

MODELAGEM HIDROLÓGICA DE GRANDES BACIAS HIDROGRÁFICAS: A NECESSIDADE DE NOVAS METODOLOGIAS

Luciene Pimentel da Silva

COPPE/UFRJ - Caixa Postal 68506 - CEP 21945-970 Rio de Janeiro, RJ
luciene@cbf.lahc.ufrj.br

John Ewen

Water Resour. System Laboratory – University of Newcastle upon Tyne, UK NE1 7RU
john.ewen@ncl.ac.uk

RESUMO

O aumento da preocupação com o aquecimento do planeta (efeito estufa), devido ao crescimento das atividades urbanas e industriais e ao desmatamento das florestas tropicais, fez com que aumentassem as especulações sobre as possíveis consequências das variações climáticas na distribuição e disponibilidade dos recursos hídricos. Os processos físicos que ocorrem na superfície terrestre interagem com os processos atmosféricos através da permutação de energia e água entre os dois sistemas. A interação é dinâmica e complexa, envolvendo processos físicos que ocorrem naturalmente em diferentes escalas. Neste contexto, surge uma nova disciplina em Hidrologia, macro-hidrologia, associada à escala de ocorrência de grandes bacias hidrográficas. É promovida uma ampla revisão crítica nos métodos praticados na parametrização de modelos hidrológicos, evidenciando-se a necessidade do desenvolvimento de novas metodologias para a macro-hidrologia. Os principais requisitos para estas parametrizações são: a significação física, coerência entre nível de detalhamento da parametrização e a disponibilidade global de dados, significação dos parâmetros e associação direta a características fisiográficas, necessidade mínima de calibração e praticidade na aplicação.

INTRODUÇÃO

Recentemente tem aumentado a preocupação com os efeitos da mudança do uso do solo e o desenvolvimento urbano e industrial no meio ambiente. O desmatamento de florestas tropicais em larga escala tem enfocado os possíveis efeitos climáticos e as consequências na distribuição e disponibilidade dos recursos hídricos. Ao mesmo tempo, o aumento da concentração dos chamados gases do efeito estufa (por exemplo dióxido de carbono (CO₂), ozônio (O₃), clorofluorcarbonetos

(CFCs) entre outros) na atmosfera, durante o período pós-industrial, tem levado a especulações sobre uma possível elevação da temperatura média da superfície do planeta.

As consequências dessas alterações na disponibilidade e distribuição dos recursos hídricos não são inteiramente conhecidas. A água é essencial ao estabelecimento da vida e qualquer possível alteração na disponibilidade ou distribuição dos recursos hídricos precisa ser considerada criteriosamente.

Modelos hidrológicos determinísticos, por representarem de forma sistêmica e explícita as principais fases do ciclo hidrológico, constituem ferramentas valiosas na simulação dos possíveis efeitos nos recursos hídricos decorrentes dessas alterações climáticas no âmbito da bacia hidrográfica. A escala da bacia hidrográfica, no entanto, pode chegar até a milhares de quilômetros quadrados, no caso de bacias continentais. Em geral, a maioria dos modelos hidrológicos foram desenvolvidos visando bacias hidrográficas de pequena magnitude e/ou não incluem em suas parametrizações abordagem para a questão da escala. Além disso, naturalmente os processos hidrológicos ocorrem numa escala diferente dos processos atmosféricos representados nos modelos de circulação geral (projetados para trabalhar na escala global, onde cada célula (grid) do modelo é da ordem de 10⁴ km² em área). Uma possibilidade para estudar esses efeitos é forçar variáveis climáticas como temperatura e precipitação (desagregadas na escala apropriada) simuladas pelos MCGA como variáveis de entrada no modelo hidrológico e avaliar os efeitos nas vazões geradas pelo modelo. Este tipo de abordagem possui, no entanto, várias incertezas. Por exemplo, as incertezas associadas ao processo de desagregação das variáveis climáticas adotado e/ou a sensibilidade da parametrização do modelo hidrológico a estas alterações. Além disso, esse tipo de abordagem não representa as interações entre os processos atmosféricos e hidrológicos (Figura 1).

Existe, claramente, uma grande lacuna entre as escalas em que operam os modelos de circulação geral da atmosfera e os modelos hidrológicos. Uma possível alternativa para este problema é trabalhar numa escala intermediária. Isso motivou o surgimento de uma nova disciplina em hidrologia, do termo em inglês “large-scale hydrology” e/ou “Macrohydrology” (Shuttleworth, 1988) associada à representação hidrológica de grandes bacias hidrográficas. Esta nova escala de estudo para a modelagem hidrológica está associada ao limite superior da meso-escala e inferior da escala regional praticada no âmbito do estudo de processos atmosféricos (Figura 2).

O grande desafio no estudo da modelagem hidrológica, para escalas superiores àquelas mais frequentemente praticadas em modelos hidrológicos, está em aprimorar os métodos atualmente praticados e, ao mesmo tempo, promover a representação do elo entre os processos atmosféricos (associados a escalas maiores) e os processos que ocorrem na superfície terrestre no âmbito da bacia hidrográfica. Este artigo promove uma ampla revisão crítica nos métodos praticados na modelagem hidrológica e nas representações adotadas em modelos de circulação geral da atmosfera. A necessidade do desenvolvimento de novos métodos de abordagem é evidenciada e são identificados os principais requisitos e dados necessários para a modelagem associada à escala de grandes bacias hidrográficas.

MODELAGEM HIDROLÓGICA DE GRANDES BACIAS

A hidrologia de grandes bacias hidrográficas difere em alguns aspectos daquela associada a pequenas bacias. A variedade do relevo, diferentes usos do solo, tipos de solo, diversidade de vegetação, ou ainda, a importância relativa maior ou menor de cada sub-sistema do ciclo hidrológico como por exemplo da representação da rede de drenagem e/ou do sistema do reservatório subterrâneo no caso das bacias hidrográficas da região amazônica, necessitam de uma abordagem diferente.

As primeiras tentativas para a modelagem de bacias continentais visavam, principalmente, o cálculo do balanço hídrico, ou seja, a determinação dos percentuais do total de precipitação que evapora e que se transforma em escoamento superficial. Solomon et al. (1968), propuseram um sistema baseado em malhas quadradas. Para cada célula precipitação, temperatura (aplicada na fórmula de Turc para cálculo da evaporação) e escoamento

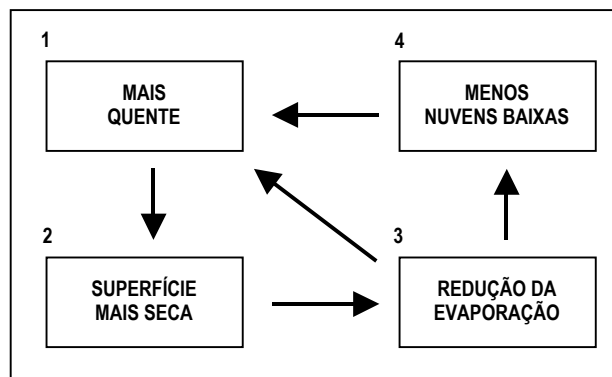


Figura 1. Representação esquemática da interação solo-atmosfera para conteúdo de umidade no solo (adaptado de Mitchell et al., 1990).

superficial são estimados por regressão múltipla, em que características fisiográficas como elevação e tipo de vegetação são as variáveis independentes. Este modelo foi aplicado a bacias hidrográficas brasileiras com relativo sucesso (UNEP/WMO, 1983). Versões mais recentes desse sistema enfocaram a necessidade de melhora na representação dos processos de infiltração e armazenamento de água no solo, bem como revisão dos módulos de propagação do escoamento nos canais.

