+1}$). Já para o modelo MIKE SHE, a menor mudança percentual foi de apenas -2,8% (mês de abril do cenário $C_{0,+1}$), enquanto que a maior foi de 1046,5% (mês de dezembro do cenário $C_{+20,+1}$). Por

fim, no caso da rede neural artificial, a menor mudança percentual foi de apenas 0,2% (mês de janeiro do cenário $C_{0,+2}$), enquanto que a maior foi de 102,7% (mês de janeiro do cenário $C_{+20,+4}$).

Da análise das Figuras 6 e 7, ficam evidenciadas que as menores, porém marcantes diferenças na previsão dos modelos são observadas quando a comparação é realizada nos meses de fevereiro a abril em todos os cenários propostos.

Analizando os resultados obtidos tanto em nível anual quanto em nível mensal, observa-se que, em ambos os casos, as mudanças no escoamento previstas pelos modelos, com base nos cenários sintéticos de mudanças climáticas, mostraram-se variáveis, sensíveis e dependentes em relação aos modelos utilizados.

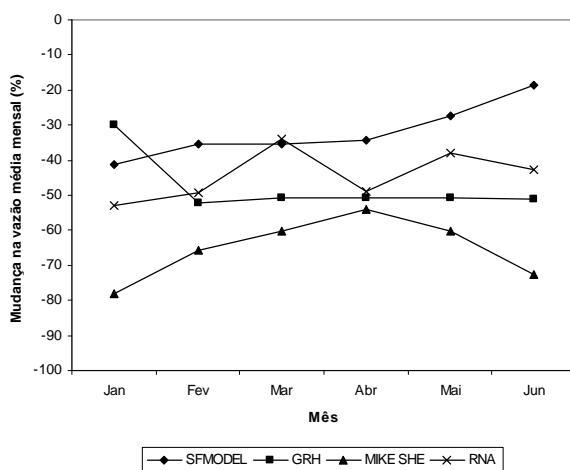


Figura 6 – Mudança percentual da vazão média mensal para o cenário $C_{20,+1}$ ($\Delta P=-20\%$; $\Delta T=+1^{\circ}\text{C}$).

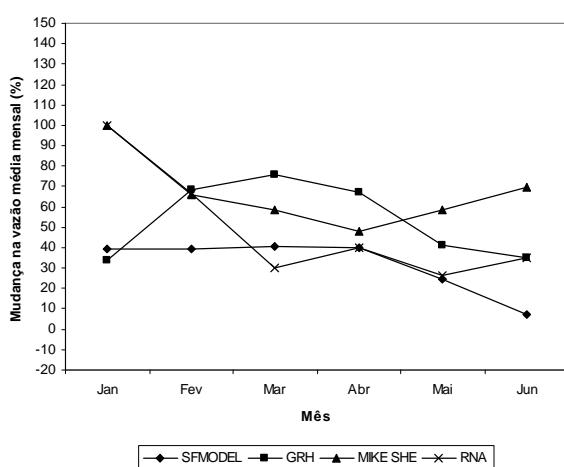


Figura 7 – Mudança percentual da vazão média mensal para o cenário $C_{+20,+4}$ ($\Delta P=+20\%$; $\Delta T=+4^{\circ}\text{C}$).

As diferenças de resultados encontrados entre os quatro modelos podem estar relacionadas, principalmente, à estrutura e ao equacionamento. Verifica-se, por exemplo, que aos modelos conceituais (GRH e MIKE SHE) é reservado todo um arcabouço matemático voltado para a representação da física dos processos hidrológicos modelados, enquanto que os modelos não conceituais (SFMODEL e RNA) têm a função de reproduzir o escoamento com base nos dados de entrada. Esse fato não necessariamente indica que os modelos conceituais conseguem melhores resultados em termos de simulação, porém garantem um maior controle em termos de coerência e reprodução dos processos naturais envolvidos. Isso fica mais evidente ao se analisar a influência da variação da temperatura do ar no escoamento gerado pelos modelos avaliados. Os modelos conceituais, principalmente o MIKE SHE, são mais sensíveis à mudança dessa variável na geração do escoamento conforme mostrado na Figura 5.

