

Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos

Benedito C. da Silva, Carlos E. M. Tucci, Walter Collischonn

Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH – UFRGS

silvabenedito@uol.com.br, tucci@iph.ufrgs.br, collischonn@uol.com.br

Recebido: 11/05/05 revisado: 30/11/05 aceito: 07/03/06

RESUMO

A previsão de vazão é utilizada em diferentes áreas da gestão dos recursos hídricos para minimizar as incertezas da variabilidade climática. A previsão de vazão pode ser realizada com base na vazão do próprio local, de um posto a montante ou à partir da precipitação conhecida e/ou prevista. A previsão da vazão com base na precipitação permite uma antecedência maior, mas exige modelos mais sofisticados e investimento em monitoramento. A previsão pode ser realizada em curto prazo, horas ou dias de antecedência, e em longo prazo, de 1 a 9 meses. Os modelos utilizados na previsão podem ser empíricos ou conceituais. Os primeiros estabelecem procedimentos matemáticos para relacionar as variáveis, sem estabelecer relações físicas de comportamento e os segundos utilizam-se do conhecimento físico para estabelecer as previsões. Nos modelos de previsão de vazão procura-se obter a variável com uma antecedência t no futuro a partir do tempo t . Neste instante são conhecidas as variáveis como a vazão no local e a precipitação até o tempo t . A precipitação futura, entre t e $t+t$ não é conhecida e afeta os resultados a partir do tempo de concentração da bacia. Os modelos hidrológicos têm utilizado artifícios como geração estocástica de precipitação ou mesmo admitir a precipitação nula neste período. Com o aprimoramento dos modelos atmosféricos nos últimos anos para a estimativa da precipitação, criou-se a oportunidade de ampliar a antecedência da previsão hidrológica desde que a precipitação citada possa ser prevista de forma confiável pelos modelos atmosféricos. Neste artigo são apresentados os principais procedimentos utilizados na previsão integrada de modelos atmosféricos e hidrológicos, para prever a vazão e diminuir a incerteza e o risco dos usos da água e da conservação ambiental. Este é um desafio atual e interdisciplinar que tem vários objetivos práticos de curto e longo prazo para os resultados da previsão.

Palavras-chave: previsão de vazão, previsão de precipitação, modelos hidrológicos, modelos atmosféricos.

PREVISÃO DE VAZÃO

Introdução

A previsão de vazão num sistema hídrico envolve a estimativa do escoamento com antecedência no tempo. A previsão de vazão é uma das medidas utilizadas no gerenciamento dos recursos hídricos para minimizar as incertezas do clima. Vários usos da água como abastecimento de água, irrigação, navegação, hidrelétricas, inundações e conservação ambiental dependem da quantidade de água disponível nos rios. A previsão de vazão pode ser realizada em *curto prazo* com antecedências de poucas horas até cerca de 14 dias e em *longo prazo* com antecedência de até nove meses (Georgakakos e Krysztowicz, 2001).

Nos modelos de previsão de vazão procura-se obter a variável com uma antecedência t no futuro a partir do tempo t . Neste instante são conhecidas as variáveis como a vazão no local e a precipitação até o tempo t . A precipitação futura, entre t e $t+t$

não é conhecida e afeta os resultados a partir do tempo de concentração da bacia. Os modelos hidrológicos têm utilizado artifícios como geração estocástica de precipitação ou mesmo admitir a precipitação nula neste período. Com o aprimoramento dos modelos atmosféricos nos últimos anos para a estimativa da precipitação, criou-se a oportunidade de ampliar a antecedência da previsão hidrológica desde que a precipitação citada possa ser prevista de forma confiável pelos modelos atmosféricos.

Previsão de curto prazo

Usualmente, a previsão de curto prazo é utilizada para minimização dos danos provocados por enchentes (Hsu et al., 2003; Koussis et al., 2003), tanto em planejamento de zonas urbanas ou em sistemas de alerta, mas também pode ser empregada em conjunto com atividades como a geração de energia (Collischonn et al., 2005), navegação, irrigação e abastecimento de água.

A previsão de curto prazo pode ser classificada como contínua ou eventual. Quando a previsão é realizada ao longo do tempo, independentemente das condições hidrológicas, a mesma é dita contínua. A previsão eventual é realizada em épocas definidas do regime hidrológico, enchentes ou estiagens em que as condições são críticas para o usuário da água (Tucci e Collischonn, 2003).

A previsão de curto prazo pode ainda ser classificada de acordo com a antecedência desejada e as características da bacia que drena para o local de interesse (Lettenmaier e Wood, 1993). A antecedência de previsão com base na precipitação conhecida depende do tempo de concentração da bacia. Quando este tempo é pequeno a antecedência que pode ser obtida com um modelo chuva-vazão é também pequena. Em bacias com tempo de concentração maior é possível utilizar a observação do nível, ou da vazão, em locais a montante para efetuar a previsão, pois a antecedência devida ao tempo de propagação das vazões ao longo do rio pode ser suficiente para as medidas operacionais mencionadas. A maior vantagem de se utilizar um posto a montante, é que, normalmente, os erros de previsão são menores que aqueles da previsão de um modelo chuva-vazão (Tucci e Collischonn, 2003).

As características geológicas e pedológicas das bacias também são importantes na definição do tipo de previsão que pode ser realizada. Bacias com solos e rochas permeáveis favorecem a infiltração da água e geram menos escoamento superficial. Os rios de bacias com estas características têm variações lentas da vazão, ou seja, apresentam grande memória. Bacias com solos rasos e com rochas pouco permeáveis tendem a gerar mais vazão superficial, que escoam mais rapidamente, apresentando memória curta.

Previsão de longo prazo

A previsão de longo prazo (até 9 meses) é freqüentemente, é utilizada para propósitos de planejamento e operação dos recursos hídricos (Wood, et al. 2002), tais como alocação de água para irrigação, operação de reservatórios de usinas hidrelétricas (Anderson et al., 2002; Hamlet et al., 2002), avaliação e implementação de medidas contra secas e inundações (Changnon e Vonnahme, 2003), recursos pesqueiros (Neal et al., 2002), abastecimento de água (Chiew, et al., 2003) e agricultura (Wernstedt e Hersh, 2002).

Até alguns anos atrás, a previsão de longo prazo confiável, para fins práticos, era possível somente onde a vazão futura possui maior dependên-

cia da água armazenada na bacia do que das condições meteorológicas futuras, principalmente da precipitação (Lettenmaier e Wood, 1993). O conhecimento das condições climáticas futuras, para antecedências de alguns meses, era possível somente com pequeno nível de precisão (Gilman 1985), não agregando melhora na previsão de vazão.

Em anos recentes ampliou-se largamente o entendimento das conexões entre as anomalias climáticas de grande escala e os eventos hidrológicos, de seca ou inundação, em todo o globo. Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos buscando entender estas conexões e, por conseqüência, propondo metodologias de previsão baseadas em indicadores da Temperatura na Superfície do Mar (TSM), como El Niño, La Niña e *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) (Maurer e Lettenmaier, 2003; Wernstedt e Hersh, 2002; Neal et al., 2002).

Com o melhor conhecimento das conexões climáticas globais e os avanços na simulação numérica de precipitação (Collier e Krysztofowicz, 2000; Golding, 2000), ampliou-se largamente as possibilidades de uso da previsão climática de longo prazo. Estudos realizados em bacias brasileiras (Tucci et al., 2003) mostram que existe grande potencial de benefício na previsão realizada através da integração de modelos determinísticos hidrológicos e climáticos. Estes benefícios são particularmente interessantes no Brasil, em que a matriz energética é, predominantemente, baseada em energia hidráulica. A previsão de longo prazo permite a estimativa de aflúências aos reservatórios hidrelétricos, possibilitando planejar a sua melhor operação e, eventualmente, antecipar a formação de preço da energia.

MODELOS DE PREVISÃO DE VAZÃO

Conforme já mencionado, a previsão pode ser realizada por modelos empíricos e conceituais. Os modelos empíricos utilizam relações matemáticas entre as variáveis, sem relação com os processos físicos, para previsão, enquanto que os modelos conceituais utilizam conhecimento dos processos físicos para a previsão. As vantagens dos modelos empíricos são a rapidez na elaboração e a facilidade na atualização dos parâmetros em tempo real, enquanto que os modelos conceituais têm maior capacidade de extrapolação e tratamento das variantes hidrológicas.