Desde então, a modelagem continental começou a enfocar as questões ambientais e as parametrizações adotadas tiveram então que ser revistas. Vorösmarty et al. (1989), apresentaram um sistema projetado para estudar os ciclos biogeoquímicos na escala global. O sistema inclui um módulo de modelagem hidrológica que consiste de dois sub-sistemas integrados de balanço hídrico e de transporte. O método de modelagem do solo é similar ao esquema adotado no modelo Budyko (Manabe, 1969), amplamente citado na literatura, em que o nível do reservatório que representa o solo é regulado por uma função de um parâmetro associado à capacidade de campo média do solo. Neste caso, este parâmetro é determinado usando a curva de retenção do solo e a profundidade das raízes.

O modelo, proposto por Vorösmarty et al., combina boas idéias e representa um avanço da modelagem continental no sentido da proposição de metodologias mais realísticas fisicamente. No entanto, existem vários aspectos como a representação do processo de infiltração e do escoamento superficial que precisam ser melhor caracterizados (veja por exemplo Wood, 1991).

Outros modelos, ainda que não necessariamente tenham sido desenvolvidos visando aplicações exclusivamente a grandes bacias, apresen-

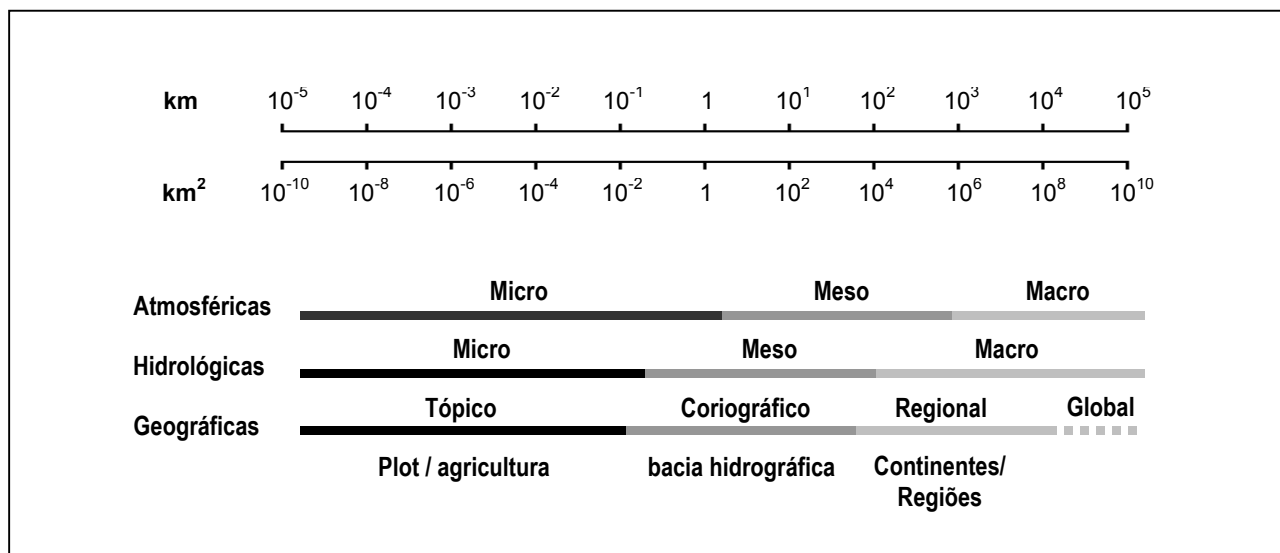


Figura 2. Classificação das escalas nas ciências atmosféricas, hidrológicas e geográficas (adaptado de Becker & Nemec, 1987).

tam características que podem ser incorporadas a macromodelos. O modelo proposto por Ott et al. (1991) para avaliar os efeitos climatológicos e hidrológicos da mudança do uso do solo na bacia hidrográfica do rio Mosel (~28000 km²) trabalha também em células. Com base na análise da elevação e outras características como por exemplo vegetação, as células são grupadas em unidades classificadas como hidrológicamente homogêneas e a cada unidade um modelo de base conceitual é aplicado, estimando-se então o escoamento superficial, que é calculado como excesso da infiltração.

Kouwen et al. (1993), também aplicaram uma alternativa análoga de classificação de áreas hidrológicamente semelhantes como estratégia para a modelagem distribuída. É provável que qualquer sistema proposto para a meso-escala se beneficiará de um sistema de classificação que otimize os recursos computacionais. No entanto, nos dois casos modelos hidrológicos conceituais são usados para representar o escoamento superficial em cada um desses conjuntos de células hidrológicamente semelhantes ou homogêneas. Mas a questão é:

“será que as parametrizações correntemente adotadas nos modelos atmosféricos/climáticos e hidrológicos são adequadas para responder às questões relacionadas a mudanças climáticas e seus efeitos nos recursos hídricos?”

PARAMETRIZAÇÕES CONCEITUAIS

As parametrizações conceituais são abstrações da realidade física. Por isso, são menos complexas e de maior facilidade de aplicação. Existe uma

variedade de modelos hidrológicos conceituais que têm sido aplicados principalmente no âmbito da engenharia de recursos hídricos com sucesso. Esses modelos apresentam uma visão sistemática dos processos hidrológicos, relativamente simples, compreendendo, em geral, uma rede de reservatórios. A maioria dos modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs) usam a abordagem de reservatórios para representarem os processos físicos que ocorrem na superfície terrestre, como é o caso do modelo de reservatório Budyko (Manabe, 1969).

A Figura 3 apresenta um esquema da estrutura típica dos modelos hidrológicos conceituais. O CBH (componente balanço hídrico) é o mais importante e caracteriza o modelo. Em muitos modelos, o CBH é dividido em sub-componentes que representam a superfície, uma zona intermediária e profunda do solo, expressando o balanço hídrico entre o conteúdo de água no solo, precipitação que penetra e sai do sistema, evapotranspiração e escoamento superficial. O segundo componente, CT, possui muitas vezes até três sub-componentes: TV, TD e TF, que representam a transferência e transporte de massa no sistema nas vertentes da bacia, o transporte até o ponto de controle de cada sub-bacia e desse até o exutório (ponto de controle principal) da bacia hidrográfica. A transferência entre cada um desses componentes é controlada através de expressões matemáticas associadas à descrição física do processo envolvido.

