

MODELAGEM HIDROCLIMÁTICA DINÂMICA INTRASAZONAL DAS BACIAS DE CONTRIBUIÇÃO DOS RIOS PACUÍ E JEQUITAÍ, INSERIDAS NAS BACIAS ALTO E MÉDIO SÃO FRANCISCO

José Pedro Rebes Lima¹ & José Maria Brabo Alves²

RESUMO – Este estudo mostra a aplicação de modelagem hidroclimática dinâmica, ou seja, *climate downscaling* dinâmico acoplado ao modelo hidrológico chuva-vazão, para as Bacias hidrográficas de contribuição dos Rios Pacuí e Jequitaí, inseridas nas Bacias Alto e Médio São Francisco, com ênfase dada à simulação na escala intrasazonal (mensal). Os resultados sugerem que a simulação de precipitação pode ser usada como variável de entrada em modelos de estimativa de vazão para períodos na escala de um mês, dando subsídio a um melhor aproveitamento dos recursos hídricos na bacia hidrográfica estudada. Estes ainda sugerem que a simulação de precipitação quando corrigida pela técnica de Função Densidade de Probabilidade (PDF) é mais eficiente na estimativa de precipitação simulada quando comparada com a precipitação observada na sub-bacia, podendo ser usada como dado de entrada para simulações de modelos hidrológicos.

ABSTRACT - This study shows the application of dynamic hydro-climatic modeling, that is, rainfall's dynamic *climate downscaling* coupled to the rain-stream outflow's hydrological model for the Pacuí and Jequitaí River's contribution hydrographic basins localized at the São Francisco River's Basin. The emphasis was done to the simulation in the inter-seasonal scale (monthly). The results suggested that the rainfall's simulation can be used as entrance variable in the stream outflow's estimation models for periods in the scale of a month giving subsidy to a better use of the surface water resources in the studied hydrographic basin. These also suggested that the rainfall's simulation corrected by the Probability Density Function's (PDF) technique is more efficient in the estimate of simulated rainfall comparing to observed rainfall in the sub basin and can be used as entrance data for simulations of the hydrological models.

Palavras-Chave: Modelagem Hidroclimática, *Climate Downscaling*, Modelo SMAP.

1 Físico - FUNCEME, Doutor em Geofísica, Pesquisador Visitante CNPq/PROSET - Av. Rui Barbosa, 1246 – 60.115-221 – Fortaleza – CE – rebes@funceme.br

2 Meteorologista - FUNCEME, Doutor em Eng. Civil – Recursos Hídricos – UFC – Av. Rui Barbosa, 1246 – 60.115-221 – Fortaleza – CE – brabo@funceme.br

1 – INTRODUÇÃO

A Bacia do rio São Francisco, o qual tem 2.700 km de extensão, se apresenta de suma importância no cenário social e econômico do Brasil, em particular no que se refere à agricultura. A área irrigada é de 342.900 hectares - correspondendo a 11% dos 3,1 milhões de hectares irrigados no país. Várias atividades têm se destacado, dentro do regime produtivo do rio São Francisco, entre elas: o crescimento da agricultura de sequeiro para produção de soja e milho, da pecuária, com ênfase na bovinocultura e caprinocultura, da pesca e aquíicultura, da indústria e agroindústria, das atividades minerais, e do turismo e lazer. À medida que, as áreas irrigadas são ampliadas e os centros urbanos aumentam em área ocupada, em população e em atividades industriais, as diferentes formas de demanda na utilização de recursos hídricos tornam-se conflitantes. Deste modo, com o considerável aumento na demanda de água, é possível que em certas áreas da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco tenha se atingido os limites legais máximos de outorga de mananciais. Temos ainda que, com um cenário mundial de mudanças climáticas, é de fundamental importância compreender o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas tendo em conta suas variabilidades inter-anuais. Este conhecimento, em conjunto com a elaboração de ferramentas de gestão dos recursos hídricos, é essencial diante de futuras mudanças no clima que certamente modificarão as condições hidrológicas da Bacia do São Francisco. No Brasil, ainda são poucos os estudos sobre os impactos de mudanças climáticas em regime hídrico de bacias hidrográficas, porém alguns estudos fora do Brasil já mostram alguns impactos (Miller *et al.* 1999; Wilby e Dettinger, 2000 e Knowles e Cayan, 2001).

Em simulações/previsões de afluência e quantidade de reservas hídricas para diversos usos, alguns deles conflitantes, têm sido utilizados modelamentos numéricos (modelagem acoplada chuva-vazão) que simulam/prevêm as condições hidrológicas das águas de superfície. Modelos hidrológicos podem dar diferentes simulações/previsões para diversos impactos na bacia hidrográfica. O uso de modelos hidrológicos depende do seu objetivo, e principalmente de disponibilidade de dados (Brilly, 1999). Estas previsões futuras de afluências, até pouco tempo, em geral, feitas com modelos estatísticos (Xu *et al.* 2001), passaram a utilizar técnicas de modelagem física da atmosfera fazendo com a comunidade hidrológica começasse a utilizar esta informação. Este uso foi possível, segundo Sarewitz e Pilke (2000), devido a uma maior confiabilidade nos modelos atmosféricos, cujo progresso nas últimas décadas deve-se a uma integração de ciências da terra e a capacidade computacional cada vez mais acelerada (Oliveira, 2006).

Neste contexto integrado da bacia hidrográfica, a aplicabilidade da informação agregada meteorológica e hidrológica é essencial para tomada de decisão, e como a água é um bem valioso, é crucial se otimizar seu manejo e uso nas diversas escalas de tempo e espaço.

Segundo Oliveira (2006), até alguns anos atrás, a incompatibilidade de escala temporal e espacial da informação meteorológica restringia seu uso em modelos hidrológicos, sendo uma alternativa nos anos recentes o uso de *downscaling*. No Brasil, previsões meteorológicas de tempo (escala de dias) e sazonais (acima da escala mensal) têm sido utilizadas como dados de entrada na modelagem de sistemas de operação de reservatórios (Galvão, 1999; Collischonn, 2001; Tucci *et al.* 2003; Galvão *et al.*; 2005, Alves, 2007). O *downscaling* usa modelos regionais (MRs) alinhados a modelos dinâmicos de circulação geral da atmosfera – MCGAs (com resolução em geral acima de 200 km). Estes MRs incorporam características regionais como topografia, vegetação, solo, diferenças continente-oceano, etc., não contidas nos modelos globais. Vários estudos acerca do uso desta técnica (*downscaling*) sugerem um melhor desempenho na simulação e previsão de distribuição de precipitação localizada (Nobre *et al.*, 2001; Sun *et al.* 2005), como no caso de bacias hidrográficas.

2 – ÁREA DE ESTUDO

Este estudo objetivou mostrar o desempenho da modelagem climática dinâmica de precipitação (*downscaling*) na escala intrasazonal e seus efeitos acoplados na modelagem de chuvas em uma área ainda pouco estudada. A bacia hidrográfica analisada neste estudo localiza-se na parte nordeste das Bacias Alto e Médio São Francisco (definida a partir do Posto fluviométrico de Cachoeira Manteiga), dentro do Estado de Minas Gerais (Figura 1). As principais bacias de contribuição são as dos Rios Pacuí e Jequitaiá, e incorpora também parte da bacia de contribuição Rio das Velhas. O regime climático desta bacia é predominantemente da parte norte da região sudeste, área cuja previsibilidade climática tem menor destreza nos modelos dinâmicos climáticos. O dado de TSM é o principal parâmetro nas condições de contorno da simulação climática de precipitação nestes modelos, contudo não é o principal forçante climático de precipitação na região de estudo. Nesta área da Bacia do São Francisco a precipitação tem como principal forçante a variabilidade interna da atmosfera (atuação de fenômenos atmosféricos transientes).

Os Rios Pacuí, Jequitaiá e das Velhas, são considerados uns dos principais afluentes pela margem direita do Rio São Francisco no Estado de Minas Gerais. De acordo com estudos do IGAM (2006) as bacias hidrográficas dos Rios Pacuí e Jequitaiá apresentam escassez de recursos hídricos e conflitos pelo uso da água, com destaque para a agricultura irrigada no Córrego Riachão.

