

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO USANDO PRECIPITAÇÃO ESTIMADA PELO SATÉLITE TRMM: resultados preliminares

Bruno Collischonn¹; Walter Collischonn²; Benedito C. Silva³ & Carlos E. M. Tucci⁴

RESUMO --- A precipitação é provavelmente a variável do ciclo hidrológico que apresenta a maior variabilidade espacial. Postos pluviométricos convencionais fornecem registros contínuos no tempo, porém válidos apenas para um pequeno entorno do instrumento. Para um monitoramento adequado da precipitação em uma bacia, é exigida uma cobertura relativamente alta de pluviômetros, a qual não está disponível na quase totalidade das bacias hidrográficas brasileiras. Esta baixa densidade de postos pluviométricos tem sido o fator determinante nas incertezas dos resultados de diversos modelos hidrológicos que têm sido aplicados no país. Neste contexto, estimativas de precipitação por sensoriamento remoto podem se constituir numa ferramenta extremamente útil. Neste trabalho, se avalia em que medida as estimativas de precipitação obtidas a partir do satélite TRMM podem melhorar a simulação de vazões em um modelo hidrológico distribuído, considerando a vazão como integração dos fenômenos na bacia. Os primeiros resultados são muito promissores, e, mesmo sem qualquer correção, os dados de chuva do TRMM produzem bons coeficientes de avaliação do modelo.

ABSTRACT --- Precipitation is the hydrological cycle's component with the higher spatial variability. Conventional rain gauges provide series that are continuous in time, which however are valid only for a small area around the instrument. For an adequate monitoring of precipitation over the basin, a high coverage of rain gauges is needed, which is not available in the majority of brazilian watersheds. In recent years, this low coverage has become the main factor that produces uncertainties in hydrological modelling in Brazil. Remote sensing estimates of precipitation provide good representation of spatial variability, although punctual measurements are not as precise as rain gauges. In this work, precipitation estimates obtained from TRMM project are evaluated in a distributed hydrological model, considering that the river discharge represents the integration of all hydrological phenomena in the basin. First results are promising, and even with no correction based on ground data, TRMM produces good Nash-Suttcliffe coefficients when applied to the model.

Palavras-chave: TRMM, precipitação estimada por satélite, simulação hidrológica

1) Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPGRHSA) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS) – Av. Bento Gonçalves 9500, Caixa Postal 15029, 91051-970, Porto Alegre – RS. E-mail: 00094284@ufrgs.br

2) Professor adjunto do IPH. E-mail: collischonn@uol.com.br

3) Doutorando do PPGRHSA. E-mail: silvabenedito@uol.com.br

4) Professor titular do IPH . E-mail: tucci@iph.ufrgs.br

INTRODUÇÃO

A elaboração de modelos hidrológicos tem se constituído numa etapa importante em projetos de gerenciamento de recursos hídricos e em estudos científicos. Nas economias e sociedades atuais, a água é um recurso fundamental, demandado por diversos usos, porém poucos especialistas estão em condições de quantificar os recursos no tempo e no espaço, dada a escassez de dados fluviométricos e de recursos hídricos subterrâneos. Os modelos hidrológicos vêm preencher esta lacuna, representando a parcela do ciclo hidrológico que efetua a transformação de precipitação em vazão, constituindo-se numa ferramenta muito útil.

Os modelos hidrológicos se valem do fato que séries de chuva em geral existem em maior número e são mais extensas do que séries de vazão para preencher, estender e gerar séries de vazões. Ainda assim, existem casos em que os dados de precipitação não estão disponíveis na quantidade e na qualidade necessária para que simulações confiáveis possam ser efetuadas. Trabalhos que se dedicam à simulação chuva-vazão no país por vezes têm apresentado maus resultados, como ANA/GEF/PNUMA/OEA (2004) e Collischonn (2001), justificando-os com base não em heterogeneidades nas características físicas das bacias, e sim na má representação espacial das precipitações.

O Modelo de Grandes Bacias ou MGB (Collischonn, 2001) vem na esteira de modelos semelhantes, como VIC-2L e LARSIM, procurando preencher o espaço intermediário entre os modelos de transformação chuva-vazão, adaptados para pequenas bacias, e os modelos de circulação global, de grande escala. O modelo tem sido usado para previsão, estudo de disponibilidade hídrica, gerenciamento de recursos hídricos e, em menor escala, avaliação de impactos de mudança de uso do solo e mudanças climáticas.

Por outro lado, a precipitação nos trópicos é um elemento importante do ciclo hidrológico e da vida e bem-estar dos seres humanos. Três quartos da energia que comanda a circulação atmosférica provém do calor latente originado da precipitação tropical. Infelizmente, a chuva é uma das variáveis atmosféricas mais difíceis de medir, por causa da sua grande variação no espaço e no tempo. Os padrões de precipitação nos trópicos oscilam fortemente entre secas severas e cheias ocasionais. Mesmo assim, freqüentemente as chuvas não duram mais do que algumas poucas horas por evento. No que diz respeito ao “aquecimento global”, os vários modelos de grande escala têm diferido entre si na magnitude prevista de aquecimento, distribuição e volume de precipitação tropical, bem como nos efeitos regionais destas alterações na temperatura e umidade. Estimativas precisas de precipitação tropical são extremamente necessárias para validar e ganhar confiança neste tipo de modelos (Kummerow et al, 2000).

Pluviômetros espalhados pela superfície terrestre coletam informações precisas da precipitação somente para uma pequena área localizada no entorno do dispositivo. O monitoramento detalhado sobre extensas áreas exige a existência de uma densa rede de pluviômetros, o que em certos casos é inviabilizado em áreas de difícil acesso como a floresta Amazônica e regiões montanhosas (de Angelis, [2004?]).

Com isso, consegue-se continuidade apenas temporal das medições, dada a impossibilidade de se dispor de aparelhos de medição sobre toda a superfície a ser observada, de onde vem a necessidade de extrapolação ou interpolação para toda a área. Mesmo a continuidade temporal é comprometida freqüentemente por erros, falta de pagamento dos medidores, falta de manutenção, etc.

Com a prática de extrapolação/interpolação, admite-se uma estimativa de precipitação para áreas mais distantes dos pontos medidos sem qualquer indício físico real sobre a quantidade de precipitação verdadeiramente ocorrida (Conti, 2002).

Modelar a distribuição do volume precipitado com informações pontuais freqüentemente induz a erros. A distância entre estações é grande. No caso de bacias transfronteiriças, a informação de precipitação é limitada em países vizinhos, e no caso de precipitação sobre mares e oceanos, a informação é praticamente indisponível. Como resultado, o volume precipitado não é corretamente representado espacialmente quando da ocorrência de eventos (Struzik, 2003).

O uso de radares meteorológicos poderia se constituir numa alternativa para este problema, não fosse sua utilização extremamente restrita no país, estando localizados próximos a grandes centros urbanos, como São Paulo, Curitiba e Fortaleza. Nestes, os problemas de drenagem em pequenas bacias urbanas e a ocorrência freqüente de fenômenos convectivos de grande intensidade justificam o investimento em um radar. Como a área de abrangência destes radares é limitada (cerca de 180km) nenhum esteve ligado a projetos de simulação ou previsão de vazões em bacias de maior porte.