Os modelos conceituais podem ser distribuídos ou concentrados. Os modelos distribuídos permitem melhor descrever a variabilidade espacial dos processos e das variáveis de entrada. Os modelos conceituais hidrológicos possuem dois componen-

tes, ou módulos, principais: (a) transformação chuva-vazão; (b) propagação em rios e reservatórios;

Entre as variáveis de resposta utilizadas estão o nível da água e a vazão no próprio local em que se deseja obter a previsão. Assim, para as previsões de curto prazo os principais procedimentos que têm sido empregados são os seguintes (Tucci, 1998): i) Previsão da vazão com base em níveis ou vazões do rio, a montante e nos seus afluentes; ii) Estimativa da precipitação com base em radar e rede telemétrica de pluviógrafos, integrados a um modelo precipitação-vazão; iii) Estimativa da precipitação com base em rede telemétrica e transformação em vazão através de modelo hidrológico; iv) Previsão meteorológica da precipitação, integrada a um modelo precipitação-vazão, para estimar a vazão ou o nível; v) Previsão da vazão com base em níveis ou vazões a montante, e com uma das alternativas ii, iii ou iv para a bacia de contribuição lateral.

Para as previsões de longo prazo, dentre os principais procedimentos empregados pode-se citar:

- I. Estimativa da vazão para o período de estiagem com base no volume armazenado na bacia durante o período úmido, empregando-se equações empíricas para representar a fase de recessão do hidrograma;
- II. Predição de estatísticas locais, tais como média e desvio padrão;
- III. Modelos estocásticos, que consideram correlações temporais e sazonais; iv) Previsão climática da precipitação, integrada a um modelo precipitação - vazão;

Em cada uma destas possibilidades existem diferentes modelos que podem ser combinados para previsão de vazão. Os modelos conceituais podem também ser utilizados em combinação com modelos empíricos.

Para que a formulação de um modelo de previsão de vazões seja completa, sua estrutura deve ser adaptada para incluir procedimentos de atualização durante o processo de previsão. Em virtude do caráter “on-line” das previsões, o operador está constantemente recebendo dados observados que podem ser usados para avaliação do desempenho do modelo e para atualização do estado do sistema simulado. Normalmente, os procedimentos usados permitem uma atualização recursiva de estados e parâmetros, baseados nos dados observados de variáveis como a precipitação, temperatura, vazão, volume armazenado e umidade do solo (Hsu et al., 2003).

PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO

Classificação

A previsão quantitativa de precipitação pode ser classificada, em termos de tempo de antecedência, como sendo: i) “*nowcasting*”, para tempos entre 0 e 6 horas à frente; ii) *previsão de curto prazo*, para antecedências entre 6 e 24 horas; iii) *previsão de médio prazo*, quando a antecedência se situa entre 2 e 14 dias; iv) *previsão de longo prazo*, para tempos futuros entre 1 e 24 meses. Esta classificação pode ser resumida, conforme a utilizada para previsão de vazão, que considera somente *previsão de curto prazo* (0 a 14 dias) e *previsão de longo prazo* (até 9 meses) (Collier e Krzysztofowicz, 2000 e Golding, 2000).

Previsibilidade atmosférica

De acordo com Kimura (2002), a previsão numérica de tempo foi sugerida pela primeira vez em 1922, por Lewis F. Richardson, que propôs prever mudanças na circulação da atmosfera pela integração numérica das equações de mecânica dos fluidos que governam tais processos, ou seja, as equações de Navier-Stokes, a equação da continuidade, primeira lei da termodinâmica e Lei dos gases ideais (McGuffie e Henderson-Sellers, 1997). Mas, somente em 1950, com a utilização do computador é que se conseguiram os primeiros resultados de previsão bem sucedida. E, desde então, técnicas numéricas cada vez mais sofisticadas foram implementadas, acompanhando os desenvolvimentos dos computadores eletrônicos e dos métodos de observação do tempo. Atualmente, simulações em computador são realizadas diariamente em diversos centros de meteorologia de todo o globo, para prever o estado futuro da atmosfera, com antecedências que vão de alguns dias até mais de 50 anos.

Entretanto, os processos que envolvem a circulação geral da atmosfera são extremamente complexos e, devido ao seu comportamento caótico, sua evolução no tempo não pode ser determinada de forma completa (Marengo et al., 2003; Stockdale, 2000). De acordo com a teoria do caos (Lorenz, 1973), as componentes das forças internas do sistema atmosférico podem, potencialmente, serem previstas com antecedência de até cerca de 14 dias, ou seja, não é possível fazer previsões de tempo para meses ou anos no futuro, no sentido de se obter uma seqüência correta de eventos atmosféricos, dia após dia.

Por isso, é importante neste ponto fazer uma distinção entre os dois tipos de previsão atmos-

férica: i) a *previsão de tempo*, que se refere a previsão feita para até 14 dias de antecedência; ii) e a *previsão de clima*, que indica a previsão para antecedências maiores, normalmente meses no futuro. Nos itens seguintes são apresentadas algumas considerações importantes, para o melhor entendimento das diferenças entre a previsão de tempo e a previsão de clima.

Previsão de tempo

Atualmente, os princípios básicos da previsão numérica de tempo são exatamente os mesmos propostos por Richardson (Kimura, 2002), ou seja, a evolução temporal da atmosférica é calculada resolvendo-se numericamente as equações que descrevem os processos de circulação, com as condições iniciais fornecidas através de uma extensa rede meteorológica de observação.

Previsões de tempo, ou seja, estimativas do estado da atmosfera em alguns dias no futuro, são feitas diariamente em diversos países, utilizando diferentes modelos. Para que isso seja possível, são coletados dados da superfície terrestre e de diferentes camadas da atmosfera, através de medições em estações na superfície, balões meteorológicos, aviões, radares, navios, bóias oceânicas e satélites. Esses dados são armazenados em formatos padrões e transmitidos via Internet ou pelo Sistema de Global de Telecomunicações (GTS), onde são disponibilizados para os centros nacionais de previsão (Stern e Easterling, 1999).

Os dados coletados são assimilados pelos modelos de previsão atmosférica e realiza-se uma estimativa “ótima” do estado atual da atmosfera, também chamada de “nowcast”. Essa estimativa não é simplesmente a visualização dos dados observados, mas sim uma análise do estado da atmosfera, uma vez que os dados observados são muito esparsos, em diversas regiões do globo, para definição de uma condição inicial adequada aos modelos numéricos. (Stern e Easterling, 1999).

Com essa estimativa o modelo de previsão de tempo é inicializado e faz previsões para até 7 dias no futuro, nos casos mais comuns. Mas em alguns centros as previsões já são feitas operacionalmente para até 15 dias à frente.

Apesar de todos os avanços, a precipitação ainda continua sendo uma das variáveis mais difíceis de prever, uma vez que seus processos possuem grande variabilidade temporal e espacial (Habets, et al., 2004). Golding (2000) afirma que as previsões de precipitação com maior nível de precisão são aquelas feitas para antecedências entre 6 horas e 2

dias e, portanto, são as que possuem maior utilidade.

Entretanto, cabe ressaltar que os progressos na previsão de tempo têm sido bastante acelerados nos últimos anos, reduzindo as incertezas e ampliando cada vez mais os limites de utilidade das previsões. A precisão das previsões também pode variar em função do local e das condições atmosféricas no momento da previsão.

Previsão climática

Embora o comportamento caótico da atmosfera imponha limites à previsão determinística de seu estado, é possível identificar pistas que indiquem prováveis padrões de comportamento no futuro (Stockdale, 2000). De forma que a previsão climática, para alguns meses no futuro, pode ser entendida como a previsão de mudanças nas funções distribuição de probabilidades do clima. Isto é possível porque a atmosfera tem grande interação com a superfície, através da troca constante de fluxos de calor, momento e água.

Mudanças na condição da superfície irão causar conseqüentes alterações no estado da atmosfera. Mas, tais mudanças se processam numa velocidade muito menor do que os fenômenos que ocorrem na atmosfera, provocando alterações que somente são perceptíveis no comportamento médio do tempo, ou seja, do clima (Stern e Easterling, 1999)

Sob um ponto de vista global, a TSM é a principal responsável pelas variações no clima, de um ano para outro. A temperatura do oceano é mais estável do que a da superfície terrestre, devido à grande capacidade de calor da água e à eficiência na mistura contínua entre água da superfície e de camada inferiores. Anomalias de TSM são da ordem de 1°C em magnitude, abrangem escalas espaciais de milhares de km e duram entre um e vários meses. Estas são características que fazem com que as anomalias de TSM tenham a capacidade em influenciar o comportamento geral de circulação da atmosfera (Stockdale, 2000; IRI, 2004), particularmente a TSM nas zonas tropicais e nos eventos mais intensos de El Niño (Marengo et al., 2003; Chen et al., 2004). Com isso, a TSM tem sido utilizada em diferentes tipos de modelos de previsão climática de longo prazo.