As equações matemáticas que regulam os reservatórios dos modelos consistem em geral de uma variável de estado, correspondente ao nível do reservatório e parâmetros associados às características fisiográficas da bacia. Em geral não existe uma relação direta e clara entre os parâmetros do modelo

e características físicas da bacia hidrográfica. Os parâmetros são determinados por tentativa e erro, ou por calibração automática aplicando técnicas de otimização. A calibração do modelo apresenta problemas intrínsecos; a solução do problema matemático não é simples, as funções são não lineares e caracterizadas por patamares limitantes que provocam descontinuidades na superfície de resposta. Isso, além de dificultar a determinação dos parâmetros, pode levar a valores sem significação física direta, comprometendo a aplicação desse tipo de parametrização a estudos dos efeitos de variações climáticas no ciclo hidrológico.

Na grande parte, dos modelos conceituais aplicados em hidrologia, a variabilidade espacial (não distribuídos) não é representada e a geração de escoamento superficial está associada em geral apenas ao processo hortoniano, ou seja, da formação do escoamento por excesso de infiltração. Estudos de campo, detalhados sobre a geração de escoamento superficial, têm demonstrado que o escoamento sub-superficial tem também um papel importante na geração do escoamento superficial (Dunne, 1978; Sklash & Farvolden, 1979). Em regiões tropicais e úmidas florestadas, por exemplo, raramente escoamento hortoniano é observado (Hodnett et al., 1995; Nortcliff & Thornes, 1981).

O conceito de áreas de contribuição, descrito em Hewlett & Hibbert (1967), incorpora a dimensão espacial na geração do escoamento superficial. Embora este conceito tenha sido estabelecido há algum tempo, só na década de 80 foi incorporado à modelagem hidrológica. Zhao et al. (1980), apresentaram uma função de distribuição potencial para representar a capacidade de armazenamento de água no solo que foi aplicada no modelo Xinanjiang (Zhao et al., 1980) e modelo ARNO (Todini, 1996). Em outro contexto, Moore & Clarke (1981) também propuseram uma metodologia semelhante a esta. Estes modelos têm a grande vantagem de representar a variabilidade espacial da geração do escoamento na bacia. No entanto, os parâmetros não estão ligados explicitamente a nenhuma característica fisiográfica da bacia hidrográfica, dificultando a aplicação destas metodologias à avaliação dos efeitos de alterações ambientais.

Alguns modelos hidrológicos, sendo o de uso mais difundido o TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979 e Beven et al., 1984), introduziram o conceito do índice topográfico através do qual a área de contribuição é delimitada. Atualmente, o índice é determinado a partir do modelo digital do terreno. Versões mais recentes do modelo incluem também a representação da variabilidade espacial da transmissividade do meio poroso (parâmetro relacionado à condutividade hidráulica dos solos).

Existe uma variedade de parametrizações conceituais. Essas parametrizações têm sido aplicadas com sucesso na modelagem hidrológica princi-

palmente no âmbito da Engenharia de Recursos Hídricos. No entanto, de uma forma geral, os parâmetros dos modelos conceituais não apresentam uma relação direta com características fisiográficas da bacia. Isso limita a aplicação dessa alternativa nos estudos de avaliação dos efeitos de mudanças climáticas e do uso do solo nos recursos hídricos. O conceito do índice topográfico é um exemplo da tentativa de associar parâmetros típicos de modelos conceituais às características físicas da bacia. Pode ser interessante incorporar essa característica à modelagem hidrológica de grandes bacias hidrográficas.

PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS

Modelos hidrológicos físico-distribuídos foram propostos como solução para a necessidade de estudar mudanças nas bacias hidrográficas, a representação espacial das variáveis de entrada e saída, o transporte de poluentes e sedimentos e na previsão do comportamento de bacias sem dados hidrológicos.

O desenvolvimento de modelos físico-distribuídos tem sido de uma certa forma fragmentado (Beven & O'Connell, 1982). Existe uma variedade de desenvolvimentos na parametrização individual dos processos hidrológicos, aplicando métodos analíticos e numéricos na solução das equações físicas envolvidas. No entanto, poucas têm sido as tentativas citadas na literatura de construir um sistema completo: o "Système Hydrologique Européen" (SHE, Abbott et al., 1986 a, b e Bathurst, 1986 a, b) e o modelo distribuído do Instituto de Hidrologia do Reino Unido (IHDM, Beven et al., 1987 e Calver, 1988) são exemplos dessas tentativas.

Nos dois casos, SHE e IHDM, a bacia hidrográfica é subdividida em pequenas unidades, e para cada uma dessas unidades as equações físicas associadas com as principais fases do ciclo hidrológico (intercepção vegetal, evapotranspiração, fluxo de água nas zonas saturada e não saturada do solo, etc.) são representadas e resolvidas. O fluxo lateral entre unidades também é representado. No entanto, nem o SHE e nem o IHDM são representações tridimensionais do ciclo hidrológico. Em princípio é possível escrever as equações físicas no domínio tridimensional e, até mesmo, ainda que complexo, derivar soluções, mas a alimentação de dados seria um problema para tal sistema. Além disso, a capacidade computacional aliada ao nível de discretização espacial e, conseqüentemente, a restrição do tamanho da bacia hidrográfica seriam outros fatores limitantes.

A aplicação do SHE e do IHDM a pequenas bacias hidrográficas tem obtido um certo sucesso. Embora a inicialização e simulação do modelo seja trabalhosa e demande tempo, estes modelos são ferramentas valiosas na compreensão do comportamento da bacia hidrográfica. Existe, no entanto, uma

discussão a respeito de um número de aspectos envolvendo a modelagem físico-distribuída: o método de discretização da bacia hidrográfica, questões sobre efeitos de escala, problemas numéricos na solução das equações, base de dados, validação ou questões filosóficas a respeito da significação e qualidade dos resultados obtidos (Beven, 1989; Bathurst & O'Connell, 1992; Binley & Beven, 1992). A aplicação desses modelos a escalas superiores pode ainda levar a outros problemas.

Os modelos atmosféricos regionais e de meso-escala operam numa escala menor aproximadamente da ordem de dez vezes em relação aos MCGAs. Esses modelos incorporam numa perspectiva diferente de escala a representação dos processos físicos envolvidos na representação solo-vegetação-atmosfera. A parametrização das SVATS (Soil Vegetation Atmosphere Transfer Schemes) foi proposta numa tentativa de tornar a representação dos modelos regionais de clima fisicamente mais realista e a levar a uma maior confiabilidade nas previsões. A aplicação das SVATS pode reproduzir resultados melhores. No entanto, em alguns aspectos apresentam limitações similares às parametrizações dos modelos hidrológicos físicos.