Segundo Conti (2002) o emprego rotineiro de técnicas de sensoriamento remoto para estimativas de precipitação ainda é raro. Esta ausência no Brasil deve-se ao geral desconhecimento das possibilidades do sensoriamento remoto para estimativas de precipitação, a pequena difusão na sociedade das imagens de satélite e pela ausência de técnicas adaptadas às diversas condições climatológicas existentes no país.

Um grande número de metodologias para estimativa de precipitação através de imagens de satélite vem sendo proposto. Estas metodologias se baseiam em imagens feitas por vários satélites, destacando-se entre eles o GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), o METEOSAT da ESA (European Spacial Agency), o TRMM e o NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Produtos das estimativas estão disponíveis em instituições como a

NASA (National Aeronautics and Space Administration) e o NCEP (National Center of Environmental Prediction).

Como a precipitação é a variável determinante da qualidade de um modelo hidrológico, e o sensoriamento remoto parece dar uma contribuição importante na representação da distribuição temporal de eventos de chuva, surge um espaço para pesquisa científica em hidrologia, ou seja, procurar assimilar as estimativas de satélite dentro de um modelo hidrológico robusto, de forma a diminuir incertezas e ganhar confiança no mesmo.

Neste trabalho, se faz inicialmente uma apresentação do programa TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) e dos instrumentos que o mesmo dispõe para estimativa de precipitação nos trópicos.

Num segundo momento, são analisadas diferenças entre as distribuições espaciais de precipitação geradas (a) por dados de pluviômetros e (b) por estimativas do TRMM, bem como as diferenças em termos médios na bacia.

A seguir, dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM são fornecidos como variável de entrada ao Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), de forma a simular hidrológicamente a bacia do rio São Francisco até o reservatório de Três Marias. Este modelo foi calibrado com dados de pluviômetros em Silva *et al.* (2004), apresentando bons resultados. O modelo é rodado aqui usando exclusivamente produtos precipitação fornecidos pelo TRMM, sem qualquer correção baseada na rede pluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA), para testar a viabilidade de seu uso neste tipo de modelo.

Os resultados apresentados neste trabalho são preliminares, sendo que no último item do trabalho são propostas metodologias para refinamento do uso das estimativas em modelos hidrológicos e perspectivas de aplicação.

ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO POR SATÉLITE E SEU USO EM MODELOS

As imagens de satélite têm se constituído numa ferramenta para obtenção das mais diversas componentes do ciclo hidrológico. A umidade do solo, por exemplo, pode ser estimada dessa forma (Lakshimi, 2004). McGuire e Lettenmaier (2004) fizeram uso de imagens de satélite para estimar volumes de água na forma de neve, de forma a estabelecer condições iniciais de um modelo de derretimento de neve, o qual estava inserido em um modelo de previsão de vazão afluente a reservatórios. Embora esta variável desempenhe um papel muito irrelevante no cenário hidrológico brasileiro, mostra o potencial da ferramenta para estimar variáveis do ciclo hidrológico. Da mesma forma, técnicas de estimativa de balanço de energia e evapotranspiração real a partir de imagens de satélite têm sido desenvolvidas (Bastiaanssen et al. 1998a e 1998b), inclusive com uma aplicação

para o estado do Rio Grande do Sul (Giacomoni e Mendes, 2005). No entanto, a evapotranspiração é uma variável à qual os modelos hidrológicos em geral são relativamente menos sensíveis, em comparação com a precipitação, a qual é um elemento crítico na modelagem hidrológica (Guo et al., 2004).

Muitos métodos de estimativa de precipitação a partir de imagens de satélite são estimativas indiretas baseadas na temperatura de brilho do topo de nuvem. Conforme Barrera (2005), imagens em diversas bandas do infravermelho (0,7 a 1000µm) podem ser convertidas em “temperatura de brilho” ou temperatura do topo de nuvem. Esta temperatura está relacionada à altura de nuvem e ao seu desenvolvimento vertical, e conseqüentemente à intensidade de chuva gerada em células convectivas (Barrera, 2005). Atualmente, as estimativas mais precisas são obtidas com base em imagens em bandas da ordem de microondas (1 a 10mm) (Ramage et al., 2003).

A conversão de brilho espectral, que é a resposta do satélite, em temperatura de brilho é feita através da inversão da lei de Planck:

$$B(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT} - 1} \quad (1)$$

onde:

B(T)=radiação emitida por um corpo negro (absorção perfeita);

h=constante de Planck;

k=constante de Boltzmann;

λ=comprimento de onda emitido (ou refletido);

c=velocidade da luz;

T=temperatura.

Superfícies líquidas emitem cerca de metade da energia especificada pela lei de Planck e aparecem como tendo apenas a metade da sua temperatura real. Porém, gotas de água aparecem como tendo uma temperatura praticamente igual à sua temperatura real, de forma que, quanto maior o número de gotas numa imagem, mais quente ela parece. Esta característica do sensoriamento por microondas torna possível obter taxas de precipitação relativamente precisas (Cangialosi, 2004).

Em países do primeiro mundo, existe pouca literatura abordando a estimativa de chuva com imagens de satélite. Isto se deve provavelmente ao fato de que estes países possuem maior número de radares meteorológicos, os quais fornecem melhores representações da distribuição espacial das chuvas. Porém, o mesmo não vale para países em desenvolvimento, que em geral possuem esparsa rede de pluviômetros. Não é à toa, portanto, o número razoável de trabalhos encontrados que estimam precipitação via satélite sobre países da África, como Testfatsion e Dinku (2003), Ramage *et al*, (2003) e Bwanali (2003), entre outros. Com relação às estimativas de precipitação baseadas em correlações com temperatura de topo de nuvem, Barrera (2005) alerta que estas estimativas são

mais confiáveis para o caso de chuvas de origem convectiva. Assim, é de se esperar que estas estimativas produzam resultados menores em latitudes mais baixas, onde predomina a ocorrência de precipitação convectiva. Esta é provavelmente a razão para os maus resultados das estimativas feitas por Struzik (2003), que correlacionou taxa de precipitação com temperatura de topo de nuvem de forma a estimar precipitação espacial sobre a Polônia, país onde as chuvas são predominantemente frontais.

Por um lado, a pequena atenção dada ao uso de precipitação estimada por satélite em modelos hidrológicos se deve ao fato de que nos países desenvolvidos, que detêm a maior parte da produção científica, este tipo de pesquisa tem um menor interesse, já que estes geralmente possuem radares meteorológicos em bom número, não justificando o uso de metodologias por vezes mais complexas e com resultados geralmente piores. Por outro lado, se trata de uma área relativamente nova de pesquisa, uma vez que estas estimativas são mais recentes, de forma que ainda há poucos pesquisadores se debruçando sobre o assunto, conferindo um certo ineditismo ao trabalho.

O MODELO HIDROLÓGICO DE GRANDES BACIAS – MGB

O modelo hidrológico utilizado foi desenvolvido para simular o processo de transformação de chuva em vazão em grandes bacias hidrográficas. O modelo é distribuído e utiliza células regulares, as quais são sub-divididas em blocos, de acordo com as informações sobre os tipos e usos do solo e a cobertura vegetal da bacia (Collischonn, 2001). O intervalo de tempo de cálculo é de 1 dia ou menos, embora alguns processos de cálculo internos, como a propagação de ondas de cheia nos rios, utilizem intervalos de tempo de algumas horas.