A bacia de contribuição do Rio Jequitaiá é composta por áreas pertencentes a apenas cinco municípios, integralmente contidos na bacia, destacando-se os municípios de Jequitaiá e Francisco Dumont. Os usos consuntivos e não consuntivos identificados nessa bacia são: abastecimento urbano e rural, pecuária, irrigação, mineral, industrial e geração de energia.

Como usos consuntivos ocorrem: a pecuária de corte, explorada de forma extensiva (atividade econômica predominante), seguida da agricultura de sequeiro (grãos e cana de açúcar) e do reflorestamento (monocultura de eucalipto). A agricultura irrigada é pouco disseminada na região, sendo que no município de Claro dos Poções se encontram as maiores concentrações de áreas irrigadas e o maior número de irrigantes. Nesta bacia, em 2005 estava projetada a implantação do perímetro de irrigação de Jequitaiá, da CODEVASF, com 35.000 ha, que captaria água no eixo principal do rio Jequitaiá, após as barragens de Jequitaiá I e Jequitaiá II, a serem construídas. Podemos destacar ainda, o setor extrativo mineral de quartzo, ocre e diamante. O quartzo é explorado para alimentar as indústrias localizadas nos municípios de Jequitaiá e Engenheiro Navarro, e o diamante é extraído em garimpos localizados principalmente no rio Jequitaiá. O setor industrial é pouco significativo, formado principalmente por pequenas agroindústrias de milho, cana de açúcar e matadouros.

Como uso não consuntivo e no que se refere à geração de energia elétrica, em 2005 não existia nenhum aproveitamento hidrelétrico em operação na região. Dentro do planejamento da Eletrobrás, estavam previstos dois pequenos aproveitamentos em futuras barragens de Jequitaiá I e Jequitaiá II (IGAM, 2006).

A bacia de contribuição do Rio Pacuí está localizada na Bacia Médio São Francisco, onde são identificados como usos consuntivos e não consuntivos o abastecimento urbano e rural e as atividades econômicas de: pecuária, irrigação, mineral, industrial, geração de energia e pesca.

Como usos consuntivos ocorrem: pecuária de corte, explorada de forma extensiva (atividade econômica predominante); agricultura de sequeiro de grãos (milho e feijão) e de reflorestamento (monocultura de eucalipto); a agricultura irrigada, bastante disseminada na região, concentrando-se no município de Januária; o setor extrativo mineral é pouco representativo, destacando-se, entretanto os minérios de manganês e o calcáreo; o setor industrial é pouco significativo, formado principalmente por pequenas agroindústrias de alimentos e matadouros (IGAM, 2006).

Como usos não consuntivos e no que se refere à geração de energia elétrica, em 2005 existia o aproveitamento hidrelétrico de Pandeiros, da CEMIG, em operação. Dentro do planejamento da Eletrobrás, não estavam previstos novos aproveitamentos nesses afluentes do rio São Francisco. Podemos destacar ainda, a atividade pesqueira ao longo do eixo do rio São Francisco, com produtividade da ordem de 117 kg/ha.ano.

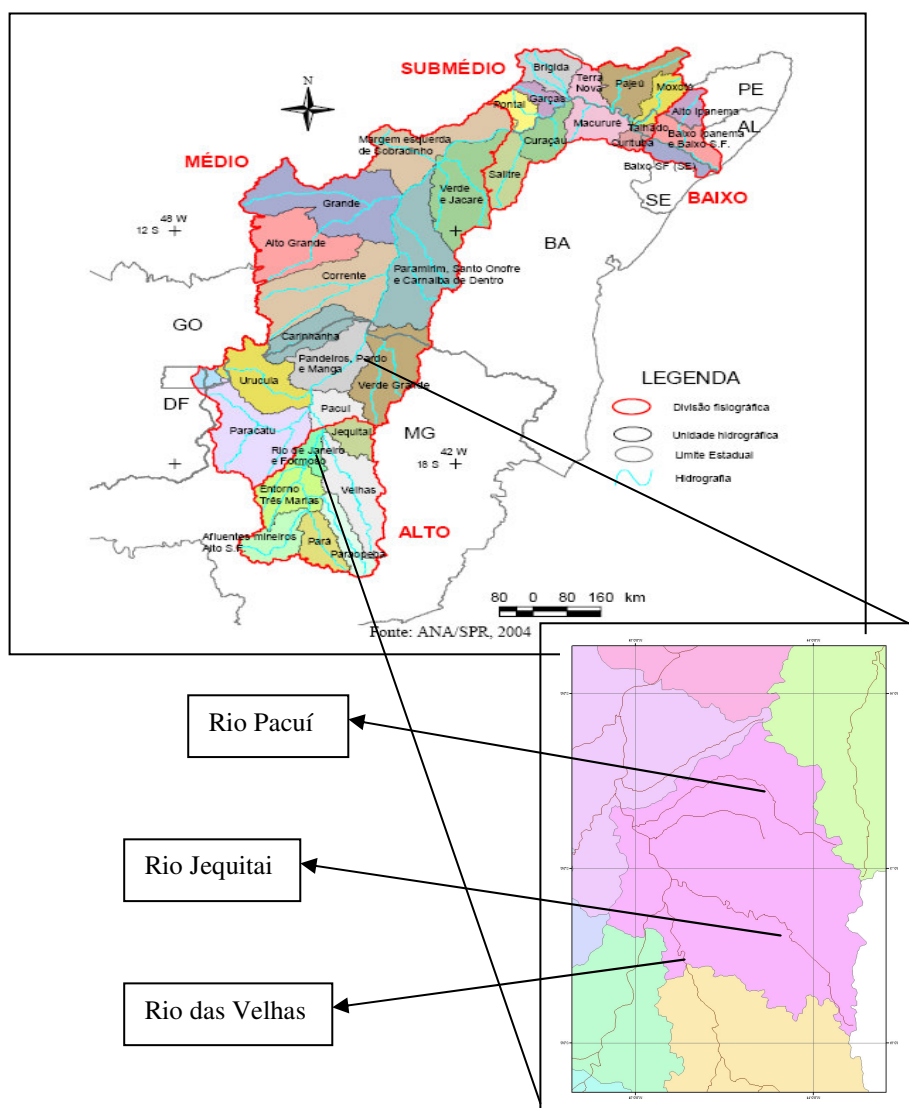


Figura 1 – Localização das Sub-Bacias Hidrográficas dos Rios Pacuí e Jequitai.

3 - METODOLOGIA E DADOS

3.1 – Modelos atmosféricos usados

O modelo global atmosférico usado foi o *ECHAM4.5*, baseado no modelo de previsão de tempo do *European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF)*. Várias modificações têm sido aplicadas no mesmo *no Max Planck Institute for Meteorology and German Climate Computing Centre (DKRZ)* para melhorar a previsão climática, estando o mesmo atualmente na quarta geração. Uma detalhada descrição do *ECHAM4.5* pode ser encontrada em *Roeckner et al. (1996)*. O MRE usado neste estudo foi à versão hidrostática do MRE do *National Center for Atmospheric Research – NCEP (Juang & Kanamitsu, 1994)*. O MRE foi integrado para seis meses a partir de 01 de janeiro a 30 de junho com dez distintas condições iniciais advindas do MCGA para o período de 1971-2000. Informações do MCGA das componentes zonal e meridional do vento,

umidade específica, temperatura do ar e pressão a pressão a superfície a cada 6 horas serviram de assimilação pelo MRE. Temperatura da Superfície do Mar (TSM) obtidas no banco de dados do *NECP* observadas nos meses de janeiro a junho de 1971-2000 foi usada como condição de contorno oceânica para o MCGA e o MRE. Maiores detalhes sobre o *ECHAM4.5* e o MRE e o processo de *downscaling* podem ser encontrados e Sun *et al.* (2005).

3.2 – Estatística usada para avaliar a precipitação

Várias medidas de desempenho podem ser usadas para comparar resultados e seus erros associados entre variáveis observadas e simuladas/previstas. Diversas medidas de erros podem ser usadas individualmente como índices de desempenho de modelos atmosféricos e outros, cada uma com suas vantagens e desvantagens. As métricas calculadas são o *bias* estatístico, o Erro Absoluto Médio, o Erro Quadrático Médio, a razão entre os desvios padrão modelado e observado e o Coeficiente de Correlação.