As principais técnicas utilizadas pelos modelos teóricos, para realizar previsões climáticas baseadas em TSM são (IRI, 2004; Marengo et al., 2003): i) Rodada de controle, que utiliza valores climatológicos de TSM; ii) Anomalias de TSM persistidas: utiliza-se o dado de anomalia de TSM do último mês

observado, somado ao campo médio climatológico de TSM do mês da previsão em questão; iii) Anomalias de TSM previstas pelo modelo acoplado oceano-atmosfera; iv) Previsão de anomalias de TSM de modelos estatísticos.

Pode-se utilizar uma combinação dos três últimos métodos (ii, iii, iv), ou seja, para a mesma previsão usam-se métodos diferentes para determinar a TSM em distintas regiões dos oceanos. Além disso, ao valor de anomalia soma-se o valor correspondente à climatologia de TSM do mês em questão.

Por estas características da previsão climática, embora os modelos atmosféricos gerem previsões com intervalos de até 6 horas, as estimativas operacionais realizadas pelos centros de previsão são, tipicamente, expressas em termos de anomalias climáticas ou “tercis” de probabilidades (próximo da média, abaixo ou acima da média), para cada ponto de grade do modelo e valores médios de 3 meses. Esta convenção tem o efeito de minimizar os erros da previsão, pela redução dos “ruídos” associados à variabilidade no tempo e espaço, que podem mascarar a previsibilidade das variações climáticas sazonais (Hansen e Indeje, 2004).

Previsão estendida de tempo (mensal)

A escala de tempo entre 15 e 30 dias se caracteriza como uma área ainda pouco estudada da previsão atmosférica. Esse horizonte é, provavelmente, curto o suficiente para guardar alguma memória das condições iniciais e também é longo o bastante para que a variabilidade dos oceanos tenha impacto na circulação da atmosfera. Assim, centros como o European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), tem realizado previsões mensais (até 32 dias) através de um sistema que combina características da previsão de tempo tradicional e da metodologia de previsão climática, utilizando as integrações de um modelo acoplado oceano-atmosfera (ECMWF, 2005).

No Brasil, o CPTEC/INPE ampliou o alcance da previsão do modelo global de 12 para 15 dias e, brevemente, será implementado um sistema de previsão de tempo estendida para 35 dias, através de um modelo acoplado oceano-atmosfera (Sampaio, 2005).

Dentre os benefícios da previsão mensal, destaca-se que ajudará na avaliação dos impactos da resolução atmosférica nas previsões sazonais, além de permitir um maior detalhamento do primeiro mês da previsão climática, onde é originada uma

parcela significativa dos erros das previsões de longo prazo (ECMWF, 2005).

Previsão por conjunto (“ensemble”)

A partir dos trabalhos de Lorenz (1973), sabe-se que as equações que representam os movimentos da atmosfera mostram alta sensibilidade às condições iniciais, ou seja, erros pequenos nas condições iniciais podem levar a grandes erros na previsão futura, mesmo que os modelos sejam perfeitos. Isto se deve não somente ao fato de que os modelos numéricos não conseguem reproduzir a grande complexidade dos processos que compõem a evolução das condições atmosféricas, mas também aos erros inerentes à falta de representatividade espacial e temporal dos dados observados que alimentam os modelos (Lorenz 1973; Goddard et al., 2000; CPTEC, 2004; Anderson e Ploshay, 2000, Marengo et al., 2003).

De maneira genérica, uma descrição completa do problema de previsão climática pode ser entendida em termos da evolução temporal de uma função densidade de probabilidade (fdp) do estado da atmosfera (Stockdale, 2000). A Figura 1 mostra uma representação esquemática da previsão por conjunto, na qual o estado inicial da atmosfera é representado por uma função distribuição de probabilidades igual a fdp_0 , resultante das incertezas iniciais. Baseada na “melhor” estimativa deste estado inicial, pode-se produzir uma única previsão (linha mais espessa contínua) que, neste caso, falha em prever o correto estado futuro (linha tracejada). Na mesma figura, uma previsão de conjunto (linhas pretas finas), iniciando de condições iniciais perturbadas, é usada para estimar as probabilidades do estado futuro, representado por fdp_r . Assim, o valor médio dos membros do conjunto será melhor representativo do comportamento observado (linha tracejada).

Para criação de uma previsão por conjunto, supõe-se que os modelos sejam perfeitos, ou seja, considera-se apenas a incerteza nas condições iniciais. Em seguida, busca-se através de técnicas específicas, simular os erros decorrentes das observações para criar um conjunto de condições iniciais perturbadas. Finalmente, o conjunto de previsões é gerado pelo modelo a partir de cada um destes novos cenários perturbados (CPTEC, 2004).

A utilização de dois ou mais modelos é outra forma de obter um conjunto de previsões, que tem sido explorada por alguns centros de previsão. Como exemplo, no International Research Institute for Climate Prediction (IRI) são disponibilizadas previ-

sões climáticas resultantes da combinação das integrações de 4 modelos globais diferentes (IRI, 2004) e, recentemente, o IAG/USP e CPTEC/INPE, em conjunto com outras instituições nacionais e internacionais, implementaram um aplicativo que permite combinar estatisticamente a previsão de diversos modelos (IAG, 2005).

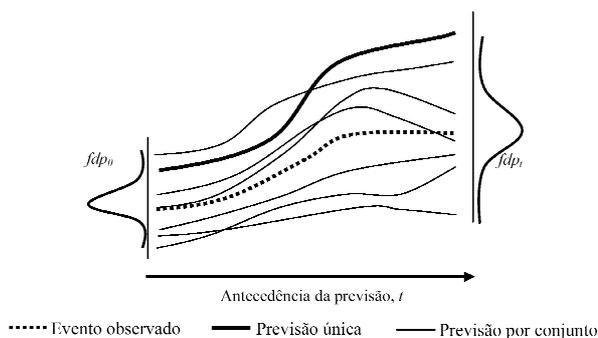


Figura 1 - Representação esquemática do sistema de previsão por conjunto (“ensemble”)

Diversos centros de previsão têm adquirido experiência em previsão por conjunto, desenvolvendo novas ferramentas para análise de dados e produzindo um grande número de trabalhos, demonstrando ser esta uma ferramenta útil para a previsão numérica de tempo e clima (Zhu et al., 2002; Smith et al., 2001; Roebber et al., 2004).

Modelos globais de previsão de precipitação

Os modelos teóricos de previsão atmosférica sofreram grande desenvolvimento nos últimos anos, devido principalmente a avanços nos modelos GCM e ao aumento da capacidade de processamento dos computadores. Recentemente, foram criados grandes experimentos, envolvendo os principais centros de pesquisas mundiais na área, para investigar a capacidade de previsão dos modelos GCM forçados pela TSM (Shukla et al., 2000; Anderson e Ploshay, 2000; Graham et al., 2000), demonstrando o grande interesse científico e da sociedade pelo desenvolvimento de tais modelos.

Os GCM's são modelos matemáticos tridimensionais que consideram os principais processos que governam os movimentos da atmosfera, incluindo suas interações com os oceanos e a superfície dos continentes. Geralmente discretizam o globo em elementos de 50 a 1000 km, na escala horizontal, e 1 a 5 km na vertical. A topografia e os processos físicos

do sistema em cada elemento são valores médios (IRI, 2004, Tucci, 1998).

Dentre as principais limitações destes modelos, pode-se destacar: (i) A discretização retrata somente os processos atmosféricos de macroescala na superfície da terra; (ii) Muitos processos são representados com fortes limitações no modelo, tais como os processos hidrológicos, por exemplo, que variam na microescala. Atualmente existem diversos projetos internacionais que buscam melhorar esta representação (GEWEX, 1998); (iii) O custo e o tempo de processamento para uma discretização mais detalhada destes modelos é extremamente elevado.

Diversos centros de pesquisa atualmente realizam, operacionalmente, previsão de tempo e clima em escala global. No Brasil, o CPTEC/INPE emprega o modelo global CPTEC/COLA, que atualmente faz previsão de tempo com resolução horizontal de 100km e climática com 200km, mas já se encontra em andamento a implementação da previsão de tempo com resolução de 52km e, até o final de 2005, o modelo estará com resolução de 39 km (Sampaio, 2005).

Modelos regionais de previsão (“downscaling”)

O clima regional pode ser controlado por fatores com escala espacial bem menor do que a resolução típica dos modelos globais. As características da topografia, tipo de vegetação e distribuição terra/água podem causar significativa influência no clima regional (Hay e Clark, 2003; Roads et al., 2003).