A parametrização no modelo SiB (Sellers et al., 1986), por exemplo, possui inúmeros parâmetros que representam propriedades e características físicas do solo e da vegetação nem sempre de fácil definição. Esforços observacionais (Shuttleworth, 1991 e Liebscher, 1993) podem ser realizados no sentido de determinar esses parâmetros, no entanto, esses experimentos são onerosos e de representatividade espacial questionável. A reprodução desses experimentos por todo planeta não é viável. A aplicação de ferramentas de sensoriamento remoto pode contribuir no sentido de alargar os horizontes de aplicabilidade desses experimentos. Mas nem sempre as técnicas de sensoriamento remoto são aplicáveis.

Assim, se por um lado as parametrizações físicas incorporam maior realismo à modelagem, por outro são de aplicação bem mais complexa e, computacionalmente, mais onerosas do que as parametrizações conceituais. Além disso, a formulação implícita nesse tipo de abordagem está associada em geral à equações físicas estabelecidas e validadas em laboratório ou em experimentos locais. Sua extensão direta para escalas superiores pode introduzir perda de realismo e problemas operacionais à modelagem.

A QUESTÃO DA ESCALA

Um grande número de modelos/parametrizações foram desenvolvidos visando aplicações em pequenas regiões ou bacias hidrográficas, onde o problema de escala é abordado em geral de forma simplista, tendendo a generalizar relações que foram estabelecidas para a escala pontual (plot) para áreas

maiores. Tal aproximação só estaria teoricamente correta para processos lineares, o que raramente é o caso para os processos físicos verificados na natureza.

A modelagem dos processos físicos, que ocorrem na superfície terrestre, compreende uma variedade de fenômenos que ocorrem naturalmente num espectro de escalas de várias ordens, de magnitude, tanto no espaço quanto no tempo. As relações matemáticas que descrevem um determinado fenômeno físico são em geral dependentes da escala; na verdade diferentes relações surgem para diferentes escalas de tempo e espaço (Dooge, 1986). Como representar e integrar todos esses processos é uma das questões centrais no desenvolvimento de modelos hidrológicos para a macro escala.

A escala em que determinado processo físico ocorre pode ser intrínseca ao sistema ou imposta pela forma como observamos e analisamos determinado processo. O ideal seria que os processos físicos pudessem ser observados na mesma escala que ocorrem e daí derivar diretamente a relação que melhor descreveria o fenômeno. No entanto, isso nem sempre é possível já que instrumentos para observação não podem ser construídos para operar em qualquer escala e as observações são então, em geral, associadas à escala pontual. Além disso, os processos hidrológicos operam muitas vezes de forma simultânea em diferentes escalas.

Khunel et al. (1991), aplicaram elementos da análise parcial no estudo das escalas associadas à modelagem do conteúdo de água no solo. Para cada uma das cinco sub-escalas definidas (partícula, "pendon", sítio, bacia e bioma) corresponderia um modelo associado com variáveis e parâmetros próprios correspondentes àquela escala. A compreensão da interação entre escalas possibilitaria que a informação conhecida numa determinada escala seja extrapolada para outra. No entanto, a compreensão da interação entre escalas caracteriza-se como um dos problemas mais complexos na modelagem matemática de fenômenos físicos naturais (Blöschl & Sivapalan, 1995; Milly, 1991).

A transferência de informações entre diferentes escalas pode ser feita através de uma abordagem estocástica ou de maneira determinística. A abordagem estocástica é mais direta e envolve o uso de funções de distribuição de probabilidade. Já a abordagem determinística é mais complexa, mas tem um potencial maior de capturar as características físicas da bacia hidrográfica.

A ligação entre escalas pode seguir a direção de baixo para cima, ou seja, da escala associada ao plot para escalas maiores, ou o inverso, da escala maior para menor (Figura 4). O último caso envolve a desagregação da informação, o que significa a partir da informação conhecida para um determinado nível identificar os fatores relacionados a escalas inferiores que podem ter levado àqueles valores no nível mais

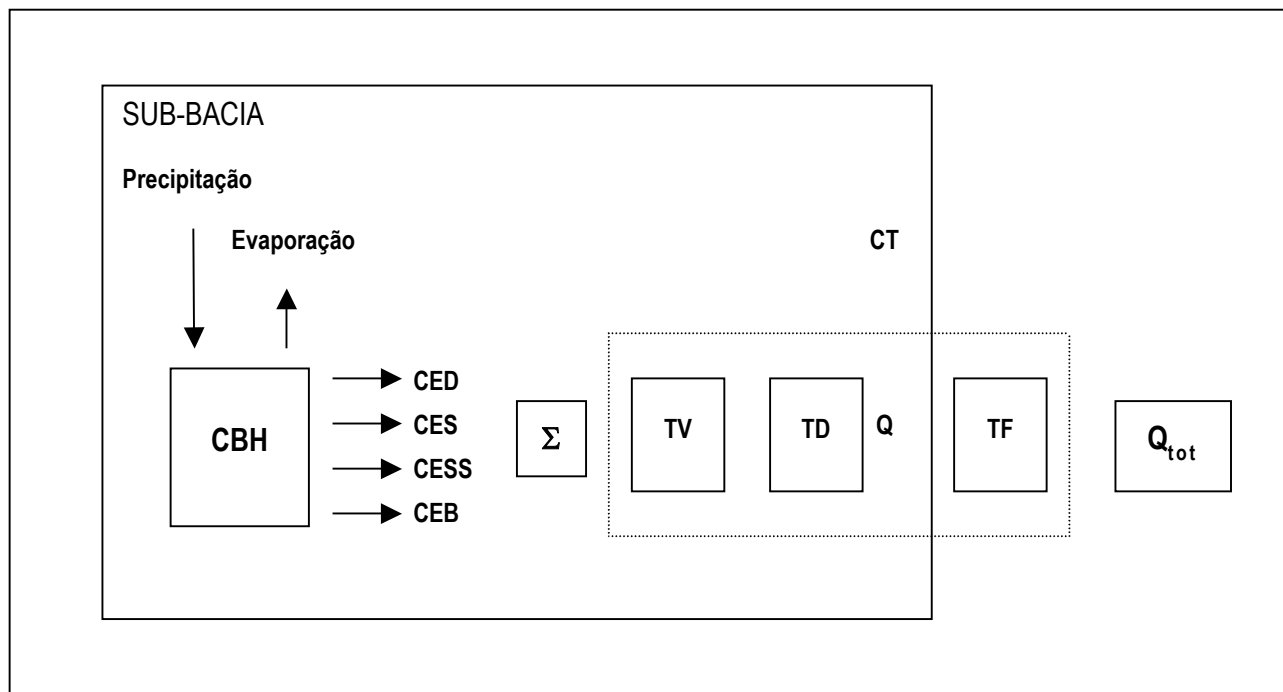


Figura 3. Estrutura típica dos modelos conceituais (adaptado de Franchini & Pacciani, 1991).