Bias (Viés) estatístico (b) – É dentre as métricas consideradas aqui, a mais simples e menos representativa. É dado pela média da diferença entre a série modelada (simulada) e a observada, e indica o erro sistemático (subestimativa ou superestimativa).

$$b = \frac{1}{N} \sum (V_{o,i} - V_{s,i}) \quad (1)$$

onde V_o é o valor da variável observada, V_s é o valor da variável simulada e N é o período de tempo usado no cálculo. O *bias* pode ter qualquer valor real, onde os valores mais próximos de zero, por definição, representam menor erro. É medido com a mesma unidade usada nas séries.

Erro Absoluto Médio (EAM) - É considerada uma medida de erro mais justa. Na mesma os desvios negativos não se cancelam com os positivos, o que o torna mais representativo que o *bias*.

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_{o,i} - V_{s,i}| \quad (2)$$

onde V_o é o valor da variável observada e V_s é o valor da variável simulada/prevista. Pela definição, só pode assumir valores não-negativos, sendo que quanto menor o valor maior semelhança entre as séries. É medido com a mesma unidade usada nas séries.

Erro Quadrático Médio (EQM) – É definido pela soma dos quadrados das diferenças entre resultados simulados/previstos e as observações.

$$EQM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{o,i} - V_{s,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

onde V_o é o valor da variável observada e V_s é o valor da variável simulada/prevista. É a métrica de erro mais comumente usada. É muito sensível a grandes desvios entre os valores das séries comparadas, o que se torna mais relevante quando se trata de avaliação de grandes erros. Pode assumir qualquer valor não negativo e tem a mesma unidade de medida das séries. É maior a semelhança entre as séries simulada/prevista e a observada quanto mais próximo de zero for o seu valor.

Uma estimativa de erro frequentemente sugerida é a comparação entre os desvios padrão do simulado/previsto e o observado. A síntese é que medidas parecidas de desvio padrão estão associadas à similaridade entre as séries.

$$\sigma_{obs} = \left[\frac{1}{N} \sum \left(V_{i,o} - \bar{V}_o \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\sigma_{sim} = \left[\frac{1}{N} \sum \left(V_{i,s} - \bar{V}_s \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

onde, onde V_o é o valor da variável observada e V_s é o valor da variável simulada/prevista, onde \bar{V}_s e \bar{V}_o indicam o valor da média da variável simulada/prevista e observada. Com o cálculo dos desvios padrão pode-se calcular a razão entre os desvios como:

$$R_a = \frac{\sigma_{obs}}{\sigma_s} \quad (6)$$

Uma maior semelhança entre os desvios padrão é representada por uma razão mais próxima da unidade. Esta razão é adimensional, podendo assumir qualquer valor não negativo.

Coefficiente de Correlação (r) – Segundo a literatura é a mais relevante métrica de comparação de todas as apresentadas. Sua fórmula é mostrada abaixo.

$$r = \frac{1}{N} \sum \frac{V'_{o,i} V'_{s,i}}{\sigma_o \sigma_s} \quad (7)$$

Nas formulações acima as variáveis simuladas são relativas tanto aos dados sem correção do MRE como os corrigidos pelas PDFs.

3.3 - Dados de TSM usados na definição dos anos de contrastes climáticos

Os dados de TSM usados foram obtidos de duas fontes. Para a definição dos anos de contrastes climáticos, usou-se TSMs de uma versão do *Comprehensive Atmospheric-Ocean Data Set (COADS)*. Esse arquivo contém dados de médias mensais em pontos de grade de 1° x 1° de latitude-longitude para um período de 1945 a 2000 (Da Silva *et al.*, 1994). Como base para a simulação dos modelos *ECHAM4.5*, *MR/97* foram usadas TSMs do bando de dados do

International Research Institute (IRI), conjunto de dados denominados de Interpolação Ótima (Reynolds e Smith, 1994). Os valores de TSM para o período de 1971-2000, com cobertura em todos os oceanos, foram interpolados para a grade dos modelos *ECHAM4.5* e *MRE/97*. Para a precipitação e vazão, foi feita uma comparação para anos de contrastes climáticos (La Niña, El Niño e Normais) entre o simulado pelo MRE, com correção pelas PDFs e o observado, valores médios, na bacia de estudo.

Embora existam na literatura vários autores que tenham definido ano de ocorrência de eventos El Niño, La Niña, Normais no Pacífico Tropical (Trenberth, 1998 e outros), e de dipolos de TSM no Atlântico Tropical (Servain, 1991); nesse estudo foram definidos eventos de El Niño, La Niña e Normais no Pacífico Tropical (Philander, 1990), e de dipolos de TSM no Atlântico Tropical como: anos de El Niño quando a anomalia de TSM na área de Niño 3 esteve com uma anomalia acima de $0,5^{\circ}\text{C}$ no trimestre dezembro, janeiro e fevereiro, e La Niña quando essa anomalia foi inferior a $-0,5^{\circ}\text{C}$. Anos Normais foram considerados aqueles com anomalias entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ e $0,5^{\circ}\text{C}$ (Alves *et al*, 2007).

3.4 - Dados de precipitação e vazão na bacia do posto fluviométrico de Cachoeira Manteiga

Especificamente sobre a área de captação da sub-bacia hidrográfica Cachoeira da Manteiga foram usados postos pluviométricos com dados disponíveis diários do banco de dados da ANA (Agência Nacional de Águas) no período de 1981-2000. Com estas estações da área de influência da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Cachoeira Manteiga, usando o método do Polígono de Thiessen, foram calculadas médias diárias e mensais de precipitação. Como o modelo de *downscaling* rodado na FUNCEME incorpora somente o primeiro semestre, esses cálculos se detiveram ao período de janeiro a junho. Para os dados simulados pelo MRE, aproximadamente 60 km x 60 km, foi feita uma interpolação linear para uma grade de aproximadamente 10 km x 10 km na área da bacia hidrográfica de Cachoeira Manteiga. Os dados de vazão afluente usado no estudo foram coletados no posto fluviométrico de Cachoeira da Manteiga. Estes dados são valores diários para o período de 1955-1996 e a partir desses dados diários foram calculadas médias mensais. A série histórica foi analisada quanto a sua consistência e, utilizados os dados compreendidos no período de 1971-1996. A coleta e consistência desses dados são rotineiramente feitas pela Agência Nacional de Águas (ANA).

Os resultados da modelagem dinâmica da atmosfera apresentam erros sistemáticos (tendências). Estes vieses podem ser corrigidos por algumas técnicas. De uma forma geral, estas têm como base métodos estatísticos que tentam realizar uma análise dos erros com base em uma série histórica longa de dados observados e modelados. Segundo Reis Junior *et al.* (2006), dois métodos em geral são usados: o que preserva os dois primeiros momentos da série histórica e o

método que preserva as frequências amostrais observadas na série histórica. O método dos dois primeiros momentos (MOM) consiste em calcular a média e o desvio padrão diários das séries observadas e modeladas para cada mês do ano para o período de 1971-2000. O valor bruto da previsão de chuva em um dado dia do mês é subtraído da média histórica dos valores previstos e dividido pelo correspondente desvio padrão, tem-se um valor padronizado. Então, o valor corrigido da simulação/previsão é dado pela multiplicação do valor padronizado pelo desvio padrão da série histórica observada e adicionar o valor da média histórica dos dados observados.

O método que tem como base as frequências mensais das amostras previstas/simuladas e observadas no período de 1971-2000, tem como procedimento a obtenção de duas curvas de frequência amostral uma para a previsão simulação outra para os dados observados. O valor bruto da previsão diária de chuva em cada mês está associado a uma probabilidade de ocorrência dada pela curva de frequência amostral do modelo. Para se obter o valor corrigido da simulação/previsão, basta pegar o valor da chuva correspondente à mesma probabilidade de ocorrência na curva dos valores observados. Neste estudo foi executada apenas a correção com base nas frequências amostrais. O período usado para essas correções das precipitações mensais simuladas pelo MRE foi de janeiro a junho entre 1940-1970 (totais mensais de precipitação média observada na bacia).