O custo computacional da previsão por modelo global de alta resolução é elevado. A alternativa é o chamado "downscaling", que utiliza um modelo meteorológico de resolução mais alta (regional), alimentado nas fronteiras pelas condições produzidas pelo modelo global. Conforme representado na Figura 2, o modelo regional usa as condições de fronteira na célula *B* do modelo global (resolução de 200x200 km), para gerar uma simulação com resolução de 40x40 km, internamente a *B*, de forma que o processo de troca de energia entre a atmosfera e a superfície é mais bem descrita que no modelo global. Existe uma série de vantagens práticas em relação aos modelos atmosféricos regionais (Roads et al., 2003; Kerr, 2004). Um dos principais benefícios se refere à possibilidade de aplicar o modelo em regiões específicas, onde existam redes de coleta de dados com maior densidade, permitindo a validação dos modelos e o desenvolvimento de novas técnicas para assimilação de dados observados.

Por representar melhor os processos que atuam regionalmente, acredita-se que os modelos regionais podem produzir previsões de tempo e clima com maiores precisões. Roads et al. (2003), Hay e Clark (2003), Hay et al. (2002) destacam que, embora tais modelos sejam promissores, a grande maioria dos trabalhos desenvolvidos até o momento apresentam resultados que se concentram em demonstrar a viabilidade de usar os modelos. Mas, uma vez demonstrada esta viabilidade, é necessário que existam esforços para confirmar que, em escala regional, os resultados são melhores, ou não, do que aqueles produzidos por modelos globais.

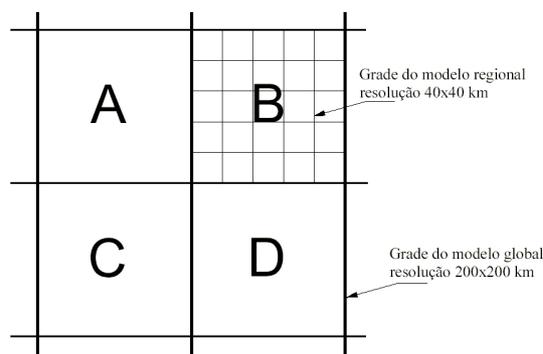


Figura 2 - Detalhamento da resolução dos modelos climáticos através da técnica de “downscaling”

Embora ainda sejam poucas, as aplicações dos modelos atmosféricos regionais na área de recursos hídricos mostram que, de maneira geral, são obtidos melhores resultados do que utilizando os modelos globais (Anderson et al., 2002; Hay et al., 2002; Hay e Clark, 2003; Ibbitt et al., 2001; Kite, 1997; Koussis, et al., 2003; Roads et al., 2003). Este resultado é explicado pela melhor representação física, por parte dos modelos regionais, das características geográficas e processos que ocorrem na escala das bacias hidrográficas.

Todos estes autores salientam que os resultados ainda são preliminares, e que os modelos regionais ainda deverão passar por muitos testes e modificações para serem efetivamente validados. Kerr (2004) salienta que, devido ao aumento na capacidade dos “chips” de processamento e as técnicas de computação através de “clusters” (de custo muito menor do que os supercomputadores), a tendência futura é que cada região, de países grandes como Brasil e EUA, possua um modelo atmosférico regional que seja adaptado as suas características e necessidades.

MODELOS HIDROLÓGICOS PARA GRANDES BACIAS

De acordo com Hartmann et al. (1999), a maioria dos modelos hidrológicos conceituais ainda é do tipo concentrado, que são adequados para pequenas bacias, pois não representam a variabilidade espacial das características da bacia. Embora tenham sido desenvolvidos diversos modelos do tipo distribuído, apropriados para captar as variações espaciais, o seu uso ainda continua restrito em pequenas bacias, devido a limitações na quantidade de dados necessários para sua aplicação (Singh e Woolhiser, 2002; Troch et al., 2003; Biftu e Gan, 2001).

Em suas recomendações, o GEWEX (1998) adverte que a comunidade hidrológica deve dedicar grande atenção ao desenvolvimento de modelos que expandam seus limites geográficos para áreas de escala continental. Além disso, os modelos hidrológicos devem procurar incorporar os processos que compõem o balanço vertical de energia na superfície, de forma que sejam mais consistentes com os modelos atmosféricos (GEWEX, 1998; Burges, 1998). Os processos envolvidos nas interações entre superfície e atmosfera determinam, por exemplo, qual parcela da chuva irá infiltrar ou escoar superficialmente, bem como a redistribuição da água entre a superfície, solo, aquífero subterrâneo e canais (Troch et al., 2003).

De acordo com Entekhabi et al. (1999), é economicamente e logisticamente impossível obter dados, através de medidas de campo tradicionais, para atender modelos de escalas continentais de forma adequada. Entretanto, tecnologias como o sensoriamento remoto vêm criando novas possibilidades para coleta de dados em grande escala, que, utilizadas em conjunto com os sistemas de informações geográficas (SIG), permitiram desenvolver, ao longo da última década, diferentes modelos hidrológicos distribuídos. Tais modelos podem incorporar a distribuição espacial de várias informações e condições de contorno, como a topografia, vegetação, tipo e uso do solo, precipitação e evaporação, produzindo informações de saída como umidade do solo, fluxos subterrâneos e de superfície, distribuição vertical da água no solo, dentre outras (Troch et al., 2003).

Dentre os modelos hidrológicos desenvolvidos com estas características pode-se citar o Variable Infiltration Capacity (VIC-2L), descrito por Liang et al. (1994). O VIC-2L possui uma estrutura semelhante aos soil-vegetation-atmosphere transfer scheme (SVATS), e é um dos modelos de grandes

bacias mais conhecidos e aplicados. No modelo VIC-2L, a bacia é dividida em células regulares e a variabilidade da capacidade de infiltração é representada no interior de cada célula. Módulos de propagação nas células foram adicionados, permitindo comparar as vazões com valores observados (Nijssen et al., 1997; Lohmann et al., 1998a). Algumas aplicações do modelo VIC-2L, em bacia com áreas entre 30.000 e 700.000 km², são descritas por trabalhos de Abdulla e Lettenmaier (1997), Lohmann et al. (1998a,b), Jayawardena e Mahanama (2002), Wood et al. (2002), Maurer e Lettenmaier (2003).

O modelo Large Area Runoff Simulation Model (LARSIM), assim como o VIC-2L, foi desenvolvido para ser um módulo hidrológico em um modelo atmosférico (Collischonn, 2001). A formulação do LARSIM é semelhante ao VIC-2L, pois divide a bacia em células quadradas, sendo o interior das células subdividido em blocos que combinam uso do solo e cobertura vegetal.

Collischonn (2001) utilizou a estrutura do modelo LARSIM, com algumas adaptações do modelo VIC-2L, e desenvolveu o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH). Foram feitas modificações importantes, incluindo a metodologia de Muskingum-Cunge para a propagação do escoamento nos canais. O modelo tem sido aplicado com sucesso em bacias brasileiras, com diferentes características, tanto para simulação quanto para previsão (Collischonn, 2001; Tucci et al., 2003; Collischonn, et al., 2005).

A utilização de modelos distribuídos para a previsão de vazões pode ser considerada uma tendência mundial, verificada em países como a Alemanha, onde alguns sistemas de previsão utilizam modelos hidrológicos com 1 km de resolução para realizar previsões com cerca de 7 dias de antecedência, baseados em previsão de precipitação (www.lfu.baden-wuerttemberg.de) e nos EUA, onde o National Weather Service (NWS) está conduzindo uma concorrência de modelos distribuídos (Smith et al., 2004), com o objetivo de substituir o modelo Sacramento para as previsões operacionais de vazão.

PREVISÃO HIDROCLIMÁTICA DE VAZÃO

Integração dos Modelos Atmosféricos e Hidrológicos

O desenvolvimento dos modelos hidrológicos de grande escala foi motivado pela necessidade de melhor representar os processos terrestres dentro dos modelos atmosféricos. Entretanto, ainda são poucos os trabalhos que realmente acoplam os mo-

delos em modo *on-line*, com interação simultânea dos processos em ambos os sentidos, atmosfera-superfície e vice-versa (Evans, 2003; Gutowski et al., 2002; Seuffert et al., 2002).

A grande maioria dos trabalhos de acoplagem dos modelos tem utilizado a metodologia *off-line*, onde o modelo atmosférico fornece a precipitação e/ou temperatura para ser utilizada como entrada no modelo hidrológico. Neste caso o modelo hidrológico não interage com o atmosférico. Alguns trabalhos que usam esta técnica para fazer apenas simulação são descritos por Hay e Clark (2003), Hay et al. (2002), Ibbitt et al. (2001), Jayawardena e Mahanama (2002) e Kite (1997).

Na Figura 3 é apresentada uma representação esquemática do acoplamento tipo *off-line* dos modelos, com base em trabalhos desenvolvidos usando o modelo hidrológico MGB-IPH, em conjunto com o atmosférico global COLA e os regionais ETA (CPTEC) e RAMS (IAG).