Diferenças marcantes nos resultados da aplicação e comparação de diferentes modelos hidrológicos também foram encontradas em trabalhos que realizaram simulações de cenários de mudanças climáticas, obtidas em modelos de uma mesma classe, a exemplo dos trabalhos de Boorman e Sefton (1997), Panagoulia e Dimou (1997) e Jiang *et al.* (2007). Nesse último trabalho em particular, as diferenças obtidas nos resultados das simulações com os diferentes modelos foram inferiores aos determinados na presente pesquisa, porém suficientes para os autores afirmarem que essas diferenças são significativas quando se comparam os diferentes modelos.

CONCLUSÕES

No presente trabalho foram avaliados os impactos nas vazões decorrentes de cenários sintéticos de variações de precipitação e temperatura do ar. Quatro modelos matemáticos de diferentes classes foram usados para simular o processo de transformação de chuva em vazão em uma bacia hidrográfica de mesoescala com clima semiárido.

Ficou evidente que em nível anual há diferenças marcantes quando se comparam os resultados entre os modelos. Em nível mensal, as diferenças existentes são ainda mais evidentes, havendo grande diversidade de resultados quando se analisam os conjuntos de cenários. Tanto em nível anual quanto em nível mensal, as mudanças percentuais da vazão média são muito mais sensíveis às alterações climáticas.

ções de precipitação do que às alterações de temperatura.

Pode-se concluir, portanto, que a escolha do modelo hidrológico influencia diretamente os resultados de simulação dos escoamentos hídricos, quando a região é submetida a cenários de mudanças climáticas, devendo esse fato ser considerado como mais uma incerteza nos estudos hidrológicos dessa natureza.

De modo geral, espera-se que os modelos conceituais, em um bom número de trabalhos de simulação hidrológica, inclusive os que envolvem avaliações sobre impactos de mudanças climáticas, sejam preferidos em relação aos demais. O modelo MIKE SHE, em especial, permite a alteração no tempo dos parâmetros relacionados à cobertura vegetal/uso e ocupação do solo, permitindo simular os processos de transformação de chuva em vazão considerando a evolução temporal da cobertura do solo.

A depender das previsões de um ou outro modelo, as futuras políticas públicas e estratégias de adaptação às mudanças climáticas podem ser completamente diferentes. Por essa razão, deve-se sempre avaliar o modelo utilizado e as incertezas envolvendo o processo, principalmente em uma bacia da região semiárida, cujas dificuldades em relação à gestão da água são grandes, devido à ocorrência de ciclos de secas.

REFERÊNCIAS

ABBOT, M.B.; BATHURST, J.C.; CUNGE, J.A.; O'CONNELL, P.E.; RASMUSSEN J. An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique European 'SHE' 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modeling System. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, v. 87, p.61-77. 1986.

AZEVEDO, J.R.G. *Water resources and global warming for the São Francisco River in Brazil*. 1999. Ph.D. Thesis – University of Southampton, Southampton, England, 1999.

BATES, B.C.; KUNDZEWICZ, Z.W.; WU, S.; PALUTIKOF, J.P. *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 2008. 210p.

BOORMAN, D.B.; SEFTON, C.E. "Recognizing the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response". *Climate Change*, v. 35 ,p. 415-439, 1997.

COOPER, V.A.; NGUYEN, V.T.V.; NICELL, J.A. "Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization methods with hydrologic process-based parameter constraints." *Journal of Hydrology*, v. 334, p. 455-466. 2007.

CUNHA, J. B.; MILLO, J. L. *Dados climatológicos básicos do Nordeste: visão preliminar*. SUDENE. Recife-PE Brasil. 1984.

DHI – Danish Hydraulic Institute . *MIKE SHE Code Verification and Validation*. 2001. Disponível em: <www.dhi.dk>, 02.11.2004.

FRANCHINI, M.; PACCIANI, M. "Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models." *Journal of Hydrology*, v. 122, p. 161-219, 1991.

GRH/UFPE – Grupo de Recursos Hídricos/Universidad Federal de Pernambuco. *Manual de Uso do SIGMA - Sistema de Informações para Gestão do Meio Ambiente: Ênfase Recursos Hídricos*. Recife: Universidade Federal da Pernambuco, Brasil. 1999.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Relatório nº2: Caracterização do clima no Século XX no Brasil: Tendências de chuvas e Temperaturas médias e extremas*. CPTEC/INPE. São Paulo, Brasil. 91p. 2007.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Emissions Scenarios*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 570p.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: University Press, Cambridge: United Kingdom, 2007. 976p.