3.5 - Modelo hidrológico chuva-vazão (SMAP)

Vários modelos hidrológicos têm sido testados para estimativa de vazão em bacias hidrográficas. O modelo escolhido nesse estudo para a geração de vazão foi o modelo SMAP - *Soil Moisture Accounting Procedure* (Lopes *et al.* 1981) na versão mensal. Foi considerada a facilidade de uso deste modelo, a qual exige a obtenção de poucos dados observacionais e a baixa demanda computacional. A base conceitual de aplicação do modelo hidrológico levou em conta os conceitos de modelagem concentrada, admitindo, por exemplo, um valor médio de precipitação, evaporação e vazão ao longo da bacia do posto fluviométrico de Cachoeira Manteiga. O período utilizado para a calibração de modelo hidrológico e de modelagem climática neste estudo foi o de janeiro de 1981 a dezembro de 2000. O SMAP utiliza em seu esquema físico dois reservatórios lineares representando o solo (camada superior) e o aquífero, como pode ser visualizado na figura 2. A cada evento de precipitação (P) é realizado um balanço de massa. Uma parcela de (P) é transferida como escoamento superficial (ES). Este cálculo é feito através da equação do “Soil Conservation Service” (SCS) para escoamento superficial.

A lâmina restante da precipitação subtraída do escoamento superficial (P-ES) sofre perda por evaporação a nível evaporação potencial (EP), logo a lâmina remanescente (P-ES-EP) é adicionada a um segundo reservatório que representa a camada superior do solo. Neste, a umidade é atualizada ao longo do tempo através das perdas por evapotranspiração real (ER) que dependem do nível do

reservatório (RSOLO) e da capacidade de saturação do solo (SAT). Outra saída deste reservatório é a recarga no reservatório subterrâneo (REC) onde é utilizado o conceito de capacidade de campo (CAPC) para determiná-la. Este segundo reservatório também é linear e o nível água existente (RSUB) é deplecionado a uma taxa constante de recessão do escoamento básico (K), resultando em escoamento básico (EB). A soma do escoamento direto e básico fornece a vazão no ponto de controle da bacia.

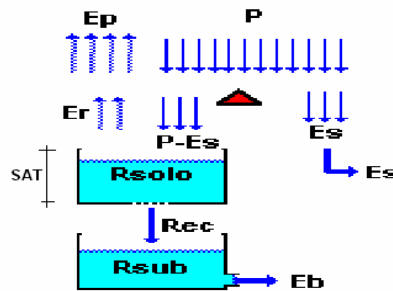


Figura 2 – Esquema físico do modelo chuva-deflúvio SMAP mensal adaptado de Lopes *et al.*, 1981.

Para a primeira interação faz necessário o cálculo inicial da taxa de umidade de solo inicial (TUin) e o escoamento de base inicial (EBin). No algoritmo original, esses valores iniciais são calibrados juntamente com os parâmetros referentes à capacidade de saturação do solo (SAT), a lamina de precipitação subtraída da parcela transferida ao escoamento superficial (P-ES), o coeficiente de recarga (CREC), este relacionado com a permeabilidade na zona não saturada do solo e (K) taxa de deplecionamento que gera escoamento de base.

Assim neste estudo os dados de entrada para o modelo são: (1) Precipitação mensal (P) em mm; (2) Evapotranspiração potencial (EP) mensal em mm; (3) Área da bacia hidrográfica em km².

Os parâmetros a serem calibrados manualmente são: Taxa de umidade do solo inicial (TUin) que determina o nível inicial do reservatório RSOLO; e Escoamento de base inicial (EBin).

E os parâmetros do modelo a serem calibrados automaticamente são: SAT – capacidade de saturação do solo em mm; PES – parâmetro controlador do escoamento superficial; CREC – coeficiente de recarga, parâmetro relacionado com a permeabilidade na zona não saturada do solo em mm; K – Taxa de deplecionamento do nível RSUB que gera o escoamento de base (EB).

Dos oito parâmetros do modelo SMAP foram utilizados apenas quatro na calibração automática. Em seguida os valores dos parâmetros já calibrados com valores de vazão observados foram usados na estimativa das vazões com os dados de precipitação simulados pelo MRE/97 e suas correções no período de 1981-2000. A calibração dos quatro parâmetros do modelo foi feita com a tentativa de minimizar a função objetiva denominada como coeficiente Nash-Sutcliffe nas 100 interações usadas (Nascimento *et al.*, 2006).

3.6 - Calibração e análise de eficiência do SMAP

Para a calibração automática do modelo chuva-deflúvio SMAP mensal foi utilizada como função objetivo a soma da raiz do erro quadrático entre as vazões observadas q_i e as vazões estimadas \hat{q}_i onde esta soma foi minimizada utilizando a função solver da planilha eletrônica Excel.

$$FO = \sum (q_i - \hat{q}_i)^2 \quad (8)$$

A eficiência da calibração foi quantificada utilizando a formulação proposta por Nash e Sutcliffe (1970):

$$E = 1 - \frac{\sum (q_i - \hat{q}_i)^2}{\sum (q_i - \bar{q}_i)^2} \quad (9)$$

onde q_i é vazão observada, \hat{q}_i é a vazão modelada e \bar{q}_i é a vazão média da série de vazões observadas.

3.7 – Modelo Acoplado Atmosférico / Chuva-Vazão

Os procedimentos utilizados para a realização do Modelo Acoplado Atmosférico / Chuva-Vazão estão ilustrados na figura 3 por meio de um diagrama esquemático. Este diagrama representa o acoplamento entre a modelagem dinâmica da atmosfera e a modelagem hidrológica usada neste estudo.

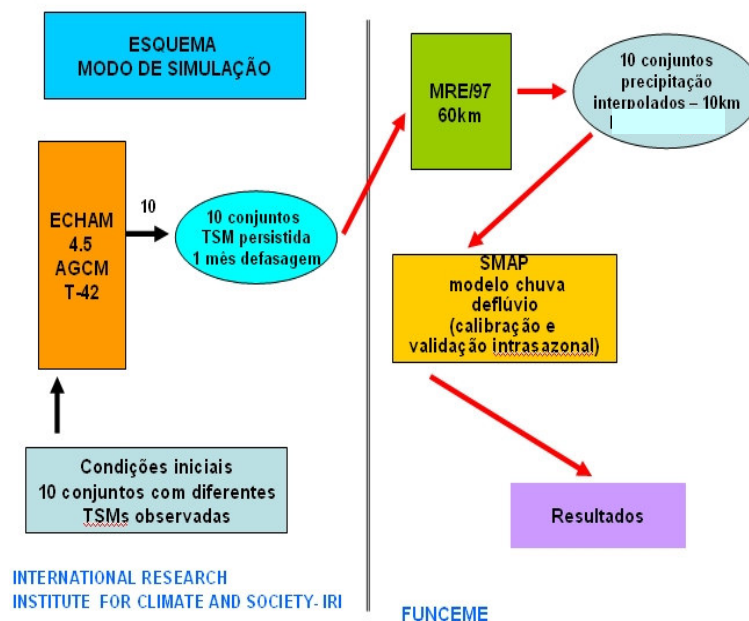


Figura 3 – Esquema representativo do acoplamento entre a modelagem dinâmica da atmosfera e a modelagem hidrológica.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Precipitação

Os resultados mostraram, para os meses de janeiro a junho (tabelas não mostradas) que os parâmetros estatísticos usados na avaliação de desempenho da precipitação mensal média na área da bacia do posto fluviométrico de Cachoeira Manteiga com os dados corrigidos pelas PDFs e os dados sem correção usando a simulação do MRE para todo o período de simulação (1981-2000) e para os anos de contrastes climáticos apresentaram algumas diferenças marcantes. Quanto a correlação, não aparecem diferenças muito significativas no coeficiente de correlação e na razão entre os desvios padrões, embora que os valores são um pouco maiores em magnitude com os dados de precipitação corrigidos. Diferenças expressivas em magnitudes são verificadas em todos os meses e os períodos de análises quando se comparam a *bias*, e os erros médios quadráticos e erros médios absolutos, notando-se uma vantagem no uso da correção dos dados de precipitação pelas PDFs que aproximam os dados simulados pelo MRE as observações. Há uma redução significativa destes parâmetros quando se compara os dados corrigidos pelas PDFs.