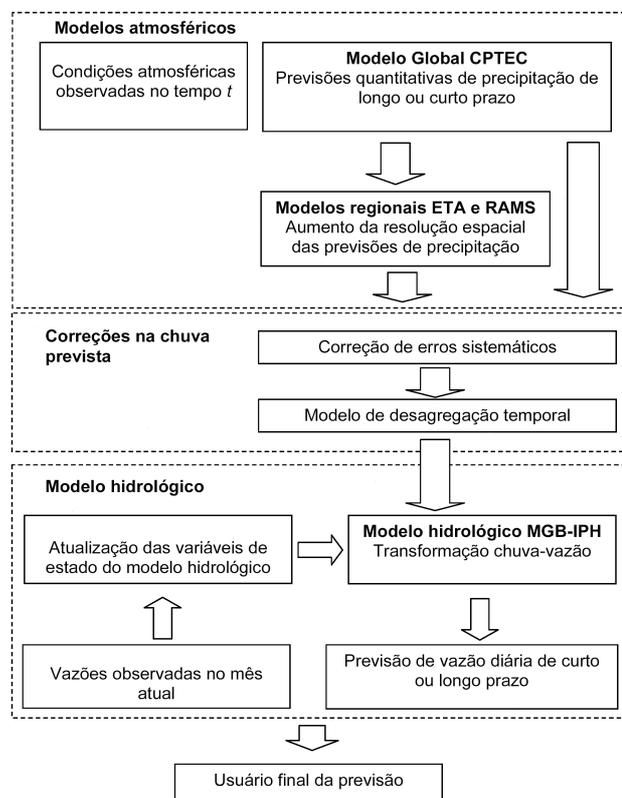


Figura 3 - Estrutura metodológica para previsões de vazão de curto e longo prazo, com base em previsões de precipitação (Tucci et al., 2005)

Para as previsões de longo prazo (Figura 3), o modelo atmosférico global do CPTEC fornece previsões climáticas de precipitação e demais variáveis atmosféricas, a partir das informações climáticas atuais. Estas previsões do modelo global são utilizadas como condições de contorno dos modelos regionais (ETA ou RAMS), que irão fornecer previsões de precipitação com maior resolução espacial. As previsões são geradas em valores totais diários.

Antes de serem usadas como entrada no modelo hidrológico, as previsões climáticas de precipitação, seja do modelo global ou regional, passam por um processo de correção de erros sistemáticos, realizado sobre os valores acumulados mensais. Em seguida, pode-se ainda efetuar uma correção da distribuição temporal dos valores diários da precipitação ao longo do mês, através de um modelo de desagregação temporal. Uma vez efetuadas as correções na precipitação prevista, a mesma é inserida como dado de entrada no modelo hidrológico MGB-IPH, em valores totais diários, e o mesmo gera as previsões de vazão em valores médios diários, para até 6 meses no futuro. No início de cada previsão, são atualizadas as variáveis de estado do modelo hidrológico, com base nas vazões observadas até a data atual.

Para a previsão de curto prazo, a estrutura metodológica é bastante semelhante, com a diferença de que normalmente não são feitas correções na precipitação prevista.

Correções na precipitação

Apesar dos desenvolvimentos recentes, o uso da precipitação prevista por modelos numéricos de tempo e clima como entrada em modelos hidrológicos, para previsão de vazões, é ainda limitado por três tipos de erros (Habets et al.; 2004): i) Distribuição espacial dos eventos, uma vez que erros de alguns quilômetros na localização da chuva podem levar a grandes erros na vazão; ii) Distribuição temporal da precipitação, devido a resposta da bacia ser altamente dependente desta distribuição; iii) Intensidade da precipitação. Por estas razões, a precipitação prevista por modelos numéricos deve, para a maioria dos casos, ser utilizada em associação com outras ferramentas, como correções estatísticas e adaptações regionais, para corrigir alguns erros antes de dar entrada no modelo hidrológico (Habets et al., 2004).

Conforme mostrado por Marengo et al. (2003), os modelos climáticos globais são ajustados para simular a circulação da atmosfera em todo o planeta, logo, alguns locais terão uma boa represen-

tação e outros não. As previsões de precipitação, quando comparadas diretamente aos dados observados normalmente mostram que, para muitas regiões, os modelos globais apresentam desvios sistemáticos em relação às observações.

A metodologia de correção dos erros sistemáticos mais empregada está baseada numa transformação da curva de distribuição de probabilidades de precipitação, conforme apresentado nos trabalhos de Hay e Clark (2003), Tucci et al. (2003), Hay et al. (2002) e Wood et al. (2002). Neste método, para cada mês do ano e para cada ponto da grade de previsão do modelo climático são desenvolvidas duas curvas de distribuição de probabilidade: a dos dados observados e a dos valores previstos de chuva diária.

Nas simulações do modelo regional usado por Hay e Clark (2003) e Hay et al. (2002), as correções foram feitas para os valores de totais mensais, com o ajuste da distribuição de probabilidades do tipo Gama. De forma análoga, para o trabalho de Wood et al. (2002), as correções foram feitas para os valores mensais de precipitação prevista, utilizando como referência 21 anos de dados observados e simulados pelo modelo GSM, ou seja, a climatologia observada e a climatologia do modelo. Wood et al. (2002) utilizaram distribuições empíricas de probabilidades, combinadas com as distribuições teóricas Valores Extremos Tipo I e III para extrapolar os valores inferiores ou superiores aos encontrados na climatologia. Para o caso apresentado por Tucci et al. (2003), não se dispunha da climatologia do modelo GSM, por isso utilizou-se uma parte do período de previsão para construir curvas empíricas de probabilidades diárias para os 12 meses do ano, ou seja, foram feitas correções para os valores acumulados diários previstos.

Em ambos os trabalhos, citados acima, concluiu-se que a metodologia da curva de probabilidade foi eficiente em corrigir os erros de magnitude das precipitações. Porém, todos salientam que existem limitações, ligadas a duas razões principais: i) a representatividade do período da climatologia, usado como referência para as correções, que pode ser tendencioso; ii) a variação dia após dia da precipitação não é bem representada na previsão climática dos modelos atmosféricos, mesmo que os valores acumulados mensais estejam corretos.

Desagregação temporal da precipitação

Conforme já citado anteriormente, os modelos de previsão climática operam gerando precipitação em intervalo de tempo menor do que 1 dia, e

para alguns meses no futuro. Entretanto, mesmo que os valores mensais acumulados estejam corretos, de maneira geral, esta informação diária não reproduz corretamente toda a variabilidade da precipitação observada. Isto ocorre devido às características da previsão climática, que estão baseadas nas condições de contorno externas (TSM), e na baixa resolução espacial dos modelos, que distorcem a distribuição temporal da precipitação.

De acordo com Hansen e Indeje (2004), os modelos climáticos dinâmicos tendem a produzir muitos eventos de chuva, com pouco volume precipitado por evento. Ou seja, o valor total mensal pode estar correto, mas eventos de grande intensidade, que ocorrem normalmente, não são reproduzidos. Estes erros são mais pronunciados nas regiões tropicais (IRI, 2004), e podem provocar sérias distorções quando esta previsão é introduzida nos modelos hidrológicos, uma vez que poderá ser criada uma tendência em aumentar as perdas por evaporação e redução do escoamento superficial.

Para corrigir esta limitação da previsão climática de precipitação, têm sido propostos diversos métodos para desagregar os valores acumulados sazonais (ou mensais) em seqüências de totais diários, adequados aos intervalos de tempo dos modelos hidrológicos. IRI (2004) destaca que uma técnica bastante utilizada consiste em usar informações sobre estatísticas das séries observadas para ajustar um modelo estocástico que gere seqüências de chuva diária, consistentes com o local de referência. Um modelo típico deste tipo é normalmente montado em associação com um modelo de Cadeia de Markov, que é uma técnica estatística amplamente utilizada para descrever uma série temporal de estados discretos. Este processo de geração de séries diárias de precipitação é freqüentemente conhecido como desagregação estocástica (Glasbey et al., 1995; IRI, 2004).

Metodologias bastante simples podem ser empregadas para a desagregação diária, tal como no trabalho de Wood et al. (2002), onde o total mensal é distribuído segundo a seqüência diária (de um mesmo mês) do histórico observado, definido de forma aleatória. Outra técnica bastante comum é escolher um conjunto de anos do passado, cujos valores de um dado mês sejam similares ao mês que está sendo previsto, atribuindo-se, para cada ano escolhido, a mesma probabilidade de ocorrência. Pode-se então utilizar a média dessa amostra, ou ajustar uma distribuição de probabilidades para definir cenários prováveis de ocorrência (Hansen e Indeje, 2004).