JIANG, T.; CHEN, Y.D.; XU, C-Y.; CHEN, X.; CHEN, X.; SING, V.P. "Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China" *Journal of Hydrology*, v. 336, p. 316-333, 2007.

JOHNSON, M.S.; COON, W.F.; MEHTA, V.K.; STEENHUIS, T.S.; BROOKS, E.S.; BOLL, J. "Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hillslope dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR." *Journal of Hydrology*, v. 284, p. 57-76, 2003.

LACERDA JÚNIOR, H.B.; SILVA, S.R.; CIRILO, J.A.; ALCOFORADO, M.M.G. "Sistema de suporte à decisão para o gerenciamento dos recursos hídricos da bacia do rio Piraí-pama". Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa-PB, Brasil, 2005.

LOPES, J.E.G.; BRAGA, B.P.F.; CONEJO, J.G.L. "SMAP - a simplified hydrological model in applied modelling in catchment hydrology." In: Singh, V.P. Water Resources Publications. 1982.

MAURER, E.P.; BREKKE, L.D.; e PRUITT, T. "Is hydrology model selection important for estimating climate change impacts on California watersheds?" *Journal of the American Water Resources Association* (submitted 6/3/2009).

MILLY, P.C.D.; DUNNE, K.A.; VECCHIA, A.V. "Global pattern of trends in streamflow e water availability in a changing climate". *Nature*, n. 438, n.17, 2005.

PANAGOULIA, D. ; DIMOU G. "Linking space-time scale in hydrological modelling with respect to global climate change. Part 2. Hydrological response for alternative climates". *Journal of Hydrology*, v. 194, p. 38-63, 1997.

PERRIN C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. "Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments" *Journal of Hydrology*, v. 242, p. 275-301, 2001.

REFSGAARD, J.C.; KNUDSEN, J. "Operational validation and intercomparison of hydrological models." *Water Resources Research*, v. 32, n. 7, p. 2189-2202, 1996.

SECTMA/PE. "Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH-PE". Secretaria de Ciências, Tecnologia e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco. Recife-PE, Brasil, 1998.

SEPLAN/PB – Secretaria do Planejamento. *Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba: Bacias do Rio Piancó e do Alto Piranhas*. Tomo 3, v.I. 2. João Pessoa, PB, 1997.

SOUZA FILHO, F.A. Variabilidade e Mudança Climática nos Semi-Áridos Brasileiros. In: TUCCI, C. E. M; BRAGA, B. (Org.). *Clima e Recursos Hídricos no Brasil*. Porto Alegre : ABRH, 2003. p.348.

UK Met Office. *Climate change, rivers and rainfall. Recent research on climate change science from the Hadley Centre*, December. 2005.

VALENÇA, M.J.S. e LUDERMIR, T.B. "Introdução às Redes Neurais." In: GALVÃO, C.O.; VALENÇA M.J.S. (Orgs.). *Sistemas Inteligentes*. Porto Alegre: Editora da ABRH, 1999.

VICUNA, S.; MAURER, E.P.; JOYCE, B.; DRACUP, J.A.; PURKEY, D. "The Sensitivity of California Water Resources to Climate Change Scenarios". *Journal of the American Water Resources Association*, v. 43, n. 2, p. 482-498, 2007.

Influence of the Hydrologic Model on the Evaluation of Sensitivity of Water Resources to Climate Change Scenarios in a Semiarid Region

ABSTRACT

This work evaluates the influence of the hydrologic model or the mathematical technique of the rainfall-runoff transformation applied to synthetic scenarios of climate change. The scenarios were constructed varying the air temperature from 1°C to 4°C in the historical data and varying the precipitation from -20% to +20%. This study was applied in Piancó river basin, located in the semiarid of the Brazilian Northeast. Four models are used in this work: a statistic-empirical hydrologic model, a lumped conceptual hydrologic model, a distributed conceptual hydrologic model and a model that uses an artificial neural network. The results showed that the models have the capacity to satisfactorily reproduce the outflow discharge series. The results also showed that there are differences in the simulations of the models, considering either annual or monthly time steps. It was demonstrated that the category of hydrologic model directly influences the results of climate change analysis.

Key-words: hydrologic model; climate change; semiarid region.