(CBH é o componente de balanço hídrico no solo, em geral composto por uma rede de reservatórios que representam as diferentes zonas do solo e que tem como dado de entrada a precipitação e dados que possibilitem o cálculo da evaporação; do balanço hídrico no solo, em geral, quatro diferentes componentes que contribuem para a formação da vazão fluvial, o CED, componente de escoamento direto em áreas saturadas da bacia hidrográfica, o CES, componente de escoamento superficial, o CESS, componente de escoamento sub-superficial e o CEB, componente de escoamento básico são gerados. O somatório destes componentes depois de transportado pelas vertentes da bacia (Transferência - T nas Vertentes - V) e pela rede de drenagem (Transferência - T na rede de Drenagem - D), resulta na vazão contribuinte da sub-bacia, Q, e que transladada junto a outras sub-bacias contribuintes através da calha fluvial pelo componente TF (Transferência Fluvial) resulta na vazão final na seção de controle ou exutório da bacia hidrográfica "envoltória", Q_{tot})

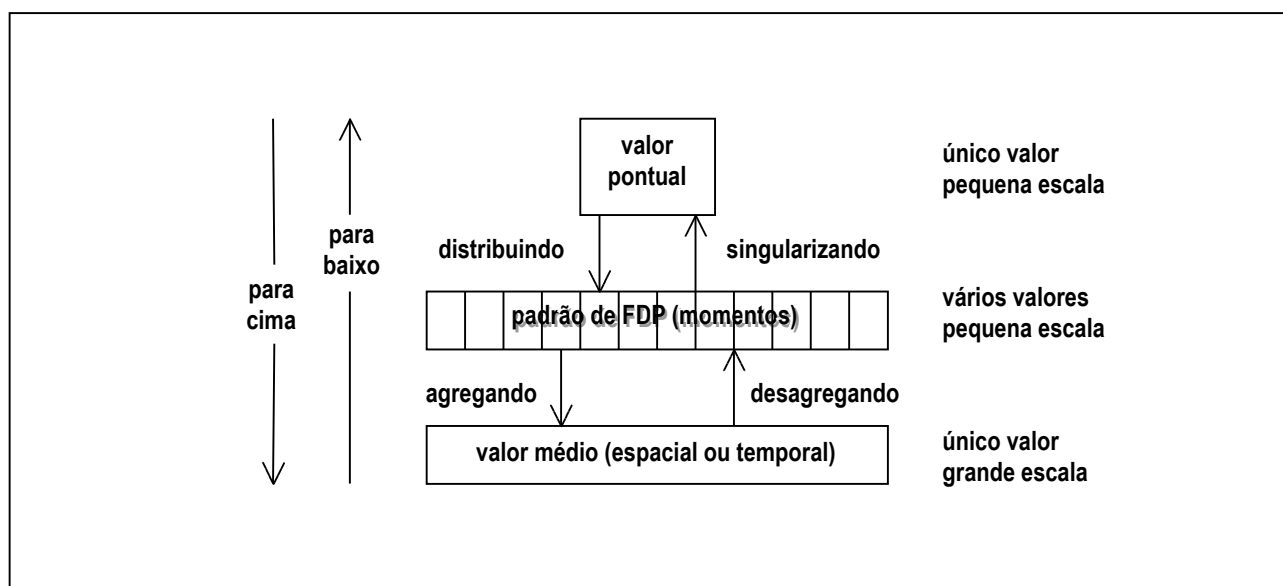


Figura 4. Ligações através das escalas (adaptado de Blöschl & Sivapalan, 1995).

alto. Já o caminho inverso, de-baixo-para-cima envolve agregação de informações, ou seja, a combinação de informações ou teorias que ocorrem no nível mais baixo para determinação do processo associado no nível mais elevado em escala. Na prática, a integração entre escalas pode não ter sentido físico para todo e qualquer parâmetro, já que alguns parâmetros têm muitas vezes sua definição associada à escala de observação do fenômeno. Este é o caso por exemplo do parâmetro de condutividade hidráulica dos solos.

Vorösmarty et al. (1993), propuseram o desenvolvimento de sistemas multi-escalas, ou seja, o desenvolvimento de parametrizações que permitam a elevação e/ou redução de escalas para a representação dos fenômenos físicos, promovendo o acoplamento e preenchendo a lacuna entre as escalas dos modelos hidrológico e atmosférico.

Diferentes alternativas de abordagens para integração entre escalas (scaling) têm sido discutidas na literatura (King, 1991; Rastteter et al., 1992). A mais simples é adotada largamente em modelos hidrológicos conceituais e representa os processos de forma concentrada, ou seja, invariantes com a escala.

Já modelos como o SHE (Abbott et al., 1986a, b; Bathurst, 1986a, b) assumem que a área de estudo pode ser dividida em diferentes sub-elementos e o modelo adotado para a escala do plot é adotado para cada um desses sub-elementos. O comportamento para a escala superior, por exemplo da bacia hidrográfica, resulta da integração das repostas de cada sub-elemento. No caso de não se assumir interação entre sub-elementos, a resposta é simplesmente a soma dos valores de cada sub-elemento. Este método pode ser de uso limitado quando o modelo matemático envolver solução de várias equações diferenciais, podendo ocorrer problemas de convergência numérica e tornando a operação do modelo trabalhosa e demandante de tempo.

A extrapolação da menor escala para a maior pode também ser feita pela integral tempo-espacial da equação diferencial que representa um determinado fenômeno físico. Chen et al. (1994a, b) desenvolveram essa estratégia para a equação de Richards. Mas um sistema completo derivado dessa forma, se possível, pode apresentar excessiva complexidade. Adicionalmente, outra dificuldade seria a validação desse sistema.

Pimentel da Silva & Ewen (1998), sugerem uma alternativa para parametrização do fluxo vertical para baixo na matriz não saturada do solo que reúne a simplicidade das parametrizações conceituais e a associação explícita às características físicas dos solos comuns nos modelos hidrológicos

tipo físico-distribuídos. A parametrização envolve uma aproximação da equação de Richards usando a equação linear de convecção-dispersão que possui dois parâmetros determinados diretamente das propriedades físicas dos solos através das funções de retenção e condutividade hidráulica (Pimentel da Silva, 1997). Como a equação é linear, a relação entre entrada e saída para a zona não saturada do solo é dada por uma função de transferência, e a elevação de escalas (que incorpora os efeitos da variabilidade espacial das propriedades físicas dos solos e profundidade da zona não saturada) pode ser representada pela superposição de funções de transferência. As simulações aplicando o modelo proposto para casos reais apresentaram excelente aderência se comparadas às simulações aplicando a equação de Richards. Foram verificados coeficientes de determinação (r^2) superiores a 0,950.

A principal conclusão desta discussão é que os procedimentos para introdução da perspectiva do problema da escala à parametrização dos processos físicos (ou seja para integrar processos através de diferentes escalas), excetuando-se o caso de sistema linear em que o valor para a escala superior é simplesmente a média ponderada dos valores pontuais, são de difícil aplicação prática.