APLICAÇÕES DE PREVISÃO HIDROCLIMÁTICA

Previsões de curto prazo

Em aplicações de previsão, Anderson et al. (2002) utilizaram precipitação prevista pelos modelos ETA e MM5 para gerar vazões na bacia do rio Calavera (Califórnia, EUA). A antecedência máxima das previsões foi de 48 horas, com precipitação prevista a cada 6 horas. Avaliaram-se as vazões da bacia para precipitação gerada com resolução de 40 km, pelo modelo ETA, e 4 km para o MM5, utilizando o modelo hidrológico HEC-HMS. De forma semelhante, Koussis et al. (2003) realizaram previsões com 48 horas de antecedência para a bacia do rio Kifissos (2190 km²), localizada dentro da área urbana de Atenas, Grécia. Utilizou-se o modelo regional BOLAM, para previsão de precipitação, com 6 km de grade, e um modelo chuva-vazão distribuído por sub-bacias. Os resultados mostram que, embora as previsões tenham apresentado dificuldades em representar os picos dos hidrogramas, os modelos conseguiram captar as variações de vazão na bacia. Em ambos os trabalhos, é salientado que os resultados são promissores e podem ser melhorados, através de maiores desenvolvimentos nos modelos que compõem os sistemas de previsão.

Como parte do experimento global GEWEX, Habets et al. (2004) testaram previsão operacional de vazão de curto prazo (até 3 dias), na bacia do rio Rhone (França), de 96.000 km². Para previsão da precipitação foram usados dois modelos numéricos de tempo, em operação na França, Action Recherche Petite Echelle Grande Echelle - ARPEGE (resolução de 25 km) e Aire Limitée Adaptation Dynamique, Développement International - ALADIN (resolução de 15 km). A precipitação prevista foi usada como entrada para um modelo hidrológico denominado SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM), com resolução de 8 km. Os resultados obtidos indicam que, embora o modelo hidrológico utilizado seja sensível às condições iniciais de neve e umidade do solo, a qualidade das previsões de vazão é melhor do que as técnicas usualmente empregadas. Devido aos bons resultados obtidos, o sistema está sendo implantado para previsão operacional em todo território francês.

Collischonn et al. (2005) realizaram previsão de vazão afluente ao reservatório da usina hidrelétrica de Machadinho, localizada no rio Uruguai (32.000 km²). Foram utilizados o modelo hidrológico MGB-IPH e as previsões de precipitação fornecidas pelo modelo regional Advanced Regional

das pelo modelo regional Advanced Regional Prediction System – ARPS, operado pela UFSC. As previsões foram realizadas para antecedências de até 48 horas. Os resultados mostraram que as previsões de vazão com base em chuva prevista apresentaram ganhos significativos na estimativa de eventos extremos de cheia, para antecedências de mais de 10 h. Para previsão contínua, a metodologia apresentou bons resultados em antecedências acima de 16 h. Esse limite corresponde ao tempo de resposta da bacia até a usina de Machadinho, ou seja, após 16 h a influência da chuva observada cai rapidamente.

Em uma aplicação na bacia do rio São Francisco, Tucci et al. (2005) empregaram o modelo MGB-IPH em conjunto com as previsões de chuva do modelo regional ETA (CPTEC) para realizar previsões de vazão com até 14 dias de antecedência, de acordo com os procedimentos do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (ONS, 2000). Os resultados foram analisados para as usinas de Três Marias (50.800 km²) e Sobradinho (504.000 km²), e mostraram que as previsões de vazão com base na chuva prevista são significativamente superiores às previsões do modelo estocástico utilizado pelo ONS.

Previsões de longo prazo

Para previsões de longo prazo, Wood et al. (2002) utilizaram conjuntos de previsões de precipitação acumulada mensal e médias mensais de temperatura, com 6 meses de antecedência, produzidas pelo modelo espectral global (GSM) do National Center for Environmental Prediction (NCEP), EUA, de resolução 2,8125° (latitude e longitude). Os dados gerados pelo modelo global foram utilizados como entrada para o modelo hidrológico de macroescala Variable Infiltration Capacity (VIC), descrito por Liang (1994), com resolução de 1/8°. Empregou-se uma metodologia estatística para correção de erros sistemáticos nas previsões geradas pelo modelo global. Os resultados foram analisados em termos qualitativos, e indicam que o procedimento empregado obteve sucesso para transmitir os sinais da previsão climática às variáveis hidrológicas de interesse dos recursos hídricos.

Tucci et al. (2003) utilizaram uma metodologia semelhante para realizar uma análise quantitativa na bacia do rio Uruguai (62.200km²), localizada na Região Sul do Brasil. Determinaram-se previsões de vazão para até 5 meses de antecedência, combinando-se o modelo climático global do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com o modelo hidrológico MGB-IPH. Os resultados mostraram que, para a bacia do rio

mostraram que, para a bacia do rio Uruguai, as precipitações previstas pelo modelo climático possuem um erro sistemático em relação aos dados observados. Para corrigir este erro, desenvolveu-se uma metodologia baseada numa transformação da distribuição de probabilidades de precipitação diária. Com a combinação das previsões climáticas corrigidas e o modelo hidrológico distribuído, obteve-se uma redução de 54% do erro da previsão de vazão (redução de variância) no rio Uruguai, em relação às previsões obtidas pelo método tradicionalmente empregado, que se baseia nas médias ou medianas mensais. Além disso, é utilizado um conjunto de 5 previsões baseado na técnica de *ensemble* do modelo climático, permitindo gerar uma banda de incertezas das previsões. Os resultados de Tucci et al. (2003) indicam que já existe resultado positivo dos modelos de previsão de Longo prazo em recursos hídricos. Tucci et al. (2005) confirmaram este resultado para a bacia do rio São Francisco, que possui características climáticas e geológicas diferentes da bacia do rio Uruguai, e onde também se obteve redução do erro da previsão em diferentes locais da bacia, em relação ao modelo estocástico utilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2000).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A previsão de vazão de curto e longo prazo é um desafio presente e envolve conhecimento interdisciplinar de hidrologia e meteorologia, para ampliar a antecipação e qualidade dos resultados com tecnologias modernas. A integração de modelos hidrológicos e atmosféricos tem-se mostrado fundamental neste contexto, como se observa pelo número crescente de trabalhos desenvolvidos em âmbito internacional. Este tipo de tecnologia permite introduzir mais determinismo na previsão e cria condições para reduzir incertezas.

Nos trabalhos apresentados ao longo deste texto, é destacado que os resultados da previsão hidroclimática são bastante promissores. Dentre os principais benefícios apontados, destacam-se o intercâmbio de conhecimentos entre hidrólogos e meteorologistas o aumento da antecedência de previsão e a difusão do uso de dados de sensoriamento remoto pelos hidrólogos.

Nestes trabalhos também se notam algumas tendências nas metodologias empregadas para previsão, que podem servir de referência para trabalhos na área. Algumas dessas tendências são:

- uso de modelos hidrológicos distribuídos por células regulares, embora também possam ser usados modelos distribuídos por sub-bacias;
- acoplamento do tipo *off-line* entre os modelos atmosféricos e hidrológicos. Ou seja, as informações do modelo hidrológico não são assimiladas pelo atmosférico;
- uso de correção estatística das precipitações de entrada no modelo hidrológico, principalmente nas previsões climáticas;
- uso somente da saída de precipitação dos modelos atmosféricos, dispensando outras variáveis prognosticadas, como a umidade do solo e a evapotranspiração.

Embora estas tendências já tenham sido exploradas em alguns trabalhos, em todas ainda existem demandas por desenvolvimentos. Por isso, para trabalhos futuros são destacadas algumas recomendações:

- o aprimoramento da representação física dos modelos;
- desenvolvimento de metodologias para assimilação de dados pelos modelos hidrológicos;
- o uso de modelos empíricos (estocásticos, por exemplo) para corrigir erros sistemáticos das previsões. Estes erros normalmente se devem a deficiências no ajuste dos modelos hidrológicos conceituais, que necessitam de grande quantidade de dados;
- avaliar o uso de outras variáveis previstas pelos modelos atmosféricos, e não somente a precipitação como entrada nos modelos hidrológicos;
- avaliar em detalhe as previsões dos modelos atmosféricos regionais, principalmente a previsão climática, e comparar o *downscaling* feito por modelos estatísticos e dinâmicos;
- fazer correções estatísticas das saídas dos modelos globais antes de usá-las como entrada nos modelos regionais;
- inserir o modelo hidrológico no modelo atmosférico, ou seja, fazer acoplamento do tipo *on-line* dos modelos.
- avaliar as previsões climáticas dos modelos acoplados do tipo oceano-atmosfera.