Nas aplicações do modelo realizadas até agora, a resolução espacial (ou o tamanho das células) variou entre 10 x 10 km e 0,1 x 0,1 graus.

A variabilidade espacial da precipitação é considerada através da interpolação dos dados dos postos pluviométricos para cada uma das células.

A variabilidade dos tipos de solos e do seu uso e cobertura vegetal é considerada através da utilização de planos de informação classificados a partir de imagens de satélite, ou mapas digitalizados. A variabilidade espacial do relevo é considerada através da utilização do modelo numérico do terreno (MNT) da região da bacia. O MNT utilizado tem, sempre, uma resolução espacial maior do que a resolução espacial das células do modelo. Desta forma há uma grande quantidade de informações do relevo no interior de cada célula, e esta informação é utilizada para regionalizar alguns parâmetros do modelo.

O balanço de água no solo é realizado utilizando uma metodologia baseada na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação

probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada (Todini, 1996). Esta relação têm sido usada em diversos modelos hidrológicos, especialmente em modelos de grandes bacias.

A evapotranspiração é estimada, para cada bloco em cada célula, através do método de Penman – Monteith (Shuttleworth, 1993).

A propagação da vazão nos rios é realizada utilizando o método de Muskingun-Cunge linear (Tucci, 1998). A propagação de vazão no interior de cada célula é realizada utilizando a metodologia do reservatório linear simples, em três processos paralelos: escoamento superficial, escoamento sub-superficial e escoamento subterrâneo.

Embora alguns processos sejam representados de forma conceitual o modelo hidrológico conta com uma forte base física, o que fortalece a relação entre os parâmetros e as características físicas da bacia. Maiores detalhes sobre o modelo de grandes bacias encontram-se em Collischonn (2001).

O PROJETO TRMM E A ESTIMATIVA 3B42

O satélite TRMM é um projeto em parceria entre a NASA e a Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA), e foi lançado em 27 de novembro de 1997 com o objetivo específico de monitorar e estudar a precipitação nos trópicos, além de verificar como a mesma influencia o clima global.

O satélite possui órbita polar baixa (inicialmente 350km, desde 2001 cerca de 403km), de forma que o período de translação é bastante curto (91 minutos). Estas duas características permitem uma alta resolução temporal e espacial do imageamento.

Os instrumentos a bordo do TRMM são: imageador de microondas (TMI), radar de precipitação (PR), radiômetro no visível e no infravermelho (VIRS), sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens (CERES), e sensor para imageamento de relâmpagos (LIS). O sensor de microondas (TMI) é o principal instrumento na medição de precipitação, obtida através da lei inversa de Planck e correlação com temperatura de topo de nuvem, como comentado anteriormente. O instrumento imageia com um ângulo NADIR de 49°, o que resulta em um ângulo de incidência na superfície terrestre de 52,8°. Para refinar as estimativas, afetadas pelas diferentes formações de nuvens, se faz uso do radar de precipitação (PR), que é o primeiro radar meteorológico em órbita no mundo, permitindo produzir mapas tridimensionais de estruturas precipitantes. Este radar é capaz de detectar taxas de precipitação muito baixas, da ordem de menos de $0.7\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (Kawanishi *et al.*, 2000). A Figura 1 mostra uma representação esquemática do processo de aquisição de dados do TRMM.

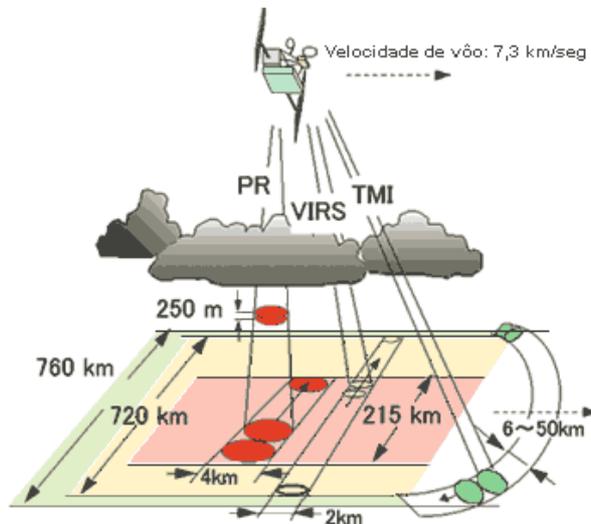


Figura 1 - representação esquemática da aquisição de dados pelo sensor de microondas (TMI, varredura verde), radiômetro (VIRS, varredura amarela) e radar meteorológico (PR, varredura vermelha) do satélite TRMM

As variáveis primárias medidas pelos instrumentos TMI, PR e VIRS são, respectivamente, temperatura de brilho, potência e radiância. A partir de combinações sucessivas entre estas medidas e seu cruzamento com produtos de outros satélites, são obtidas as estimativas referentes à precipitação, cuja resolução temporal e espacial depende do refinamento da estimativa. A Figura 2 mostra a seqüência de procedimentos para geração das diferentes estimativas.

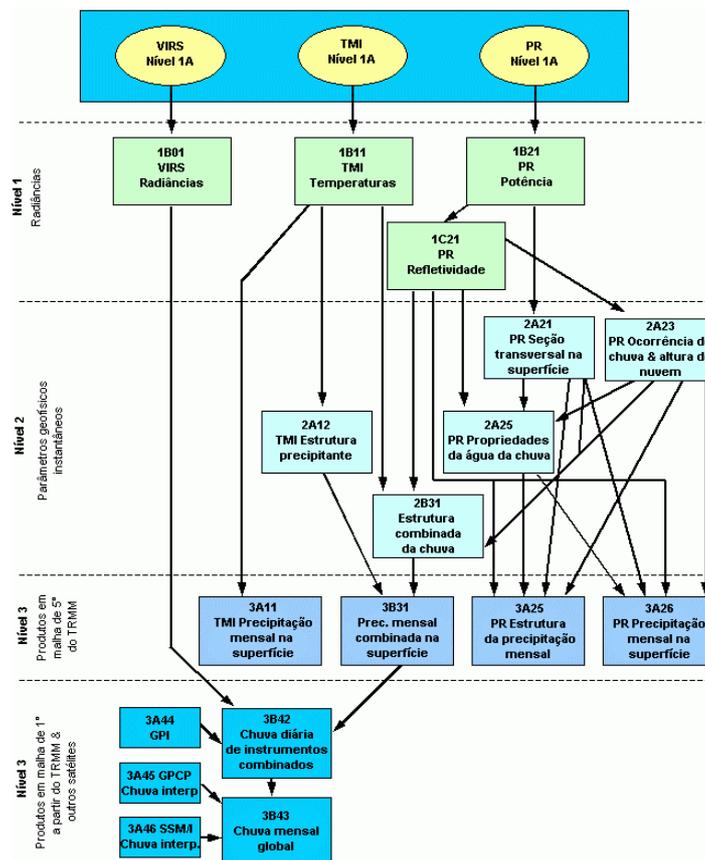


Figura 2 - Fluxograma de dados para geração de estimativas do projeto TRMM

Para refinar as medições, existe um programa paralelo de validação em campo (Ground Validation ou GV), contando com radares meteorológicos em diversas estações ao longo da faixa intertropical. A tabela 1 mostra os locais onde há postos de GV do TRMM e a frequência de passagem de cada um dos instrumentos sobre estes postos.