A tabela 1 mostra a síntese entre os meses de janeiro a junho na avaliação de desempenho da precipitação mensal média na área da bacia do posto fluviométrico de Cachoeira Manteiga com os simulados pelo MRE sem correção e com os seus dados corrigidos pelas PDFs (1981-2000) e para os anos de contrastes climáticos. Como na análise, mês a mês apresentada anteriormente, notou-se que houve um ganho significativo quando se usou as correções na precipitação entre o observado e o modelado. Quanto aos anos de contrastes climáticos, embora a amostra de anos, seja pequena para se extrair conclusões mais categóricas pode-se verificar que os anos de La Niña e Normais, são as composições de anos melhores simulados pelo MRE com seus dados corrigidos pelas PDFs.

Tabela 1 - Estatísticas entre a precipitação média na bacia do posto fluviométrico de Cachoeira da Manteiga (período de janeiro a junho) observada e a simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs para o período de 1981-2000 e anos de contrastes climáticos.

	Precipitação (MRE)				
	r	bias	ra	EQM	EABM
1981-2000	0,22	92,84	1,16	137,83	93,52
La Niña	0,19	76,76	1,1	116,31	76,76
El Niño	0,12	117,38	1,13	162,61	117,38
Normais	0,34	89,74	1,26	137,27	92,01
	Precipitação (PDFs)				
	r	bias	ra	EQM	EABM
1981-2000	0,26	-12,67	0,95	94,39	0,74
La Niña	0,19	-33,33	0,94	88,3	0,96
El Niño	0,17	16,85	0,85	101,2	17,29
Normais	0,41	-14,64	1,06	95,17	2,99

4.2 – Calibração do modelo chuva-vazão SMAP

A bacia de contribuição para o posto fluviométrico Cachoeira Manteiga conta com uma área de influência de 106.749 km² e através da calibração no período de janeiro de 1981 a dezembro de 2000 obteve como parâmetros ótimos: SAT = 5000; PES = 4,553058; CREC = 3,750765; K= 3; TUin = 80; e EBin = 0,3, com uma eficiência de Nash-Sutcliffe igual a 0,26. Os hidrogramas das vazões observadas e calculadas podem ser observados na figura 4. Nota-se nesta figura que alguns picos da vazão observada foram subestimados pela modelagem, enquanto os picos com vazões menos intensas foram melhores simulados. Estas características devem estar associadas à função de calibração, principalmente o Nash-Sutcliffe, que é mais sensível a diferenças aos picos de vazões máximas (Tucci, *et al.* 2005).

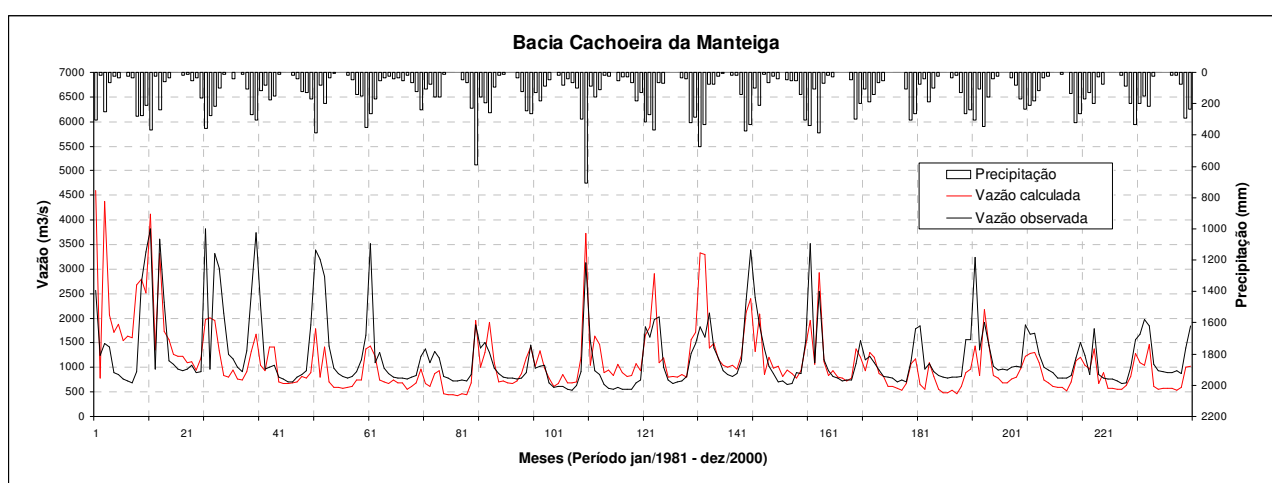


Figura 4 – Hidrograma das vazões mensais observadas e calculadas (janeiro a dezembro) médias na bacia do posto fluviométrico de Cachoeira da Manteiga com período de calibração de janeiro de 1981 a dezembro de 2000.

4.3 – Resultado do acoplamento entre o downscaling de precipitação e o modelo chuva-vazão

A estimativa da vazão com o modelo SMAP usando de entrada da precipitação simulada pelo MRE sem correção é mostrada na figura 5, no período de janeiro de 1981 a dezembro de 2000 usando os parâmetros ótimos: SAT = 5000; PES = 4,553058; CREC = 3,750765; K= 3; TUin = 80; e EBin = 0,3, calibrados no período janeiro de 1981 a dezembro de 2000. Nesta figura nota-se um erro sistemático de superestimativa da vazão estimada em relação à observada em todo o período de estudo. Esta característica deve-se ao *bias* úmido de precipitação do MRE sobre o NEB comparado a precipitação observada (Alves *et al.*, 2007). Isto também, refletiu em um baixo coeficiente de Nash-Sutcliffe igual a -23,24. Essa característica segundo Tucci *et al.* (2005), se deve a função objetivo de calibração que é muito sensível a variação quadrática das vazões mais intensas. Esses resultados foram similares aos encontrados em Marengo *et al.* (2005) e Tucci *et al.* (2005) para a bacia hidrográfica do médio baixo São Francisco localizada no semi-árido Nordeste. Em seus

estudos esses autores mostram que os resultados de simulações/previsões de vazões com o uso de modelagem dinâmica apresentam resultados promissores, mais quantitativamente os erros são ainda significativos em alguns anos quando comparados as vazões observadas (Alves *et al.*, 2007).

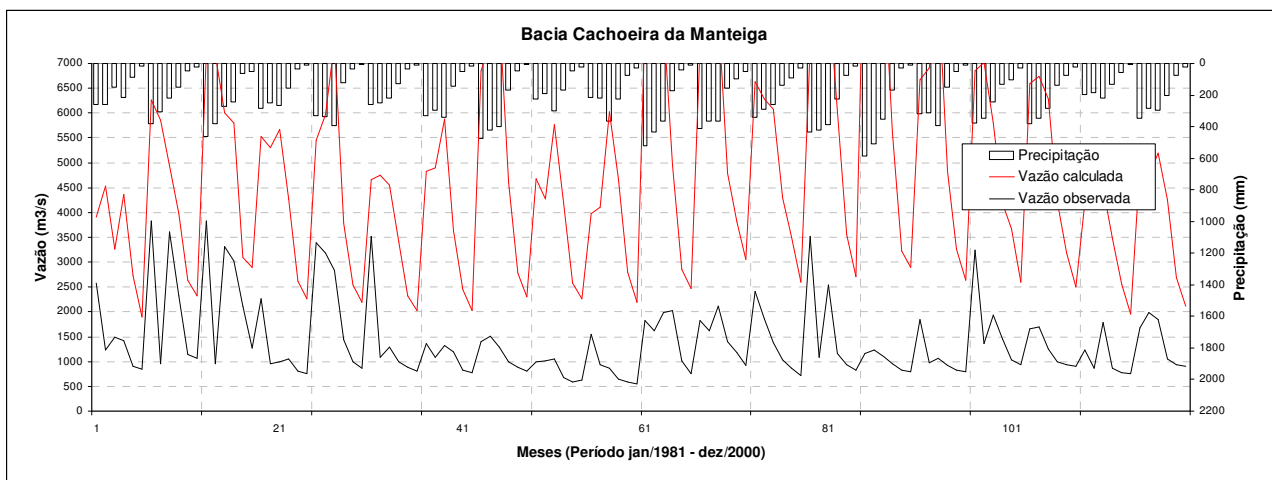


Figura 5 – Hidrograma de vazões mensais observadas e calculadas (janeiro a junho) médias na bacia do posto fluviométrico de Cachoeira da Manteiga calibrados pelo modelo SMAP, tendo como dados de precipitação, os simulados pelo MRE sem correção no período de janeiro de 1981 a dezembro de 2000.