Finalmente, destaca-se que é importante incluir o uso final da previsão nos trabalhos de aperfeiçoamento das metodologias. Diversos trabalhos

têm mostrado a importância do desenvolvimento de técnicas que permitam avaliar a utilidade da previsão sob o ponto de vista do usuário final (Zhu et al., 2002; Stewart et al., 2004). Ou seja, é preciso responder a perguntas como: qual a confiabilidade da previsão?, qual a informação mais importante para o usuário? ou em que formato ele quer receber os dados?, como otimizar o uso da previsão? e qual o valor econômico da previsão?. Este deve ser um processo onde ocorre interação entre os dois lados (previsor e usuário), possibilitando aprimorar a metodologia de previsão e ampliar o seu potencial de benefícios para a sociedade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq/CT-Hidro pela concessão da bolsa de estudos que mantém com o primeiro autor. À Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelo financiamento dos estudos.

REFERÊNCIAS

- ABDULLA, F.A.; LETTENMAIER, D.P. Application of regional parameter estimation schemes to simulate the water balance of a large continental river. *Journal of Hydrology*. V.197, p.258-285. 1997.
- ANDERSON, M.L.; CHEN, Z.-Q.; KAVVAS, M.L.; FELDMAN, A. Coupling HEC-HMS with Atmospheric Models for Prediction of Watershed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*. V.7, n.4, jul, p.312-318. 2002.
- ANDERSON, M.L.; KAVVAS, M.L.; MIERZWA, M.D. Probabilistic/ensemble forecasting: a case study using hydrologic response distributions associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Journal of Hydrology*. V.249, p.134-147. 2001.
- ANDERSON, J.L.; PLOSHAY, J.L. Impact of initial conditions on seasonal simulations with an atmospheric general circulation model. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*. V.126, p.2241-2264. 2000.
- BIFTU, G.F.; GAN, T.Y. Semi-distributed, physically based, hydrologic modeling of the Paddle River Basin, Alberta, using remotely sensed data. *Journal of Hydrology*. V.244, p.137-156. 2001.
- BURGES, S.J. *Streamflow Prediction: Capabilities, Opportunities, and Challenges*. In: National Research Council. *Hydrologic Sciences – Taking Stock and Looking Ahead*. Proceedings of the 1997 Abel Wolman Distinguished Lecture and Symposium on the Hydrologic Sciences. Washington, DC (EUA): National Academy of Science, 138p. 1998.

- CHANGNON, S.A.; VONNAHME, D.R. Impact of Spring 2000 Drought Forecasts on Midwestern Water Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. V. 129, n.1, jan, p.18-25. 2003.
- CHEN, D.; CANE, M.A.; KAPLAN, A.; ZEBIAK, S.E.; HUANG, D. Predictability of El Niño over the past 148 years. *Nature*. V.428, abr, p.733-736. 2004.
- CHIEW, F.H.S.; ZHOU, S.L.; McMAHON, T.A. Use of seasonal streamflow forecasts in water resources management. *Journal of Hydrology*. V.270, p.135-144. 2003.
- COLLIER, C.G.; KRZYZYSZTOFOWICZ, R. Quantitative precipitation forecasting. *Journal of Hydrology*. V.239, p.1-2. 2000.
- COLLISCHONN, W. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. Porto Alegre: UFRGS. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 194p. 2001.
- COLLISCHONN, W.; HAAS, R.; ANDREOLLI, I.; TUCCI, C.E.M. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. *Journal of Hydrology*. Vol.205, p.87-98. 2005.
- CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. *O Sistema de Previsão de Tempo Global por Ensemble do CPTec*. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em: Maio, 2004.
- ECMWF – European Center of Medium-Range Weather Forecasting. *Monthly Forecasting*. Disponível em: <<http://www.ecmwf.int/products/forecasts>>. Acesso em: fevereiro, 2005.
- ENTEKHABI, D.; ASRAR, G.R.; BETTS, A.K.; BEVEN, K.J.; BRAS, R.L.; DUFFY, C.J.; DUNNE, T.; KOSTER, R.D.; LETTENMAIER, D.P.; MCLAUGHLIN, D.B.; SHUTTLEWORTH, W.J.; VAN GENUCHEN, M.T.; WEI, M.-Y.; WOOD, E.F. An Agenda for Land Surface Hydrology Research and a Call for the Second International Hydrological Decade. *Bulletin of the American Meteorological Society*. V.80, n.10, out. 1999.
- EVANS, J.P. Improving the characteristics of streamflow modeled by regional climate models. *Journal of Hydrology*. V.284, p.211-227. 2003.
- GEORGAKAKOS, K.P.; KRZYSZTOFOWICZ, R. Probabilistic and ensemble forecasting. *Journal of Hydrology*. 249, p.1. 2001.
- GEWEX Continental-Scale International Project (GCIP). *A Review of Progress and Opportunities*. Washington DC, EUA: National Academy of Science, 1998. 93p.
- GILMAN, D.L. Long-range forecasting: The present and the future. *Bulletin of the American Meteorological Society*. V.66, p.159-164. 1985.
- GLASBEY, C.A.; COOPER, G.; MCGECHAN, M.B. Disaggregation of daily rainfall by conditional simulation from a point-process model. *Journal of Hydrology*. V.165, p.1-9. 1995.
- GODDARD, L.; MASON, S.J.; ZEBIAK, S.E.; ROPELEWSKI, C.F.; BASHER, R.; CANE, M.A. *Current Approaches to Seasonal to Interannual Climate Predictions*. New York: IRI, dez, 2000. 62p.
- GOLDING B.W. Quantitative precipitation forecasting in the UK. *Journal of Hydrology*. V.239, P.286-305. 2000.
- GRAHAM, R.J.; EVANS, A.D.L.; MYLNE, K.R.; HARRISON, M.S.J.; ROBERTSON, K.B. An assessment of seasonal predictability using atmospheric general circulation models. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*. V.126, p.2211-2240. 2000.
- GUTOWSKI, W.J.; VÖRÖSMARTY, C.J.; PERSON, M.; ÖTLES, Z.; FEKETE, B.; YORK, J. A Coupled Land-Atmosphere Simulation Program (CLASP): Calibration and validation. *Journal of Geophysical Research*. V.107, n.16, p.3(1-17). 2002.
- HABETS, F.; LEMOIGNE, P.; NOILHAN, J. On the utility of operational precipitation forecasts to served as input for streamflow forecasting. *Journal of Hydrology*. V.293, P.270-288. 2004.
- HAMLET, A.F.; HUPPERT, D.; LETTENMAIER, D.P. Economic Value of Long-Lead Streamflow Forecasts for Columbia River Hydropower. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol.128, n.2, março. 2002.
- HANSEN, J.W.; INDEJE, M. Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*. Em impressão. 2004.
- HARTMANN, H.C.; BALES, R.; SOROOSHIAN, S. *Weather, Climate, and Hydrologic Forecasting for the Southwest U.S.* Tucson, EUA: The University of Arizona. Working Paper Series: WP2-99, fev, 1999. 172p.
- HAY, L.E.; CLARK, M.P. Use of statistically and dynamically downscaled atmospheric model output for hydrologic simulations in three mountainous basins in the western United States. *Journal of Hydrology*. V. 282, p.56-75. 2003.
- HAY L.E.; CLARK, M.P.; WILBY, R.L.; GUTOWSKI JR., W.J.; LEAVESLEY, G.H.; PAN, Z.; ARRITT, R.W.; TAKLE, E.S. Use of Regional Climate Model Output for Hydrologic Simulations. *Journal of Hydrometeorology*. V.3, out, p.571-590. 2002.
- HSU, M.-H.; FU, J.-C.; LIU, W.-C. Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River, Taiwan. *Journal of Hydrology*. V. 283, p.267-280. 2003.
- IAG - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. *Comparação entre modelos*. Disponível em:<<http://www.master.iag.usp.br>>. Acesso em: Junho, 2005.