Tabela 1 - Postos do programa de validação em campo (GV) do projeto TRMM e frequência com que são visitados por cada um dos principais instrumentos do TRMM

Frequência de passagem do TRMM (Número de visitas em um período de 30 dias)							
Sítio de validação	Latitude (°)	PR	TMI	Sítio de validação	Latitude (°)	PR	TMI
Atol Kwajalein	8.72	9	31	Brownsville, TX	25.97	13	47
Darwin, Australia	-12.45	10	32	Corpus Christi, TX	27.85	15	51
Guam	13.50	9	32	Tampa, FL	28.03	13	52
Om Koi, Tailândia	17.80	9	33	Melbourne, FL	28.10	15	53
Kauai, HI	22.17	13	38	San Antonio, TX	29.53	16	59
São Paulo, Brasil	-23.58	12	42	Jacksonville, FL	30.33	19	65
Taiwan	23.92	11	42	Texas A&M, TX	30.58	18	68
Key West, FL	24.67	13	42	Jerusalém, Israel	31.87	20	102
Miami, FL	25.75	13	45	PR: Radar de precipitação; TMI: Sensor de microondas			

O projeto TRMM gera diversos produtos (estimativas) de acordo com a combinação de instrumentos usada no algoritmo de cálculo. O produto 3B42, que será usado neste trabalho, combina estimativas de microondas do TMI com estimativas baseadas em imagens no infravermelho do sensor SSM/I do departamento de defesa americano (DMSP). Além disso, usa informações de radar, para obter melhor precisão na estrutura das nuvens, e é calibrado por medições do programa de validação de campo (GV). Deve-se ressaltar que esta calibração com dados de campo é feita de forma bastante global e generalizada, podendo gerar estimativas locais pouco precisas. Para mais detalhes do algoritmo de estimativa, ver Kummerow *et al.* (2000) ou <http://trmm.gsfc.nasa.gov/3b42.html>.

A Figura 3 mostra o campo de estimativas do produto 3B42 do TRMM sobre a bacia do Rio São Francisco, válido para um período de 3 horas do dia 10/1/2003. A escala de cores representa a intensidade média da chuva em cada pixel, de forma que cores mais quentes correspondem a precipitações mais intensas.

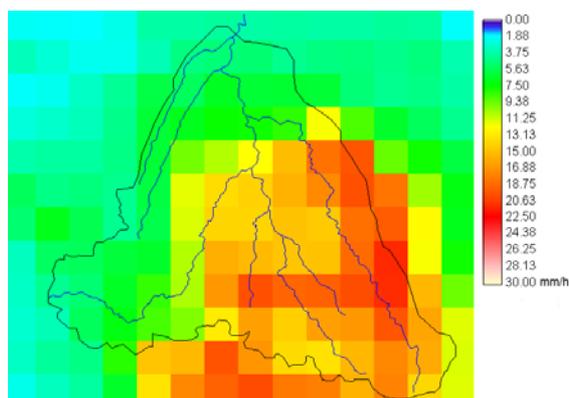


Figura 3 - Taxa de precipitação estimada pelo TRMM sobre a bacia do São Francisco até Três Marias no período de 19:30 a 22:30 do dia 10/1/2003

A grande vantagem deste produto em especial é sua alta resolução temporal, de 3 horas, e espacial, de 0.25° , na faixa entre 50°S e 50°N . Por outro lado, a desvantagem é a complexidade e o número de dados necessários para gerar o produto, os quais não necessariamente vão estar disponíveis a longo prazo.

Quanto a este aspecto, cabe ressaltar que inicialmente o satélite estava previsto para fornecer dados até março de 2004 (Kummerow *et al.*, 2000). Porém, com a manobra de elevação de altitude, realizada em agosto de 2001, o satélite teve sua vida útil estendida, devido à economia no consumo de energia (embora com uma leve redução na resolução espacial dos instrumentos). Em julho de 2004, a NASA anunciou a prorrogação do projeto até o fim deste ano, e, recentemente, prorrogou novamente a saída de atividade do satélite, de forma a cobrir a primavera de 2005 no hemisfério norte. Assim, não pode ser anunciado ainda um fim definitivo no fornecimento de dados deste satélite, cujos resultados foram muito satisfatórios, como atestam vários autores, como Flaming (2004), Hiroshima (1999) e Kummerow *et al.* (2000).

Devido a este relativo sucesso, a NASA prepara um programa para suceder o TRMM, chamado de GPM (Global Precipitation Measurement), prevendo para 2007 o lançamento de múltiplos satélites, equipados com sensores e radares similares ao anterior, porém com maior resolução (Flaming, 2004). Isto permite que haja certo otimismo entre hidrólogos, pois incrementa significativamente o volume de dados de chuva disponíveis, problema que tem sido o gargalo da modelagem hidrológica em países como o Brasil.

INTERPOLAÇÃO DOS DADOS DE PLUVIÔMETROS

A rede pluviométrica da bacia do São Francisco é uma das mais densas entre todas as bacias brasileiras. Dentro dos quase 50.000 km^2 de área contribuinte ao São Francisco até Três Marias, existem pouco mais de 60 postos pluviométricos com dados, configurando uma cobertura de um posto a cada 800 km^2 , em média. Muitas bacias brasileiras, como a bacia do Alto Paraguai, contam com uma densidade inferior a um pluviômetro a cada 3.000 km^2 .

Ao todo foram usados 98 postos pluviométricos para interpolação da chuva sobre as células do modelo, situados dentro da bacia ou na sua proximidade. Já para a interpolação dos dados de satélite, foram extraídas as séries de chuva sobre os *pixels* de 0.25° do TRMM situados entre -47° e -43.5° de longitude e -21° e -18° de latitude, os quais abrangem a totalidade da área da bacia, num total de 168 pixels. Estas séries foram integradas para o intervalo de tempo de um dia e a seguir

interpoladas. O período analisado vai de 1/1/1998 a 31/05/ 2003, que é o volume total de dados disponibilizado pela NASA para o produto 3B42.

A BACIA DO SÃO FRANCISCO E A ELABORAÇÃO DO MODELO

A bacia do Rio São Francisco é uma das principais bacias brasileiras, drenando boa parte da região nordeste do Brasil. Esta bacia foi simulada até sua foz por Silva *et al.* (2004). Aqui a simulação será realizada até a seção da Usina Hidrelétrica de Três Marias, onde a bacia conta com 49.300 km² de área de drenagem. Esta segmentação da análise foi feita devido (a) ao caráter preliminar da análise, e (b) à alta disponibilidade de dados pluviométricos nesta porção da bacia, permitindo uma comparação das estimativas de satélite com os dados da rede de postos de chuva, aqui considerados como o dado mais correto.

A configuração da rede de drenagem discretizada e demais informações topográficas foram obtidas a partir do modelo numérico de terreno com resolução de 90m do SRTM da NASA (<http://seamless.usgs.gov/>). A informação de tipo de solo foi obtida do projeto RADAMBRASIL. Já o uso do solo foi classificado a partir de imagens do banco de dados da Universidade de Maryland (<http://glcf.umiacs.umd.edu/>). Os dados de vazão em Três Marias para calibração foram obtidos através de balanço hídrico (Silva, 2004).