A figura 6 mostra a estimativa de vazão obtida pelo SMAP com os dados de entrada de precipitação do MRE corrigido pelas PDFs. Observa-se um melhor desempenho da simulação da vazão com a correção. Houve uma diminuição do erro sistemático, verificado na figura 5 sem correção. O valor da eficiência de Nash-Sutcliffe foi igual a $-0,1690$. Nota-se também que as vazões menos intensas foram mais bem simuladas. Alguns picos de vazões observadas na bacia não foram bem capturados na simulação, mesmo com a correção nos dados de precipitação.

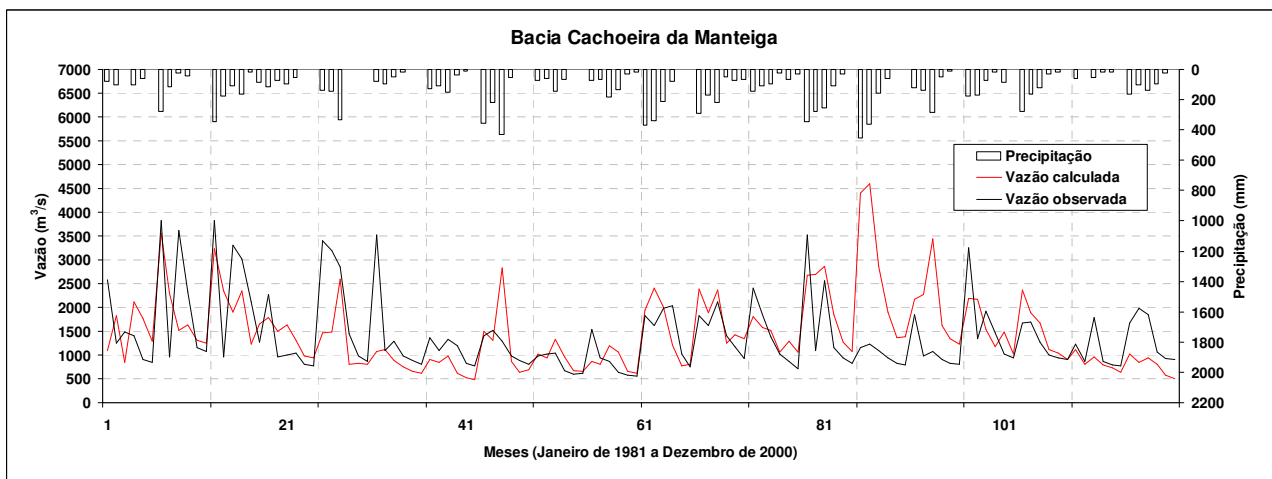


Figura 6 - Hidrograma de vazões mensais observadas e calculadas (janeiro a junho) médias na bacia do posto fluviométrica da Cachoeira da Manteiga e calibrados pelo modelo SMAP, tendo como dados de entrada a precipitação simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs no período de 1981 a dezembro de 2000.

As figuras 7, 8 e 9 mostram a variabilidade interanual nos anos de contrastes climáticos do *bias* (viés) mensal janeiro a junho entre a vazão estimada pelo SMAP tendo com entrada os dados de precipitação média na bacia do posto fluviométrico de Cachoeira da Manteiga simulada pelo MRE e seus valores corrigidos pelas PDFs e a observada. É notório nessas figuras, principalmente, nos meses de fevereiro a maio que a magnitude da anomalia do erro, ano longo dos anos é menor quando os valores de precipitação foram corrigidos, mostrando o ganho potencial da correção pela PDFs na precipitação simulada na bacia, cuja influência é repassada ao modelo chuva-vazão. Outra característica interessante em todos os meses e anos de contrastes climáticos que as vazões tendo como entrada a precipitação do MRE sem correção sempre superestimaram as observações.

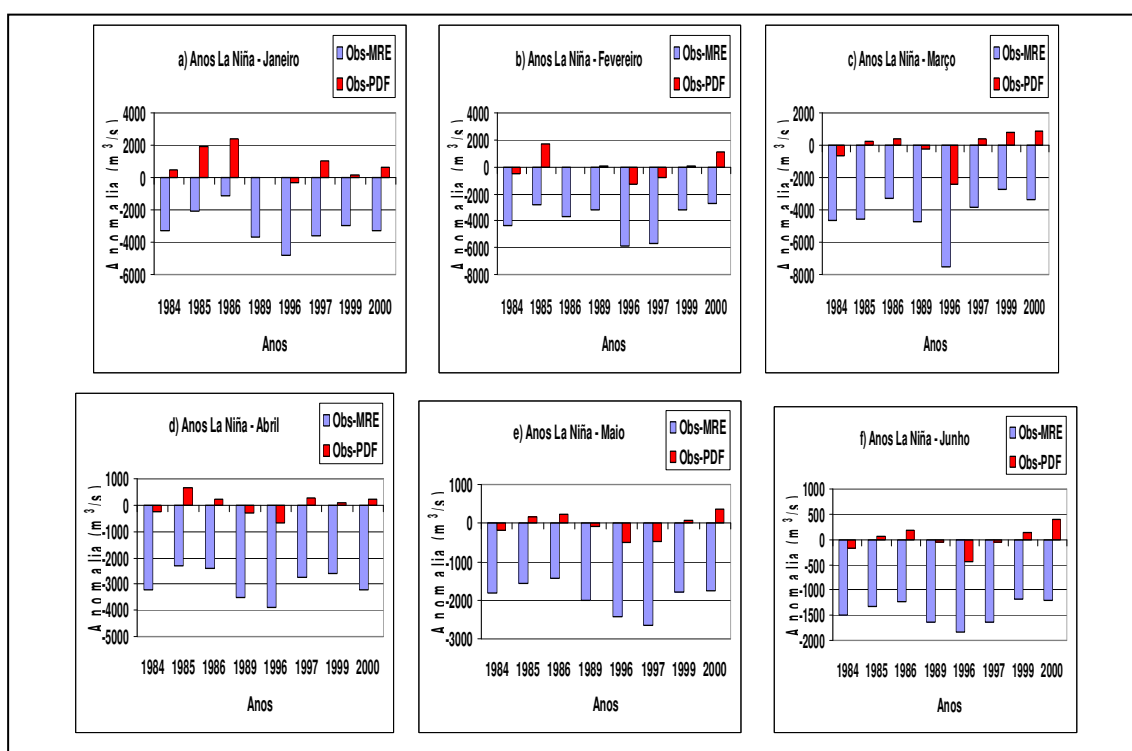


Figura 7 – Anomalia de vazões mensais (m^3/s) para os anos de La Niña médios na bacia do posto fluviométrico de Cachoeira da Manteiga estimadas pelo modelo SMAP tendo com entrada os dados de precipitação simulados pelo MRE e seus valores corrigidos pelas PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e maio e f) junho.

