

## XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### PREVISÃO QUALITATIVA PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS COM RADAR METEOROLÓGICO

*Kleber Lopes da Rocha Filho<sup>1</sup> & Flavio Conde<sup>2</sup>; Cristiane Pires Andrioli<sup>3</sup>; Luan Saraiva de Brito<sup>4</sup>*

**Resumo** – A Região Metropolitana de São Paulo abriga cerca de 20 milhões de pessoas. A elevada taxa de urbanização resulta em altos percentuais de impermeabilização do solo. Eventos intensos de precipitação ocorrem com frequência e danos são observados em diferentes escalas. Soluções estruturais são adotadas em diversas ocasiões, porém, não solucionam o problema além do consumo de recursos elevados. Sistemas de alerta ou de suporte a decisão podem minimizar danos materiais e humanos a sociedade. A precipitação é principal forçante dos problemas e deve ser estimada ou medida com baixa incerteza. Redes telemétricas apresentam problemas de representatividade espacial e exposição, radares meteorológicos, apesar da maior resolução espaço-temporal das estimativas de precipitação, possuem fontes de erros. Extrapolações de imagens de radar podem resultar em boas estimativas de previsões a curtíssimo prazo. Um modelo proposto para previsão qualitativa de bacias hidrográficas foi avaliado. Resultados apontam para dependências com o tipo de sistema precipitante. Para 2 das 3 bacias avaliadas, o modelo emitiu o alerta em pelo menos 50% dos eventos críticos e o melhor CSI encontrado foi de 73%.

**Abstract** - The Metropolitan Region of São Paulo is home for about 20 million people. The high urbanization rates results in high percentages of impervious surfaces. Intense precipitation events occur frequently and damage are observed on different scales. Structural solutions are adopted on several occasions, however, does not solve problem beyond the expensive costs. Warning systems and decision support can minimize material and human damage. Precipitation is the main sources of these problems and should have estimate or measure with low uncertainty. However, surface networks lack spatial representivity and exposure is a also a issue, weather radars, in spite of their much higher spatial and temporal resolution rainfall estimation, are affect errors. Extrapolation of radar images can result in satisfactory estimates of the short-term forecasts. A proposed model for qualitative prediction of watersheds was evaluated. Results indicate dependencies on the type of meteorological system. For two of the three basins investigated, the model issued the alert in at least 50% of critical events and the best CSI was found to be 73%.

**Palavras-Chave** –Previsão, Inundações, Radar Meteorológico.

---

<sup>1</sup> Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, Av. Pedroso de Moraes 1619 – cj 507/508 – CEP:05419-001 – SP/SP – Tel: 11-30393173 – Fax: 11-30393157 – kleber@saisp.br

<sup>2</sup> Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, Av. Pedroso de Moraes 1619 – cj 507/508 – CEP:05419-001 – SP/SP – Tel: 11-30393176 – Fax: 11-30393157 – conde@fcth.br

<sup>3</sup> Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, Av. Pedroso de Moraes 1619 – cj 507/508 – CEP:05419-001 – SP/SP – Tel: 11-30393155 – Fax: 11-30393157 – cristiane@saisp.br

<sup>4</sup> Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, Av. Pedroso de Moraes 1619 – cj 507/508 – CEP:05419-001 – SP/SP – Tel: 11-30393151 – Fax: 11-30393157 – luan@saisp.br

## INTRODUÇÃO

Os municípios da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) são afetados freqüentemente com eventos de inundações e solapamento de encostas. Pereira Filho *et al.* (2002) cita que eventos meteorológicos explosivos freqüentemente causam perdas materiais e humanas. Economicamente, as inundações produzem inúmeros problemas, como congestionamentos, fechamento de comércios, aeroportos e estradas, paralisação de diversos setores produtivos, entre outros. Silva e Porto (2003) citam que o aumento acelerado da mancha urbana é o responsável pelos elevados índices de impermeabilização observados, e como consequência, as cheias urbanas são agravadas. FUSP (2002) destaca que o problema é decorrente da ineficiência ou ausência do planejamento do uso e regulação do uso do solo. Tucci *et al.* (1995) completa que este processo de urbanização ocorreu de forma acentuada e resultou em centros sem infra-estruturas, principalmente na década de 80, quando investimentos em planejamento foram reduzidos.