A Figura 1 mostra o contorno da bacia reduzida com a rede de drenagem discretizada.

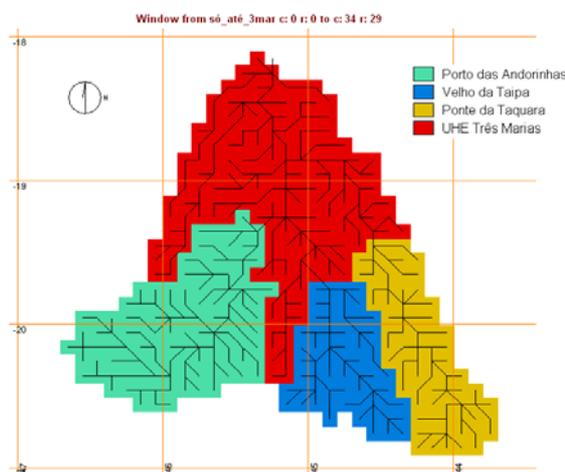


Figura 4 – Discretização da bacia do São Francisco até Três Marias, com resolução de 0.1°

Para avaliação do modelo alimentado com as estimativas de precipitação do TRMM, se fez uso primeiramente de análise visual dos hidrogramas calculado e observado, e quantitativamente, através do coeficiente de Nash-Suttcliffe:

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{calc}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

onde $Q_{obs}(t)$ é a vazão observada no intervalo de tempo t , $Q_{calc}(t)$ é a vazão calculada neste intervalo e $\overline{Q_{obs}}$ é a média das vazões observadas.

COMPARAÇÃO ENTRE A CHUVA DE PLUVIÔMETROS E CHUVA DO TRMM SOBRE A BACIA DO SÃO FRANCISCO ATÉ TRÊS MARIAS

Uma vez interpolados os dados, estavam disponíveis para cada célula de $0.1 \times 0.1^\circ$ do modelo hidrológico uma série interpolada de pluviômetros e uma série interpolada do TRMM. Antes de efetuar a simulação com cada um dos conjuntos de dados, se procurou fazer algumas análises entre os campos de chuva interpolados. Num primeiro momento, se calculou em cada uma das células do modelo o coeficiente de correlação entre a série dos pluviômetros e a série do TRMM. O resultado é um campo de correlações, o qual é apresentado na Figura 5.

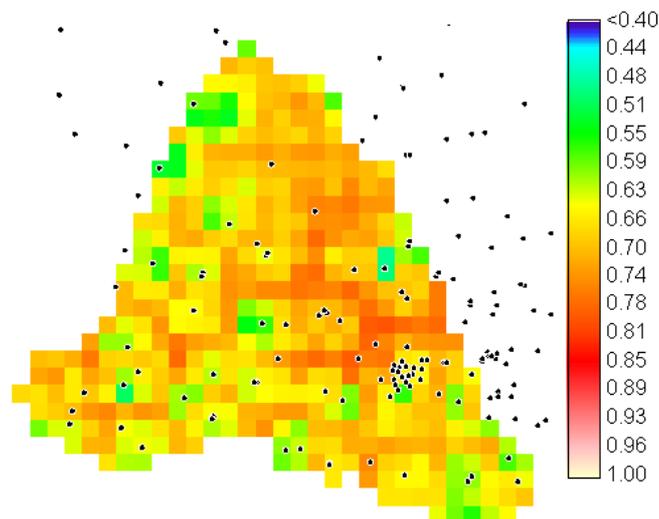


Figura 5 - Campo de correlações entre a chuva interpolada do satélite e chuva interpolada dos pluviômetros e localização dos pluviômetros utilizados no estudo.

O coeficiente de correlação entre as séries interpoladas variou de 0.50 a 0.79 entre as 425 células do modelo. Este resultado pode ser considerado satisfatório, pois indica que há uma conexão física entre as duas medidas, embora erros de magnitude possam ocorrer pontualmente. É interessante notar que a magnitude da correlação não está necessariamente ligada à maior proximidade com pluviômetros, pois as maiores correlações se deram na porção nordeste da bacia, onde há uma densidade menor de postos, e, conseqüentemente, a incerteza na chuva é maior.

Num segundo momento, se avaliou as diferenças entre a chuva média diária sobre a bacia inteira. A Figura 6 mostra os hietogramas médios para um período de um ano.

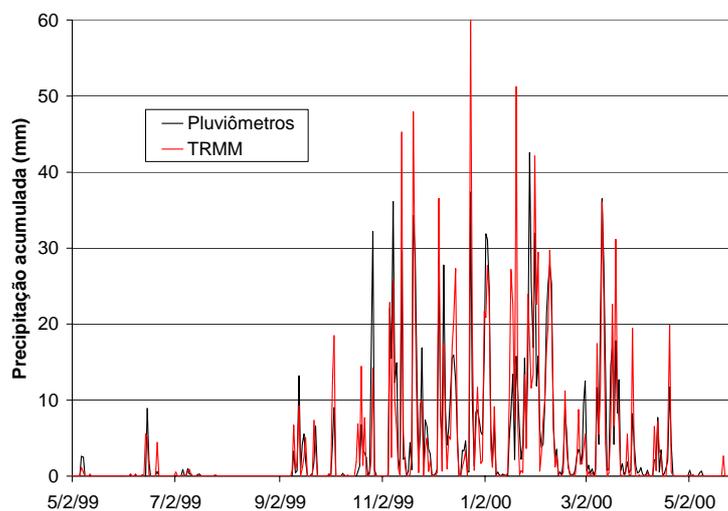


Figura 6 – Comparação entre a precipitação média do TRMM e dos pluviômetros sobre a bacia do São Francisco no período de 2/5/1999 a 30/5/2000

Pode-se notar que a estimativa do TRMM está muito próxima dos valores obtidos a partir de pluviômetros, aqui considerados os valores mais precisos. Além disso, o satélite consegue captar de forma satisfatória a não-ocorrência de chuva, mesmo no período úmido de verão. Nos demais anos onde há dados, o comportamento é bastante similar.

A Figura 7 mostra a dispersão entre chuva média interpolada dos pluviômetros e chuva média interpolada do TRMM, para todo o período de cinco anos e meio.

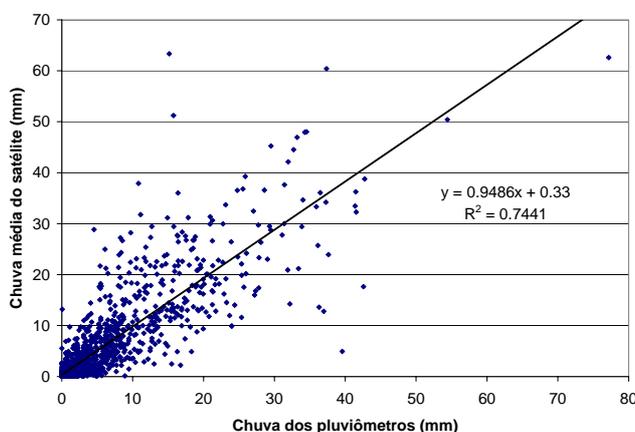


Figura 7 – Dispersão entre chuva média sobre a bacia interpolada a partir de pluviômetros e a partir da estimativa do TRMM, com ajuste linear sobre os pontos

Percebe-se uma leve tendência do satélite a subestimar precipitações baixas, inferiores a 10 mm. Isto se reflete também no coeficiente angular da reta de ajuste, levemente inferior à unidade. Mesmo assim, a correlação é alta e a comparação mostra coerência entre os diferentes dados.