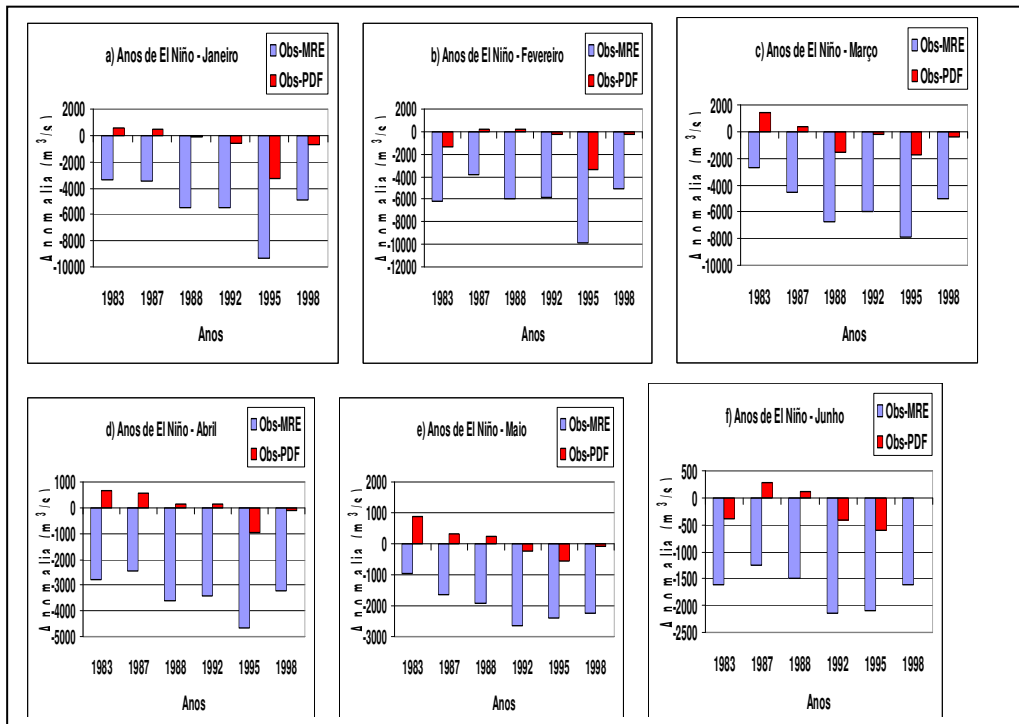


Figura 8 – Anomalia de vazões mensais (m^3/s) para os anos de El Niño médios na bacia do posto fluviométrico de Cachoeira da Manteiga estimadas pelo modelo SMAP tendo com entrada os dados de precipitação simulados pelo MRE e seus valores corrigidos pelas PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e maio e f) junho.

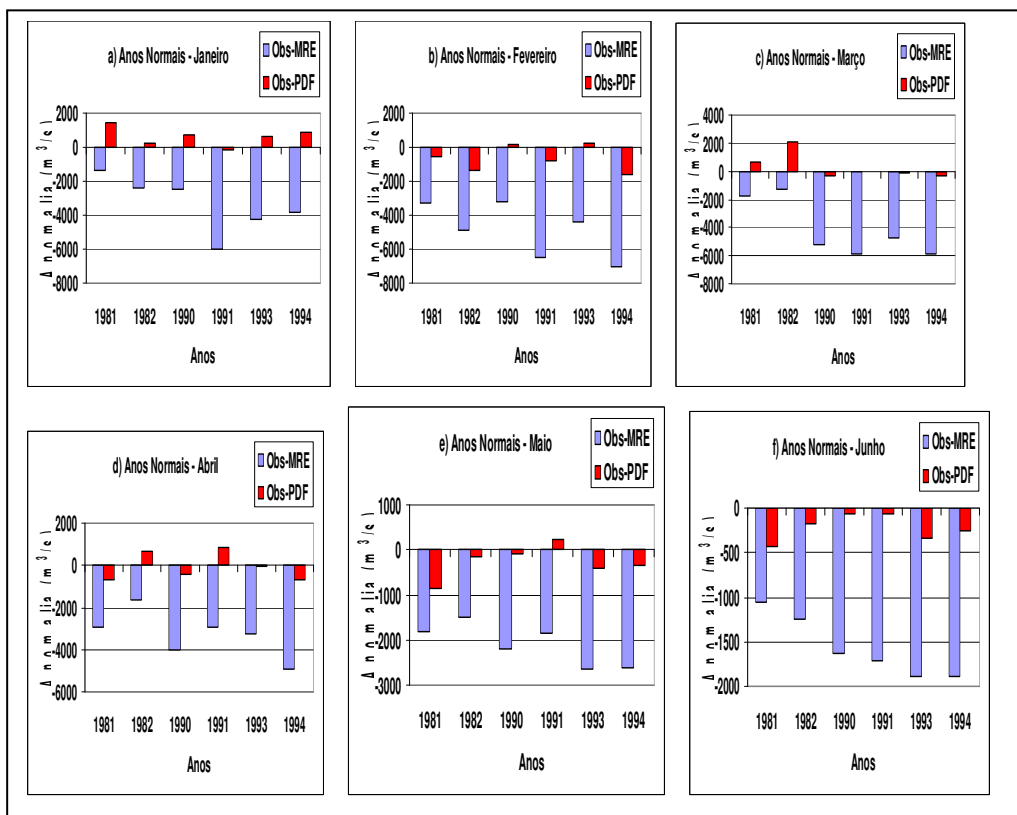


Figura 9 – Anomalia de vazões mensais (m^3/s) para os anos Normais médios na bacia do posto fluviométrico de Cachoeira da Manteiga estimadas pelo modelo SMAP tendo com entrada os dados de precipitação simulados pelo MRE e seus valores corrigidos pelas PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e maio e f) junho.

A tabela 2 mostra a síntese entre os meses de janeiro a junho na avaliação de desempenho da vazão mensal média na área da bacia do posto fluviométrico de Cachoeira da Manteiga estimada pelo SMAP tendo como entrada os dados de precipitação simulados pelo MRE e seus valores corrigidos pelas PDFs (1981-2000) e para os anos de contrastes climáticos. Como na análise, mês a mês apresentada para a precipitação, também pode se notar como para a precipitação que houve um ganho significativo quando se usou as correções na precipitação quando se comparou a vazão observada e a simulada, os erros são bem menores. Quanto aos anos de contrastes climáticos, a correção de precipitação também se refletiu na vazão estimada, embora a amostra de anos seja pequena para se extrair conclusões mais categóricas, pode-se verificar na tabela abaixo que os anos de La Niña e Normais, foram às composições que tiveram vazões melhores simuladas pelo SMAP com os dados de entrada do MRE corrigidos pelas PDFs.

Tabela 2 - Estatísticas entre a vazão média do posto fluviométrico de Cachoeira Manteiga (período de janeiro a junho) observada e estimada pelo modelo SMAP tendo como variável de entrada a precipitação de simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs para o período de 1981-2000 e anos de contrastes climáticos.

Vazão (MRE)					
	r	bias	ra	EQM	EABM
1981-2000	0,07	3349,12	0,51	3801,39	3349,12
La Niña	0,2	2958,14	0,58	3254,68	2958,14
El Niño	-0,09	3993,36	0,45	4563,57	3993,36
Normais	0,12	3226,17	0,51	3635,71	3226,17
Vazão (PDFs)					
	r	bias	ra	EQM	EABM
1981-2000	0,21	50,22	0,9	834,67	128,17
La Niña	0,13	-125,19	1,01	774,44	45,8
El Niño	0,1	292,09	0,75	1011,38	324,76
Normais	0,47	42,23	1,02	706,9	168,85

5 – CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos as principais conclusões retiradas do estudo foram:

(1) A vazão estimada pelo modelo SMAP, com os dados de precipitação simulados pelo MRE sem correção, mostraram que estas são superestimadas em todo o período de análise, fato que é devido ao *bias* úmido de precipitação em grande parte do NEB simulada pelo MRE, inclusive sobre a área de estudo; (2) Quando se corrigiu os dados de precipitação simulados pelo MRE pelas PDFs foi observada uma melhor concordância entre os dados de vazão mensais simulados e observados na bacia. Os resultados das análises de índices estatísticos mostraram, exceto a razão entre os desvios padrões simulados e observados, foram muito menores em magnitude em todo o período de

análise e nos anos de contrastes climáticos quando os dados do MRE foram corrigidos pelas PDFs; (3) Apesar do conceito da simulação climática de precipitação não conter uma possível variabilidade intrasazonal dessa variável (eventos que ocorrem na escala de um mês), foi observado que a simulação dos dados de precipitação do MRE quando usados como dados de entrada para o modelo chuva-vazão corrigidos pelas PDFs sugerem um potencial para estimativa de vazão mensal nesta sub-bacia do posto fluviométrico de Cachoeira Manteiga; (4) Embora os resultados sejam simulações e não previsões de precipitação, estes mostraram que modelos atmosféricos regionais quando alinhados em MCGAs, apresentaram resultados promissores na estimativa de precipitação na escala de uma bacia hidrográfica, e quando têm seus dados corrigidos se aproximam das observações pluviométricas na bacia, de modo que melhoram consideravelmente a estimativa na vazão na bacia em estudo. Isto sugere que o aproveitamento de simulação/previsão de precipitação resultante de modelagem dinâmica como dados de entrada em modelos chuva-vazão na escala intrasazonal pode ser utilizado como metodologia para se otimizar o uso da água superficial em bacias hidrográficas do Nordeste e Sudeste do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Um dos autores deste trabalho, o Dr. José Pedro Rebés Lima, agradece o apoio financeiro pelo Fundo Setorial de Energia (CTEnerg), por intermédio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), entidade governamental brasileira promotora do desenvolvimento científico e tecnológico, na forma de bolsa de fixação CNPq/PROSET junto à FUNCEME. Os autores agradecem ainda ao Grupo *Downscaling* da FUNCEME por ceder os dados simulados de precipitação usados no artigo.