BASES DE DADOS

Na aplicação e no desenvolvimento de modelos hidrológicos sempre é uma preocupação central a disponibilidade de dados. Os dados necessários nos modelos para grandes bacias hidrográficas (macro-modelos) não diferem substancialmente dos dados para outras aplicações hidrológicas. No entanto, a escala de operação destes modelos implica no desenvolvimento de grandes bases de dados. Arnell (1993) apresenta uma revisão detalhada dos dados necessários na aplicação de macro-modelos. Alguns experimentos como FIFE (First ISLSCP - International Satellite Land-Surface Climatology Project - Field Experiment) e LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia) estão sendo conduzidos e irão prover dados para sistemas nessa escala. São necessários dados para desenvolvimento, inicialização e operação, e validação desses modelos.

Embora uma parte dos dados necessários para operação desses sistemas sejam rotineiramente coletados, existem algumas partes do globo onde nem sempre os dados consistidos com a distribuição espaço-temporal apropriadas estejam disponíveis. No caso do Brasil, a região amazônica

é de especial interesse nos estudos sobre mudanças climáticas e recursos hídricos e é especialmente crítica em termos de dados ambientais. Além de estar localizada geograficamente numa região do Brasil com pouca infra-estrutura, a floresta densa dificulta o acesso à região. Nem sempre as séries temporais, que caracterizam alguns dados hidrológicos e climatológicos, são contínuas (apresentam muitas falhas de observação) e com detalhamento espaço-temporal insuficiente comparado à vastidão da região.

Além dos dados climatológicos (como precipitação e os dados usualmente aplicados no cálculo da evaporação, radiação, temperatura, velocidade do vento, umidade) e dados hidrológicos (como observações fluviométricas, nível do lençol freático e conteúdo de umidade dos solos) necessários no desenvolvimento e em todas as etapas de aplicação do modelo, dados considerados estacionários, aqui referenciados como fisiográficos, também serão de extrema importância para macro-modelos.

Os dados fisiográficos consistem principalmente de informações topográficas e informações sobre os solos. No caso da topografia, está cada vez mais difundido o uso de modelos digitais de terreno (MDT). Mas vale a pena ressaltar que a escala do MDT é um fator crítico na qualidade da resposta das parameterizações que usam esta informação.

As propriedades físicas dos solos são especialmente relevantes tanto no desenvolvimento quanto na aplicação do modelo. Embora algumas vezes de aplicação restrita, os trabalhos de Saxton et al. (1986) e Rawls & Brakensiek (1989), introduziram uma nova possibilidade na determinação das características físicas dos solos através de regressão usando os dados de textura dos solos. Tomassella & Hodnett (1997), apresentaram um estudo nesta linha envolvendo um número de diferentes tipos de solos encontrados no Brasil. Outras propriedades dos solos, menos disponíveis, como por exemplo capacidade de infiltração são variantes no tempo mas também são importantes.

A cobertura vegetal também pode variar ao longo do tempo afetando a capacidade de interceptação vegetal e o comportamento fisiológico que controla a retirada de água do solo (transpiração). Mapas também podem ser úteis na avaliação da distribuição espacial no caso de regiões não homogêneas. A distribuição espacial pode também ser adquirida através de sensoriamento remoto, resultando em mapas com maior resolução. As técnicas de sensoriamento remoto também têm sido utilizadas na determinação da temperatura da superfície para cálculo da evaporação (Holwill &

Stewart, 1992) e na determinação do conteúdo de umidade nas camadas superficiais do solo (Jackson & Schmugge, 1981).

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO: A NECESSIDADE DE UM NOVO MÉTODO

Existe um debate na comunidade científica mundial sobre os possíveis efeitos do aquecimento global. Para hidrólogos e gestores de recursos naturais e mais especificamente dos recursos hídricos, a problemática em questão envolve a possibilidade da modificação do regime hidrológico na escala da bacia hidrográfica. Essa escala pode chegar até a milhares de quilômetros quadrados, no caso de bacias continentais.

No âmbito da engenharia de recursos hídricos, ao longo dos anos, foram desenvolvidos e aplicados com sucesso uma grande variedade de modelos hidrológicos que simulam de forma sistemática os processos envolvidos no ciclo hidrológico na bacia hidrográfica. Esses modelos, no entanto, operam em geral, numa escala inferior à dos modelos atmosféricos regionais e globais.

As previsões sobre os efeitos climáticos associados ao efeito estufa baseiam-se, em geral, em estudos de cenários aplicando MCGAs. Modelos regionais de clima, que operam numa escala inferior, fornecem para algumas regiões, sobretudo as com relevo acentuado, previsões mais confiáveis. Os limites inferiores da escala de operação desses modelos coincidem com a escala em que operam modelos hidrológicos para grandes bacias hidrográficas (macromodelos).

Os modelos atmosféricos e climáticos, no entanto, não estão preparados para responder às questões básicas de interesse dos hidrólogos. Na verdade, estes modelos não foram desenvolvidos com este propósito. Não há representação dos efeitos de amortecimento e traslado de massa na rede de drenagem por exemplo, o que pode ser importante no caso de grandes bacias hidrográficas. A representação do processo de formação do escoamento superficial também é outro fator crítico. Em geral, apenas o mecanismo de formação por excesso de infiltração é simulado. Estudos de campo têm demonstrado que para muitas regiões o sistema subterrâneo tem grande influência na formação do escoamento na bacia.

Uma possível alternativa é o uso de variáveis provenientes de simulações dos modelos atmosféricos, por exemplo previsão de chuvas e/ou temperatura, como variáveis de entrada do modelo hidrológico. No entanto, esse tipo de aplicação pode implicar na necessidade de desagregação

desses dados para adequação à escala de operação implícita na modelagem hidrológica. Adicionalmente, nessa alternativa não são representadas as interações entre os processos hidrológicos e atmosféricos.

É preciso que hidrólogos e meteorologistas trabalhem juntos no sentido de desenvolver parametrizações fisicamente mais realísticas e que representem as interações entre os processos atmosféricos e os associados à superfície terrestre (ciclo hidrológico). A idéia do desenvolvimento de sistemas multi-escala (Vorösmarty et al., 1993), que permitam o acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos, parece ser o caminho mais viável para isso. Já existem algumas iniciativas, em curso no desenvolvimento de sistemas, que permitam o acoplamento entre modelos atmosféricos e modelos hidrológicos, como o sistema UP (Ewen, 1997 e Ewen & Sloan, 1999) e o sistema TOPLATS (Famiglietti & Wood, 1994 a, b).