Por fim, a análise preliminar dos dados de chuva procurou verificar diferenças entre as precipitações acumuladas sobre a bacia. A Figura 8 mostra os acumulados de chuva interpolada dos

pluviômetros e do satélite. Percebe-se que nos primeiros anos, o TRMM tende a subestimar levemente a precipitação. Porém, a partir de 2001 há uma reversão desta tendência, e o satélite passa a estimar mais chuva do que os pluviômetros, inclusive com uma forte superestimativa nos primeiros meses de 2003. A explicação para este fato pode estar ligada à manobra de elevação da altitude do satélite, realizada em 24/08/2001 para prolongamento da vida útil do programa. Embora os algoritmos de estimativa tenham sido corrigidos para os dados pós-manobra, eventualmente ainda existam fatores intervenientes que não tenham sido contemplados. Esta superestimativa veio a prejudicar também o ajuste do modelo hidrológico, como será visto posteriormente. Mesmo assim, a correspondência entre os gráficos é bastante grande, o que acarreta em maior confiança nos dados utilizados.

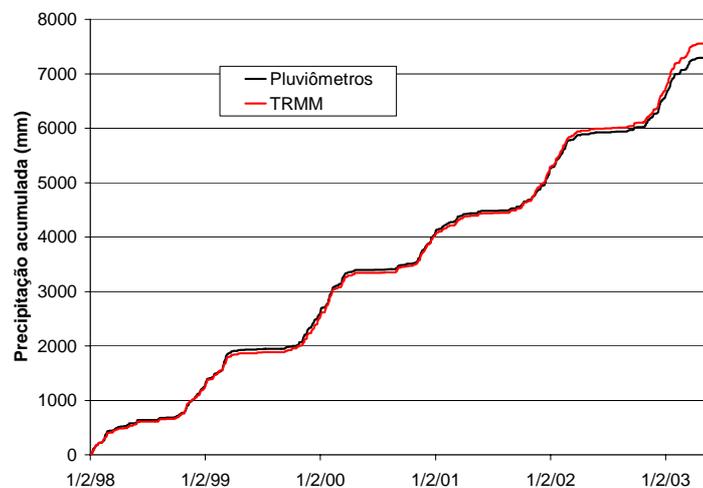


Figura 8 – Precipitação acumulada sobre a bacia, interpolada dos pluviômetros (preto) e dos *pixels* do TRMM (vermelho), período de 2/1/1998 a 30/5/2003

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA COM ESTIMATIVAS DO TRMM

Por fim, como principal resultado desta análise preliminar, se utilizou o campo de chuva interpolada a partir dos dados do TRMM como dado de entrada do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH, descrito anteriormente. Os valores dos parâmetros foram obtidos por Silva *et al.* (2004), os quais foram ajustados a partir de dados de pluviômetros, usando como período de calibração os anos de 1978 a 1986.

A Figura 9 mostra o ajuste em Três Marias usando primeiramente dados de pluviômetros. Esta simulação difere levemente daquela realizada por Silva *et al.* (2004), o qual realizou simulação contínua desde 1978. A simulação de fevereiro de 1998 a maio de 2003 (descartando o primeiro mês para ajuste das condições iniciais) obteve um coeficiente de Nash-Suttcliffe de 0.83.

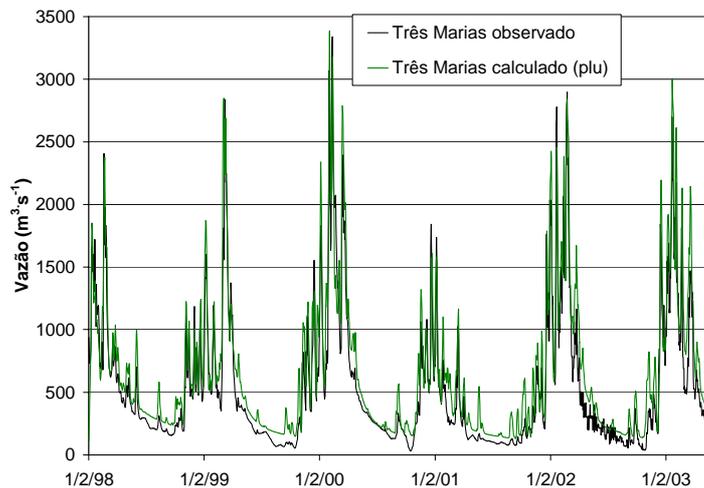


Figura 9 - Verificação do modelo MGB-IPH em Três Marias, usando dados de precipitação dos pluviômetros, no período de 2/1/1998 a 30/5/2003

A Figura 10 mostra a simulação realizada na bacia do rio São Francisco até a UHE Três Marias, no período de 2/1/1998 a 30/05/2003, usando dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM.

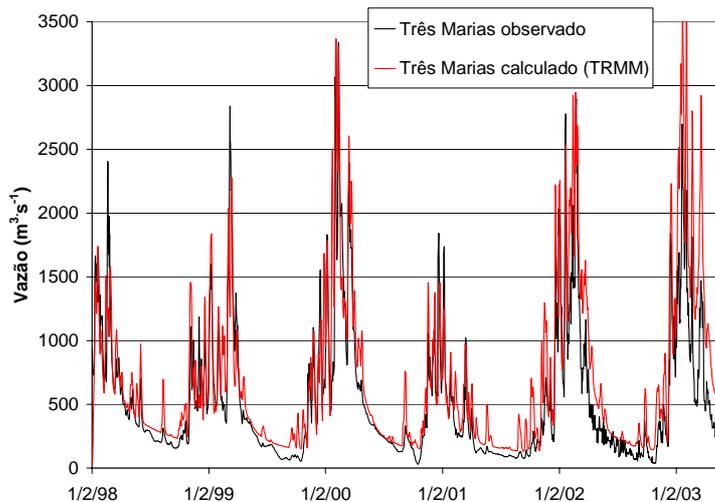


Figura 10 – Verificação do modelo MGB-IPH em Três Marias, usando dados de precipitação do TRMM, no período de 2/1/1998 a 30/5/2003

Algumas recessões estiveram mal simuladas, tanto no modelo com chuva de pluviômetros quanto do TRMM, de forma que não se trata de uma limitação no dado, e sim no modelo. Além disso, há uma boa dose de incerteza no que diz respeito às vazões de estiagem, uma vez que estas são obtidas da recomposição das vazões naturais, ou seja, da soma da vazão medida com as vazões de retirada para irrigação. Em especial os anos de 1999 e 2000 apresentam recessões muito abruptas, atípicas para esta região, de forma que a qualidade do dado de referência de vazão pode ser posta em dúvida nestes períodos.

Para se ter uma idéia mais detalhada da diferença das diferentes fontes de dados na simulação hidrológica, é apresentada a figura 11, onde se mostra o detalhe do ano hidrológico de 2000/2001.