BIBLIOGRAFIA

ALVES, J. M. B.; CAMPOS, J. N. B.; NASCIMENTO, L. S. V.; BARROS, F. V. F., 2007. *Estudo Preliminar Intrasazonal do Acoplamento entre Modelagem Dinâmica de Precipitação e Vazão no Nordeste do Brasil*. In Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, São Paulo – SP.

BRILLY, M. Development contemporary hydrological models. Proc. 18th Goljescek Memorial Day. Acta hydrotechnica. 17/26. Ljubljana, Slovenia, p.31-44. 1999.

CARDOSO, A. O.; CLARKE, R. T. & DA SILVA DIAS, P. L. *A case of the use of sea-surface temperatures (SSTs) to obtain predictors of river flows*. In: Regional Hydrological Impacts of Climatic Change – Impact Assessment and Decision Making (ed. By Thorsten Wagener, Stewart Franks, Hoshin V. Gupta, Eva Bøgh, Luis Bastidas, Carlos Nobre & Carlos De Oliveira Galvão), p.231-238. IAHS, n.295, British Library, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2005.

COLLISCHONN, W. *Simulação hidrológica de grandes bacias*. Porto Alegre: UFRGS. Tese. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 194p. 2001.

- DA SILVA, A. M.; YOUNG, A. C. e LEVITUS, S. *Algorithms and Procedures*, vol.1, Atlas of Surface Marine Data. Maryland, National Oceanic and Atmospheric Administration, 83 pp. 1994.
- GALVÃO, C. O. *Aplicabilidade em Recursos Hídricos da previsão de precipitação de longo prazo no Nordeste do Brasil*. Tese, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. 1999.
- GALVÃO, C. O.; NOBRE, P.; BRAGA, A. C. F. M.; DE OLIVEIRA, K. F.; MARQUES, R.; DA SILVA, S. R.; FILHO, M. F. G.; SANTOS, C. A. G.; LACERDA, F. & MONCUNNIL, D. *Climate predictability, hydrology and water resources over Nordeste Brazil*. In: Regional Hydrological Impacts of Climatic Change – Impact Assessment and Decision Making (ed. By Thorsten Wagener, Stewart Franks, Hoshin V. Gupta, Eva Bøgh, Luis Bastidas, Carlos Nobre & Carlos De Oliveira Galvão), p.211-220. IAHS, n.295, British Library, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2005.
- JUANG, H. M. H.; KANAMITSU, M. The NMC nested regional spectral model. **Monthly Weather Review**, v.122, p.3-26. 1994.
- KNOWLES, N.; CAYAN, D. R. *Global climate change: potential effects on the Sacramento – São Joaquim watershed and the São Francisco estuary*. <http://www//meteo.uscd.edu/~knowles/papers/globaland California.pdf>. 2001.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM, 2006. *Projeto PROÁGUA / SEMI-ÁRIDO - PRIMEIRA ETAPA DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS. Relatório Técnico 2*. Contrato Agência Nacional de Águas – ANA, Governo do Estado de Minas Contrato nº 010/2006, Setembro/2006, Rev 01.1
- LOPES, J. E. J.; BRAGA JR. B. P. F.; CONEJO, J. G. L. “*Simulação hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado*”. In: Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v.2, p.42-62. Fortaleza-Ce. 1981.
- MARENGO, J. A. *Observed and modelled historical hydroclimatic variability in South America: cases of the Amazon, São Francisco and Paraná-La Plata rivers*. In: Regional hydrological Impacts of Climatic Change-Hydroclimatic Variability. Proceedings of Symposium S6 held during Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu. Brazil. April 2005. IAHS –publ. 296, p.7-20. 2005.
- MARENGO, J. A.; SAMPAIO, G.; CHOU, S. C.; SILVA DIAS, P. L. *et al. Previsão de vazões de longo prazo na bacia do Rio São Francisco I: Previsão da precipitação*. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Submetido, 12p. 2005.
- MILLER, N. L.; KIM, J.; HARTMAN, R. K.; FARRARA, J. Downscaling climate on stream flow study on Southwestern on Unite States. *Journal American Water Resources Association*, 35, p.1525-1537. 1999.
- NASH, J. E.; SUCTCLIFFE, J. River flow forecasting through conceptual models. **Journal of Hydrology**, v.10, p.282-290. 1970.
- NOBRE, P.; A. D. MOURA.; L. SUN. Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP’S Regional Spectral Model at IRI. *Bull. Amer. Meteor. Socie.*, v.82, p.2787-2796. 2001.
- OLIVEIRA, K. F. Previsão de vazão em uma bacia do semi-árido usando previsões climáticas numéricas de precipitação. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental.

Universidade Federal de Campina Grande. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande-PB. 77p. 2006.

PHILANDER, S. G. *El Niño, La Niña, and Southern Oscillation*. Acad. Press, 289pp. 1990.

REIS JUNIOR, D. S. MARTINS, E. S. R.; NASCIMENTO, L. S.; COSTA, A. A. *Previsões sazonais de vazão no Estado do Ceará*. In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. 20p. 2006.

REYNOLDS, R. W.; SMITH, T. M. *Improved global sea surface temperature analysis using optimum interpolation*. **Journal of Climate**, v.7, p.929-948. 1994.

ROECKNER, E. *The atmospheric general circulation model ECHAM4: model description and simulation of the present-day climate*. Max Planck Institut für Meteorologie, Report n.218, Hamburg, Germany, 90. 1996.

SAREWITZ, D.; PIELKE, Jr. R. A. Prediction and science and policy. In: SAREWITZ, D., D.; PIELKE, Jr., BIERLY, Jr., R. (Ed.). Prediction, science, decision, making, and future change. Washington, DC: Island Press.

SERVAIN, J. *Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications*, **Journal of Geophysical Research**., 96(C8), 15137-15146, 10.1029/91JC01046, 1991.

SILVA FILHO, V. P. *Previsão de vazão no Semi-Árido Nordestino, utilizando modelos atmosféricos: Um estudo de Caso*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Fortaleza-Ce. 105p. 2005.

SOUZA, E. B. *Um estudo observacional sobre o Padrão de Dipolo de anomalias de TSM no Oceano Atlântico Tropical*. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. INPE, São José dos Campos -SP, 1997. 138p. (INPE-6392-TDI/608).

SUN, L.; MONCUNNIL, D. F.; LI, H.; MOURA, A. D.; FILHO, F. D. D. S. *Climate downscaling over Nordeste Brazil using NCEP RSM97*. **J. Climate**, v.18, p.551-567. 2005.

TRENBERTH, K. E. *The definition of El Niño*. Bull. **Amer. Meteor. Socie.**, n.78, p.2771-2777. 1997.

TUCCI, C. E. M.; CLARK, R. T.; COLLISCHONN, W.; DIAS, P. L. S.; SAMPAIO, G. O. *Long term flow forecast based on climate and hydrological modeling: Uruguay river basin*. **Water Resources Research**, v.39, n.7, p.3(1-11). 2003

TUCCI, C. E. M.; SILVA, B. C. DA; COLLISCHONN, W. et al. *Previsão de vazão de longo prazo na bacia do Rio São Francisco III: Previsão de vazão*. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. 13p. Submetido 2005.

WILBY, R. L; DETTINGER, M. D. Stream flow in Sierra Nevada, California, simulated using statistically downscaled general circulation model output. In Linking Climate Change to Land Surface Change, Ed. S. MacLaren and D. Kniven, Kluwer Academic. Pub., 99-121.

XU, Z.; ITO, K.; LI, J. Risk estimation for flood and drought: case studies. In: MARÍÑO, M. A. SIMONOVIC, S. P (Eds). Integrated water resources management. IAHS 272., p.333-339. 2001.