A aplicação dos sistemas multi-escalas envolve a utilização de grandes bases de dados com boa resolução espaço-temporal. É importante que as bases de dados sejam flexíveis permitindo crescimento no volume de informações e atualizações periódicas. As células ou sub-elementos do modelo devem ser, idealmente, equivalentes a pequenas bacias hidrográficas. Como o sistema multi-escala envolve simulações num grande espectro de escalas, é necessário o desenvolvimento de metodologias para agregar e desagregar dados e variáveis. As parametrizações conceituais ou puramente físicas mais frequentemente adotadas nos modelos hidrológicos e atmosféricos não foram elaboradas para esta abordagem. É necessário, o desenvolvimento de novas parametrizações para os sistemas integrados atmosférico-hidrológico. Adicionalmente, iniciativas observacionais, embora custosas, são de extrema relevância tanto no desenvolvimento das parametrizações dos processos envolvidos, como na validação desses sistemas. Com base na avaliação apresentada, anteriormente, sobre as diferentes alternativas para a parametrização dos fenômenos físicos, nesses modelos, recomenda-se como principais características para essas parametrizações que:

- sejam compatíveis com o volume de informações e dados disponíveis para o desenvolvimento, operação e validação das mesmas. As limitações na disponibilidade e qualidade dos dados para algumas regiões do planeta devem ser consideradas, no intuito de maximizar a abrangência de aplicabilidade dos modelos;
- a parametrização a ser adotada para representar os processos físicos deve incorporar realismo físico, com representação da heterogeneidade da superfície terrestre, diferentes processos de formação do escoamento superficial, representação do sis-

tema do lençol subterrâneo e interação entre sub-células do modelo, representando os efeitos de amortecimento e traslado na rede de drenagem. Adicionalmente, a compreensão dos caminhos percorridos pela água nas vertentes da bacia hidrográfica e os tempos de residência podem favorecer a modelagem dos fluxos hidroquímicos;

- realismo físico não deve necessariamente significar complexidade excessiva. O tempo de processamento computacional deve ser minimizado e a praticidade da operação maximizada. Muitas abordagens conceituais possuem estrutura simples e são relativamente fáceis de operar. As características descritivas do ciclo hidrológico representadas nestes modelos, explicitando as principais fases do ciclo devem ser incorporadas na modelagem de grandes bacias hidrográficas (macro-modelos). O sistema ideal deve incorporar o realismo físico dos modelos puramente físicos com a simplicidade e praticidade da modelagem conceitual;
- os parâmetros dos modelos devem estar associados a características físicas, e, se possível, serem passíveis de obtenção através de observações de campo, avaliações em mapas ou através de sensoriamento remoto, evitando o processo de ajuste e calibração de parâmetros. Além disso, o modelo deve ser sensível aos parâmetros para que seja possível a simulação dos efeitos devido a mudanças das características fisiográficas e climáticas.

Finalmente, a proposição de novas metodologias para modelagem hidrológica de grandes bacias hidrográficas tem multi-objetivos. Além do aprimoramento da própria representação dos processos hidrológicos, nessas bacias de grande porte, essas novas metodologias têm aplicação na avaliação dos efeitos climáticos advindos do efeito estufa e mudança do uso do solo assim como, suas consequências na disponibilidade e distribuição espacial dos recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento desse estudo e às sugestões dos revisores anônimos.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. (1986 a) An introduction to the European hydrological system - Système Hydrologique Européen, 'SHE', 1: history and philosophy of a physically-based distributed modelling system, *J. Hydrol.*, 87, p. 45-59.
- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. (1986 b) An introduction to the European hydrological system - Système Hydrologique Européen, 'SHE', 2: structure of a physically-based distributed modelling system, *J. Hydrol.*, 87, p. 67-77.
- ARNELL, N. W. (1993) Data requirements for macroscale modelling of the hydrosphere, in *Macroscale Modelling of the Hydrosphere*, IAHS publ. n° 214, p. 139-50.
- BATHURST, J. C. (1986 a) Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Système Hydrologique Européen, *J. Hydrol.*, 87, p. 79-102.
- BATHURST, J. C. (1986 b) Sensitive analysis of the Système Hydrologique Européen for an upland catchment, *J. Hydrol.*, 87, p. 103-23.
- BATHURST, J. C.; O'CONNELL, P. E. (1992) *Future of distributed modelling: the Système Hydrologique Européen*, Hydrol. Process., 6, p. 265-77.
- BECKER, A.; NEMEC, J. (1987) *Macroscale hydrologic models in support to climate research*, IAHS Publ., n°168, p. 431-45.
- BEVEN, K.; KIRKBY, M. J. (1979) *A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology*, Hydrol. Sci. Bull., 24 (1), p. 43-69.
- BEVEN, K.; O'CONNELL, P. E. (1982) *On the role of physically-based distributed modelling in hydrology*, Report n° 81, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- BEVEN, K.; KIRKBY, M. J.; SCHOFFIELD, N.; TAGG, A. (1984) Testing a physically-based, flood forecasting model TOPMODEL for three U. K. catchments, *J. Hydrol.*, 69, p. 119-43.
- BEVEN, K.; CALVER, A.; MORRIS, E. M. (1987) *The Institute of Hydrology distributed model*, Report n° 98, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- BEVEN, K. (1989) Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models, *J. Hydrol.*, 105, p. 157-72.
- BINLEY, A.; BEVEN, K. (1992) *The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction*, Hydrol. Process., 6, p. 279-98.
- BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M. (1995) *Scale issues in hydrological modelling: a review*, Hydrol. Process., 9, p. 251-90.
- CALVER, A. (1988) Calibration, sensitivity and validation of a physically based rainfall-runoff model, *J. Hydrol.*, 103, p. 103-15.
- CHEN, Z.; GOVINDARAJU, R. S.; KAVVAS, M. L. (1994 a) *Spatial averaging of unsaturated flow equations under infiltration conditions over areally heterogeneous fields*, 1. Development of models, Water Resour. Res., 30 (2), p. 523-33.
- CHEN, Z.; GOVINDARAJU, R. S.; KAVVAS, M. L. (1994 b) *Spatial averaging of unsaturated flow equations under infiltration conditions over areally heterogeneous fields*, 2. Numerical simulations, Water Resour. Res., 30 (2), p. 535-48.
- DOOGE, J. C. I. (1986) *Looking for hydrologic laws*, Water Resour. Res., 22 (9), 46s-58s.
- DUNNE, T. (1978) Field studies of hillslope flow processes, in *Hillslope hydrology*, M. J. Kirkby (ed.), John Wiley and Sons, p. 227-94.
- EWEN, J. (1997) *'Blueprint' for the UP modelling system for large scale hydrology*, Hydrology and Earth System Sciences, 1, p. 55-69.
- EWEN, J.; SLOAN, W. T. (1999) *UP modeling system for large scale hydrology: deriving large-scale physically-based parameters for the Arkansas-Red River Basin*, Hydrology and Earth System Sciences, 3 p. 125-36.
- FAMIGLIETTI, J. S.; WOOD, E. (1994 a) *Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes*, Water Resour. Res., 30 (11), 3061-3078.
- FAMIGLIETTI, J. S.; WOOD, E. (1994 b) *Application of multiscale water and energy balance models on a tallgrass prairie*, Water Resour. Res., 30 (11), 3079-3093.
- FRANCHINI, M.; PACCIANI, M. (1991) Comparative analysis of rainfall-runoff models, *J. Hydrol.*, 122, p. 161-219.
- HEWLETT, J. D.; HIBBERT, A. R. (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas, in *Forest Hydrology*, W. E. Sopper and H. W. Lull (eds.), Pergamon, p. 275-90.
- HODNETT, M. G.; PIMENTEL DA SILVA, L.; DA ROCHA, H. R.; CRUZ SENNA, R. (1995) Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture, *J. Hydrol.*, 170, p. 233-54.
- HOLWILL, C. J.; STEWART, J. B. (1992) *Spatial variability of evaporation derived from aircraft and ground-based data*, J. Geophys. Res., 97 (D17), 18673-18680.
- JACKSON, T. J.; SCHMUGGE, T. J. (1981) *Aircraft active microwave measurements for estimating soil moisture*, Photogr. Eng. Remote Sensing, 47 (6), 801-805.
- KING, A. W. (1991) *Translating models across scales in the landscape*, Ecological Studies, 82, p. 479-517.
- KOUWEN, N.; SOULIS, E. D.; PIETROMIRO, A.; DONALD, J.; HARRINGTON, R. A. (1993) Grouped Response Units for Distributed Hydrologic Modelling, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 199 (3), p. 1-17.
- KUHNEL, V.; DOOGE, J. C. I.; O'KANE, J. P. J.; ROMANOWICZ, R. J. (1991) *Partial analysis applied to scale problems in surface moisture fluxes*, Surv. Geophys., 12, p. 221-47.
- LIEBSCHER, H. J. (1993) Hydrology for the water management of large river basins, *Hydrol. Sci. Bull.*, 38 (11), p. 1-13.