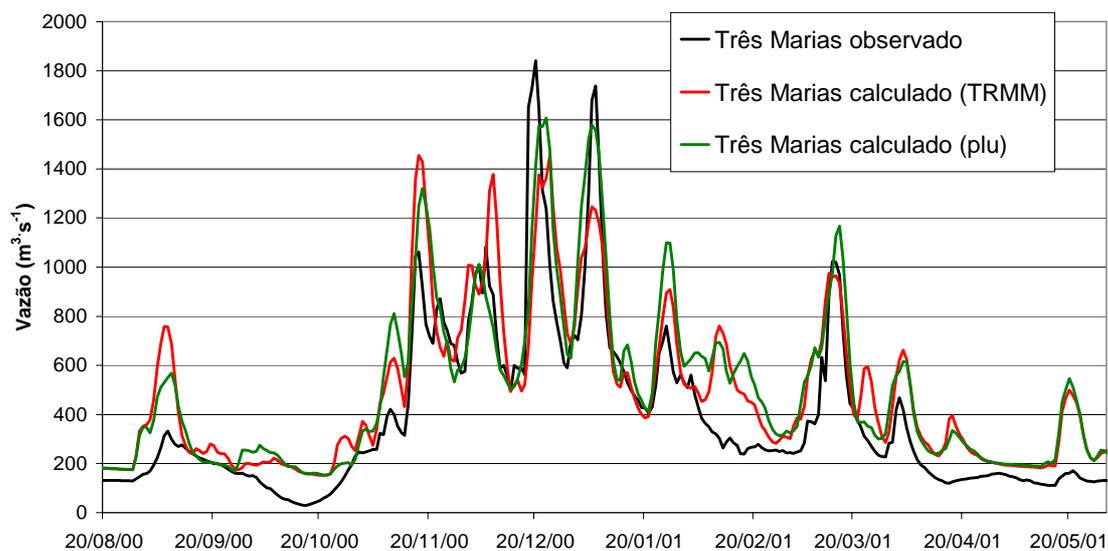


Figura 111 – Verificação do modelo MGB-IPH em Três Marias, usando diferentes dados de precipitação, no período de 20/08/2000 a 31/5/2001

O comportamento do hidrograma calculado usando precipitação de satélite é bastante similar ao calculado com chuva de pluviômetros. Deficiências significativas na correta representação das vazões devem ser antes atribuídas a erros nas vazões medidas ou a limitações do próprio modelo. De forma geral, a simulação com chuva de pluviômetros condiz melhor com a realidade, mas em alguns eventos o modelo teve um desempenho ligeiramente superior quando alimentado com chuva de satélite.

Numa análise geral dos quase cinco anos e meio de simulação com chuva de satélite, percebe-se que o modelo pôde representar bastante bem as vazões na bacia. A variabilidade interanual das vazões foi bem representada, com uma distinção marcada entre anos úmidos e secos. O coeficiente de Nash-Suttcliffe de fevereiro/1998 a maio/2003 foi de 0.60, valor que é ainda razoável, porém inferior ao coeficiente obtido com chuva dos pluviômetros. No entanto, deve ser ressaltado que os valores dos parâmetros estão ajustados para este último tipo de dados, embutindo distorções de forma a corrigir eventuais erros nos mesmos. Caso o modelo fosse recalibrado para dados do TRMM, este coeficiente certamente teria um maior valor.

O ano de 2003 de forma geral teve maus resultados simulados com chuva de satélite, em razão de uma significativa superestimativa da precipitação por parte do TRMM, como visto anteriormente. Apenas para se ter uma idéia da influência dos maus resultados do ano de 2003 nos valores de Nash-Suttcliffe, se recalculou este coeficiente desconsiderando os meses de janeiro a maio deste ano. Para o modelo alimentado com chuva de pluviômetros, o coeficiente aumentou para

0.84, enquanto que o modelo alimentado com chuva do TRMM teve seu coeficiente de Nash-Sutcliffe aumentado para 0.73, representando uma melhora considerável.

CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, ainda bastante preliminares, pode se concluir que as estimativas de precipitação a partir de satélite, em especial do TRMM, podem se tornar um dado bastante útil e confiável, configurando um ganho na representação da distribuição espacial das chuvas em regiões tropicais e, conseqüentemente, na modelagem hidrológica de bacias em regiões com pouca disponibilidade de dados.

Há algumas ressalvas que devem ser feitas neste aspecto. Em primeiro lugar, a estimativa 3B42 é feita através de um algoritmo relativamente complexo, cruzando dados do TRMM com estimativas de outros satélites, como GPCP. Desta forma, há uma demora até que o dado seja disponibilizado para o público. Para se ter uma idéia, apenas recentemente foram disponibilizadas as estimativas para os 5 primeiros meses do ano de 2003, representando um atraso de dois anos. Isto tornaria inviável a aplicação de um modelo operacional para previsão, por exemplo.

Além disso, apesar de ter seu período de atividade prolongado por duas vezes, o projeto TRMM está em vias de ser encerrado, terminando assim com a disponibilização de dados, como visto anteriormente.

Por outro lado, o sucesso do programa e a necessidade de mais estudos levaram a Agência Aeroespacial Norte-americana (NASA) a programar um novo projeto, denominado GPI, com lançamento previsto para 2007. Se a vida útil e a qualidade das estimativas deste conjunto de satélites forem aumentadas em relação ao TRMM, como é a idéia do projeto, e se a política de disponibilização de dados se mantiver, pode-se esperar um ganho significativo em termos de conhecimento hidrológico na região intertropical.

Quanto às simulações realizadas neste trabalho, deve-se ressaltar que, apesar dos resultados relativamente bons, ainda há muito espaço para melhora. Em primeiro lugar, uma correção a ser feita é realizar a simulação contínua com dados de pluviômetros começando alguns anos antes de 1998, quando começa a disponibilidade de dados do TRMM. Assim, evita-se a perturbação inicial do hidrograma simulado, devida ao ajuste das condições iniciais do modelo. Sugere-se gerar uma série de chuvas híbrida, iniciando em 1991 com dados de pluviômetros, e a partir de 1998, com dados do TRMM, para sanar este problema.

Num segundo momento, o modelo deve ser recalibrado usando dados do satélite TRMM, de forma a corrigir eventuais distorções nos parâmetros devidas a falhas nos dados dos pluviômetros.

Com isto, a expectativa é que haja um aumento da qualidade das simulações, medida em termos de coeficientes de Nash-Suttcliffe, por exemplo.

Uma análise ainda mais aprofundada, que vem sendo tema de dissertação de mestrado por parte, é a intercalibração do modelo, usando tanto dados de satélite como de pluviômetros. Esta intercalibração pode ser encarada tanto como uma correção da distribuição espacial da precipitação medida pelos pluviômetros a partir dos dados do satélite, como uma correção dos valores das estimativas de satélite baseada em dados de pluviômetros, sempre baseado na crença de que o pluviômetro fornece maior precisão na medição puntual, enquanto a estimativa de satélite é menos precisa puntualmente, mas permite melhor representação da variabilidade espacial. A idéia é realizar uma interpolação dos resíduos, ou seja, das diferenças puntuais entre chuva de satélite e chuva de pluviômetros, e subtrair o campo de resíduos do campo de precipitação do satélite. Este resultado é aguardado com maior expectativa do que os demais, porque procura combinar o que há de melhor em cada uma das fontes de dados.