- IBBITT, R.P.; HENDERSON, R.D.; COPELAND, J.; WRATT, D.S. Simulating mountain runoff with meso-scale weather model rainfall estimates: a New Zealand experience. *Journal of Hydrology*. V.239, p.19-32. 2001.
- IRI, International Research Institute for Climate Prediction. *Forecasts Descriptions*. Disponível em: <<http://iri.columbia.edu>>. Acesso em: Maio, 2004.
- JAYAWARDENA, A.W.; MAHANAMA, S.P.P. Meso-Scale Hydrological Modeling: Application to Mekong and Chao Phraya Basins. *Journal of Hydrologic Engineering*. V.7, n.1, jan/fev, p.12-26. 2002.
- KERR, R.A. Storm-in-a-Box Forecasting. *Science*. V.304, mai, p.946-948. 2004.
- KIMURA, R. Numerical weather prediction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. V.90, p.1403-1414. 2002.
- KITE G.W. Simulating Columbia river flows with data from regional-scale climate models. *Water Resources Research*. V.33, n.6, jun, p.1275-1285. 1997.
- KOUSSIS, A.D.; LAGOUVARDOS, K.; MAZI, K.; KOTRONI, V.; SITZMANN, D.; LANG, J.; ZAISS, H.; BUZZI, A.; MALGUZZI, P. Flood Forecasts for Urban Basin with Integrated Hydro-Meteorological Model. *Journal of Hydrologic Engineering*. V.8, n.1, jan/fev, p.1-11. 2003.
- LETTENMAIER D.P., WOOD E.F. Hydrologic Forecasting. In: MAIDMENT D., *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Chapter 26. 1993
- LIANG, X.; LETTENMAIER, D.P.; WOOD, E.F.; BURGESS, S.J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. D7, p. 14415-14428. 1994.
- LOHMANN, D.; RASCHKE, E.; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D.P. Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. *Hydrological Sciences Journal*. 43 n° 1; 131-141. 1998a.
- LOHMANN, D.; RASCHKE, E.; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D.P. Regional scale hydrology: II. Application of the VIC-2L model to the Weser river, Germany. *Hydrological Sciences Journal*, 43, n° 1; 143-158. 1998b.
- LORENZ, E.N. On the Existence of Extended Range Predictability. *Journal of Applied Meteorology*. V.12, apr., p.543-546. 1973.
- MARENGO, J.A.; CAVALCANTI, I.F.A.; SATYAMURTY, P.; TROSNICOV, I.; NOBRE, C.A.; BONATTI, J.P.; CAMARGO, H.; AMPAIO, G.; SANCHES, M.B.; MANZI, A.O.; CASTRO, C.A.C.; D'ALMEIDA, C.; PEZZI, L.P.; CANDIDO, L. Assessment of regional rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. *Climate Dynamic*. V.21, p.459-475. 2003.
- MAURER, E.P.; LETTENMAIER, D.P. Predictability of seasonal runoff in the Mississippi River basin. *Journal of Geophysical Research*. V.108, n.16, p.2(1-13). 2003.
- MCGUFFIE, K.; HENDERSON-SELLER, A. *A Climate Modeling Primer*. England: John Wiley & Sons. 253p. 1997
- NEAL, E.G.; WALTER, M.T.; COFFEEN, C. Linking the pacific oscillation to seasonal stream discharge patterns in southeast Alaska. *Journal of Hydrology*. V.263, p.188-197.2002.
- NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D.P.; LIANG, X.; WETZEL, S.W.; WOOD E.F. Streamflow Simulation for Continental-scale River Basins. *Water Resources Research*. V.33, n.4, abr, p.711-724. 1997.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Previsão de Vazões (Submódulo 9.5)*. Rio de Janeiro: ONS, jun, 11p. 2000.
- ROADS, J.; CHEN, S.-C.; KANAMITSU, M. U.S. regional climate simulations and seasonal forecasts. *Journal of Geophysical Research*. V.108, n.16, p.1(1-17). 2003.
- ROEBBER, P.J.; SCHULTZ, D.M.; COLLE, B.A.; STENSRUD, D.J. Toward Improved Prediction: High-Resolution and Ensemble Modeling Systems in Operations. *Weather and Forecasting*. V. 19, out, p.936-949. 2004.
- SAMPAIO, G. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC. Cachoeira Paulista, SP, Janeiro de 2005. (comunicação verbal).
- SEUFFERT, G.; GROSS, P.; SIMMER, C.; WOOD, E.F. The Influence of Hydrologic Modeling on the Predicted Local Weather: Two-Way Coupling of a Mesoscale Weather Prediction Model and a Land Surface Hydrologic Model. *Journal of Hydrometeorology*. V.3, out, p.505-523. 2002.
- SHUKLA, J.; ANDERSON, J.; BAUMHEFNER, D.; BRANKOVIC, C.; CHANG, Y.; KALNAY, E.; MARX, L.; PALMER, T.; PAOLINO, D.; PLOSHAY, J.; SCHUBERT, S.; STRAUS, D.; SUAREZ, M.; TRIBBIA, J. Dynamical Seasonal Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*. V.81, n.11, nov., p.2593-2606. 2000.
- SINGH, V.P.; WOOLHISER, D.A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*. V.7, n.4, jul/ago, p.270-292. 2002.
- SMITH, M.B.; DONG-JUN, S.; KOREN, V.I.; REED, S.M.; ZHANG, Z.; DUAN, Q.; MOREDA, F.; CONG, S. *The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design*. *Journal of Hydrology*. Vol.298, p.4-26. 2004.
- SMITH, L.A.; ROULSTON, M.S.; VON HARDENBERG, J. *End to End Ensemble Forecasting: Towards Evaluating the Economic Value of the Ensemble Prediction System*. Oxford, U.K.: Pembroke College. Technical Memorandum, n.336, abr, 2001. 29p.

- STERN, P.C.; EASTERLING, W.E. (eds.) *Making Climate Forecasts Matter*. National Academic Press: National Research Council, Panel on the Human Dimensions of Seasonal-to-Interannual Climate Variability, EUA. 1999. 175p.
- STEWART, T.S.; PIELKE Jr., R.; NATH, R. Understanding User Decision Making and the Value of Improved Precipitation Forecasts. Lessons from a Case Study. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Fev, p.223-235. 2004.
- STOCKDALE, T.N. An Overview of techniques for seasonal forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. V.14, p.305-318. 2000.
- TROCH, P.A.; PANICONI, C.; MCLAUGHLIN, D. Catchment-scale hydrological modeling and data assimilation. *Advances in Water Resources*. V.26, p.131-135. 2003.
- TUCCI, C.E.M. *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 669 p. 1998.
- TUCCI, C.E.M.; CLARKE, 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.; COLLISCHONN, W. *Previsão de Vazão*. In: TUCCI, C.E.M.; BRAGA, B. (Orgs.) *Clima e Recursos Hídricos no Brasil*. Porto Alegre: ABRH, p.281-348, nov. 2003.
- TUCCI, C.E.M.; MARENGO, J.A.; SILVA DIAS, P.L.; COLLISCHONN, W.; SILVA, B.C.; CLARKE, R.T.; CARDOSO, A.O.; JUAREZ, R.N.; SAMPAIO, G.; CHAN, C.S. *Previsão de Vazões na Bacia do Rio São Francisco com Base na Previsão Climática*. Relatório técnico ANEEL/OMM/98/00. Porto Alegre: IPH-UFRGS. 385p. 2005.
- WERNSTEDT, K.; HERSH, R. Climate Forecasts in Flood Planning: Promise and Ambiguity. *Journal of the American Water Resources Association*. V.38, n.6, dez, p.1703-1713. 2002.
- WOOD, A.W.; MAURER, E.P.; KUMAR, A.; LETTENMAIER, D.P. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research*. V.107, n.20, p.6(1-15). 2002.
- ZHU, Y.; TOTH, Z.; WOBUS, R.; RICHARDSON, D.; MYLNE, K. The Economic Value of Ensemble-Based Weather Forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Jan., p.73-83. 2002.

Stream-Flow Forecasting With Hydroclimatic Models

ABSTRACT

Stream-flow forecasting is used in different areas of water resources management to minimize the uncertainties of climate variability. Forecasts can be derived from knowledge of flow in the same river section, from stream-flow in an upstream section, or from knowledge of rainfall, be it observed or predicted by a climate model. Stream-flow forecasts obtained from predicted rainfall have longer lead-times than the lead-times of other methods, but require more sophisticated models and investment in monitoring. Stream-flow forecasts can have short lead-times of hours or days, and long lead-times of 1 to 9 months. The forecast models can be empirical or conceptual: empirical models use mathematical procedures to construct relations between variables without reference to physical processes, whilst conceptual models give forecasts derived from knowledge of physics.

Stream-flow forecasting models seek to estimate the variable at a lead-time τ in the future, starting at time t , given the knowledge up to that time of local stream-flow and rainfall. Future rainfall between t e $t+\tau$ is not known and affects the results of the forecast according to basin concentration time. In the past, hydrological models have used approaches such as stochastic rainfall generation, or an assumption of zero rainfall during this period. With the improvement in recent years of the ability of atmospheric models to estimate rainfall, it is now possible to extend the lead-time of hydrological forecasts, since rainfall predictions given by atmospheric models are becoming more reliable. This article describes the principal procedures and analyses being used to combine forecasts from both atmospheric and hydrological models to forecast stream-flow, in order to reduce uncertainty and risk involved in water uses and environmental conservation. It is a timely and interdisciplinary challenge with various practical objectives, both long and short term.

Key-words: Stream-flow forecast, rainfall forecast, hydrologic models, atmospheric models.