- MANABE, S. (1969) *Climate and ocean circulation: 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface*, Mon. Wea. Rev., 97, 739-774.
- MILLY, P. C. D. (1991) *Some current themes in physical hydrology of the land-atmosphere interface*, IAHS publ. no. 204, p. 3-9.
- MITCHELL, J. B. F.; MANABE, S.; MELESHKO, V.; TOKIOKA, T. (1990) *Equilibrium climate change – and its implication for the future*, In: J. T. Houghton, G. T. Jenkins e J. J. Ephraums (Ed.), *Climate Change*, The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, Cambridge, p. 131-72.
- MOORE, R. J.; CLARKE, R. T. (1981) *A distribution function approach to rainfall-runoff modelling*, Water Resour. Res., 17 (5), 1367-1382.
- NORTCLIFF, S.; THORNES, J. B. (1981) Seasonal variations in the hydrology of a small forested catchment near Manaus, Amazonas, and its implications for management. In R. Lal e E. W. Russell (Editores), *Tropical Agriculture Hydrology*. John Wiley, New York.
- OTT, M.; SU, Z.; SCHUMANN, A. H.; SCHULTZ, G. A. (1991) *Development of a distributed hydrological model for flood forecasting and impact assessment of land-use change in the international mosel river basin*, IAHS Publ. no. 201, p. 183-94.
- PIMENTEL DA SILVA, L.; EWEN, J. (1998) *GRASP physical parameterization of groundwater recharge for large-scale hydrological modelling*, submetido.
- PIMENTEL DA SILVA, L. (1997) *Large scale hydrological modelling: physical parameterisation for groundwater recharge*, Ph. D. thesis, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne, UK.
- RASTETTER, E. B.; KING, A. W.; COSBY, B. J.; HORNBERGER, G. M.; O'NEIL, R. V.; HOBBIIE, J. E. (1992) *Aggregating fine-scale ecological knowledge to model coarser-scale attributes of ecosystems*, Ecological Applications, 2, p. 55-70.
- RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L. (1989) Estimation of soil water retention and hydraulic properties, in *Unsaturated flow in hydrologic modeling: theory and practice*, H. J. Morel-Seytoux (ed.), Kluwer Academic Publishers, p. 275-300.
- SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J.; ROMBERGER, J. S.; PAPENDICK, R. I. (1986) *Estimating Generalized Soil-Water Characteristics from Texture*, Soil Sci. Soc. Am. J., 50, 1031-1036.
- SELLERS, P. J.; MINTZ, I.; SUD, Y. C.; DALCHER, A. (1986) *A Simple Biosphere (SiB) Model for use within General Circulation Models*, J. Atmos. Sci., 43, p. 505-531.
- SHUTTLEWORTH, W. J. (1988) Macrohydrology - The new challenge for process hydrology, *J. Hydrol.*, 100, p. 31-56.
- SHUTTLEWORTH, W. J. (1991) *The modellion concept*, Rev. Geophys., 29 (4), 585-606.
- SKLASH, M. G.; FARVOLDEN, R. N. (1979) The role of groundwater in storm runoff, *J. Hydrol.*, 43, p. 45-65.
- SOLOMON, S. I.; DENOUVILLIEZ, J. P.; CHART, E. J.; WOOLLEY, J. A.; CADOU, C. (1968) *The use of a square grid system for computer estimation of precipitation, temperature and runoff*, Water Resour. Res., 4 (5), 919-929.
- TODINI, E. (1996) The ARNO rainfall-runoff model, *J. Hydrol.*, 175, 339-382.
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. (1997) *Estimating unsaturated hydraulic conductivity of brazilian soils using soil - water retention data*, Soil Science, 162 (10), 703-712.
- UNEP/WMO (1983) *A Square Grid Hydrological Study of the Amazon River Basin*, Progress Report n° 8 (1022-02-1-83), on Project BRA/72/010, Shawinigan Eng. Comp. Ltd..
- VORÖSMARTY, C. J.; MOORE III, B.; GRACE, A. L.; GILDEA, M. P.; MELILLO, J. M.; PETERSON, B. J.; RASTETTER, E. B.; STEUDLER, P. A. (1989) *Continental scale models of water balance and fluvial transport: an application to South America*, Global Biogeochem. Cycles, 3, p. 241-65.
- VORÖSMARTY, C. J.; GUTOWSKI, W. J.; PERSON, M.; CHEN, T. C.; CASE, D. (1993) *Linked atmosphere-hydrology models at the macroscale, in Macroscale Modelling of the Hydrosphere*, IAHS publ. n° 214 p. 3-27.
- WOOD, E. F. (1991) *Global scale hydrology: advances in land surface modelling*, Rev. Geophys., supplement, p. 193-201.
- ZHAO, R. J.; ZUANG, Y. L.; FANG, L. R.; LIU, X. R.; ZHANG, Q. (1980) *The Xinanjiang Model, Hydrological Forecasting*, Proceedings of Oxford Symposium, IAHS Publ. n° 129, p. 351-56.

Large Scale Hydrological Modelling: The Need for New Approaches

ABSTRACT

In recent years man has become increasingly concerned about the effects of changes in land use associated with land management and, urban and industrial development, including deforestation of large tropical forests, on the availability and distribution of water resources. Water is vital for life and any possibility of changes in these resources should be taken very seriously. Land surface processes interact with the atmosphere through the exchange of energy and water. This interaction is dynamic and complex, involving processes that occur naturally over a range of scales. A new discipline in hydrology, large-scale hydrology or macrohydrology, arises in this context. Current procedures to represent land surface hydrological processes are reviewed supporting the need for the development of new parameterization schemes on a large scale. The main requirements for these new approaches are physical meaning, coherence between physical detail and comprehensive data availability, meaningful parameters associated directly to physiografic characteristics with minimum calibration requirements and easy to use.