Neste trabalho, as estimativas de satélite foram aplicadas em uma bacia com boa disponibilidade de dados, de forma a possibilitar a realização de comparações entre os campos de chuva e seus valores médios sobre a bacia. Porém, o grande interesse no uso de chuva estimada por satélite é a modelagem em bacias com baixa disponibilidade de dados, onde a incerteza é muito maior. Assim, está em fase de andamento a elaboração a aplicação do modelo na bacia do Rio Tapajós, afluente do Amazonas, o qual apresenta grande escassez de dados. Nesta bacia, é esperado um salto de qualidade do modelo alimentado com chuva de satélite (ou com a combinação) em relação ao modelo alimentado simplesmente com dados de pluviômetros.

Por fim, uma última análise que pode ser interessante é a aplicação destas estimativas em bacias não-tropicais, onde não haja predominância de chuvas convectivas. Os dados do TRMM estão disponíveis na faixa de 50°S a 50°N, porém com grande incerteza a partir de 30° de latitude devido à intensificação de processos frontais nestas regiões. Sugere-se a aplicação na bacia do rio Uruguai, entre os estados de RS e SC. A expectativa é que nestas regiões o modelo alimentado com dados de satélite necessite maior correção baseada na rede pluviométrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado que possibilita a realização deste trabalho.

ACKNOWLEDGEMENT*

The data used in this study were acquired as part of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). The algorithms were developed by the TRMM Science Team. The data were processed by the TRMM Science Data and Information System (TSDIS) and the TRMM Office; they are archived and distributed by the Goddard Distributed Active Archive Center. TRMM is an international project jointly sponsored by the Japan National Space Development Agency (NASDA) and the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA) Office of Earth Sciences.

BIBLIOGRAFIA

- ANA/GEF/PNUMA/OEA (2004). *Modelo de simulação hidrológica na bacia do Alto Paraguai*. Relatório. Projeto GEF Pantanal/Alto Paraguai, IPH-UFRGS.
- BARRERA, D. F. (2005). “*Precipitation estimation with the hydro-estimator technique: its validation against raingage observations*”. In.: VII Congresso da IAHS, Foz do Iguaçu, 3-9 de abril de 2005.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; MEMENTI, M., FEDDES, R. A. & HOLTSLAG, A.A.M. (1998a). “*A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) – 1. Formulation*”. *Journal of Hydrology* 212-213 pp. 198-212.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J. & VAN DER WAL, T. (1998b). “*A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) – 2. Validation*”. *Journal of Hydrology* 212-213 pp. 213-229.
- BWANALI, K. Y. (2001). “*Remote sensing CCD rainfall estimation in Zimbabwe*”. In.: II WaterNet Symposium: Integrated Water Resources Management: Theory, Practice, Cases; Cidade do Cabo, 30-31 de outubro de 2001.
- CANGIALOSI, J. (2004) *The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*. Publicação interna da Universidade de Miami.
- COLLISCHONN, W. (2001). *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. Tese de doutorado, IPH-UFRGS, 194 páginas, anexos.
- CONTI, G. N. (2002). *Estimativa da precipitação através de técnicas de sensoriamento remoto: Estudo de caso para o estado do Rio Grande do Sul*. Dissertação de mestrado, IPH-UFRGS, 166 páginas, anexos.
- DE ANGELIS, C. F. [2004?]. *Análise dos sistemas precipitantes no Brasil a partir de dados processados em um integrador de informações adquiridas por pluviômetros, satélites, rede de relâmpagos e radares meteorológicos-PRECIBRA*. Projeto de Pesquisa. CPTEC-INPE.
- FLAMING, G. M. (2004). *Measurement of global precipitation*. Publicação da Administração Aeroespacial dos EUA (NASA).
- GIACOMONI, M. H. & MENDES, C. A. B. (2005). “*Estimativa do balanço de energia e evapotranspiração por meio de sensoriamento remoto: aplicação do método S-SEBI para o estado do Rio Grande do Sul*”. In.: Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul, 20-23 de março de 2005, Santa Maria-RS.

* Este reconhecimento é solicitado pela NASA's Earth Science Enterprise (ESE) quando do uso de dados do TRMM

HIROSHIMA, K. (1999). “*Rainfall observation from Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite*”. Journal of Visualization, vol. 2, n° 1, pp. 93-98.

<http://daac.gsfc.nasa.gov/data/> Banco de dados da NASA.

<http://glcfapp.umiacs.umd.edu/> Banco de imagens de satélite da Universidade de Maryland.

<http://hidroweb.ana.gov.br/> Banco de dados da Agência Nacional de Águas.

<http://seamless.usgs.gov/> Banco de dados do Serviço Geológico dos EUA.

<http://trmm.gsfc.nasa.gov/> Descrição dos produtos TRMM.

KAWANISHI, T.; KUROIWA, H.; KOJIMA, M.; OIKAWA, K.; KOZU, T.; KUMAGAI, H.; OKAMOTO, K.; OKUMURA, M.; NAKATSUKA, M.; NISHIKAWA, K. (2000). “*TRMM Precipitation Radar*”. Advances in Space Research, Vol. 25 No. 5 pp. 969-972.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; AHCROFT, P.; KOZU, T. HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.; HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; FERRIER, B.; OLSON, W. S.; ZIPSER, E.; SMITH, E. A.; WILHEIT, T. T.; NORTH, G. KRISHNAMURTI, T.; NAKAMURA, K. (2000). “*The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit*”. Journal of Applied Meteorology, vol. 39, pp. 1965-1982.

LAKSHIMI, V. (2004). “*Use of satellite remote sensing in hydrological predictions in ungauged basins*”. In.: XX Congresso da ISPRS, 12-23 de julho de 2004, Istambul, Turquia.

MCGUIRE, M. & LETTENMAIER, D. P. (2004). “*Use of satellite data for streamflow and reservoir storage forecasts in the Snake River Basin, ID*”. Journal of Water Resources Planning and Management (em revisão).

RAMAGE, K.; JOBARD, I.; LEBEL, T. & DESBOIS, M. (2003). “*Satellite estimation of 1-day to 10-day cumulated precipitation: comparison and validation over tropical Africa of TRMM, METEOSAT and GPCP products*”. In.: The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 29 de setembro a 3 de outubro, Weimar, Alemanha.

SHUTTLEWORTH, W. J. (1993). “*Evaporation*”. In.: *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, Londres, pp. 4.1. – 4.53.

SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M (2004). “*Simulação da bacia do rio São Francisco através do modelo hidrológico MGB-IPH*”. In.: VII Congresso de Recursos Hídricos do Nordeste, 30 de novembro a 3 de dezembro, São Luís-MA.

STRUZIK, P. (2003). “*Accumulated precipitation distribution based on combined satellite information and ground measurements*”. In.: The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 29 de setembro a 3 de outubro, Weimar, Alemanha.

TESTFATSION, Y. & DINKU, T. (2003). “*Rainfall estimation from satellite data in Ethiopia: calibration and application*”. In.: The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 29 de setembro a 3 de outubro, Weimar, Alemanha.

TODINI, E. (1996). “*The ARNO rainfall – runoff model*”. Journal of Hydrology, Vol. 175 pp. 293-338.

TUCCI, C.E.M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Editora da Universidade, IPH-UFRGS.