Não há solução para o problema das inundações, porém a convivência é possível a partir da adoção de medidas de controle de inundação que podem ser do tipo estrutural e não estrutural. De maneira geral, medidas estruturais são intervenções de engenharia que procuram reduzir o risco de ocorrência de enchentes. Medidas não-estruturais têm por objetivo reduzir prejuízos através de alertas com a maior antecedência possível. Dentro destas medidas não estruturais destaca-se a implementação de sistemas de alerta.

Sistema de alerta tem como foco principal, monitorar e prever a causa do problema, a precipitação. O tempo de ação para inundações urbanas geralmente é baixo, há então a necessidade de medições em tempo real. Redes de pluviômetros representam a intensidade ou acumulado pontual de precipitação com elevada eficiência, porém podem subestimar a precipitação em até 20% devido à exposição a ventos (Legate; Deliberty, 1993). Rocha Filho (2010) mostrou que simulações hidrológicas em uma bacia urbana de porte médio para um evento de convecção isolada, a vazão simulada foi subestimada devido à falta de representatividade espacial da precipitação pela rede de superfície. Técnicas de estimativas de precipitação por sensoriamento remoto são alternativas a estes problemas, os exemplos são satélites e radares meteorológicos. Radares meteorológicos permitem uma estimativa com resolução espaço-temporal elevada, porém com várias fontes de erro (Calvetti *et al.*, 2003).

Com base em informações de radar, é possível efetuar previsões a curtíssimo prazo, entre 0 e 3 horas à frente (Smith; Austin, 2000). As técnicas de *nowcasting* mais utilizadas nas últimas décadas são baseadas em métodos de extrapolação de imagens de radar. Bowler *et al.* (2004) descreve que dentro desta categoria, três esquemas se destacam em número de pesquisas e aplicações práticas: Técnicas

baseadas em correlações espaciais entre imagens sucessivas (Hilst; Russo, 1960; Bellon; Austin, 1974); Rastreamento (*tracking*) de centro de massa de sistemas (Barclay; Wilk, 1970; Johnson *et al.*, 1998); e as baseadas em esquemas advectivos (Takehira; Nakayama, 1976; Pereira Filho *et al.*, 1999 *apud* Silva Farias, 2009), esta última depende de campos de ventos de fontes externas. Austin e Bellon (1974) propuseram o modelo SHARP, de reconhecimento de padrões através de correlações espaciais entre varreduras consecutivas de um radar convencional.

Na RMSP, o monitoramento em tempo real de variáveis hidrometeorológicas teve início em 1977, com a implementação do Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP) (Braga, 1989; Pisani, 1995). Atualmente este sistema realiza o monitoramento de superfície (precipitação e nível) e atmosférico com o radar meteorológico. Com base nas informações obtidas com o monitoramento de superfície e atmosférico, o SAISP produz previsões de curtíssimo prazo de intensidade de chuva e pontos de alagamentos.

## **OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é a descrição e avaliação do desempenho de um modelo de alerta qualitativo de até 3 horas à frente para bacias hidrográficas. O modelo utiliza estimativas de precipitação do radar meteorológico de São Paulo, o modelo de previsão a curtíssimo prazo SHARP (Austin; Bellon, 1974) e limites de bacias delimitados com base no modelo de elevação digital SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). O desempenho dos alertas será quantificado pelos escores estatísticos CSI, POD e FAR. Avaliam-se os resultados quanto aos alertas emitidos com antecipação a eventos, onde, ocorreu elevação significativa do nível dos principais cursos d'água da bacia. As previsões avaliadas são referentes a 3 sub-bacias da bacia do Alto Tietê, as bacias do Ribeirão dos Meninos, Ribeirão dos Couros e Rio Aricanduva.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Área de Estudo**

A Região Metropolitana de São Paulo (figura 1a) é formada por 39 municípios e abriga aproximadamente 20 milhões de pessoas (IBGE, 2010). Dentro dos domínios da RMSP a Bacia do Alto Tietê drena uma área de aproximadamente 6000 km<sup>2</sup> e é composta por diversas sub-bacias com históricos de problemas de inundações e solapamentos causados por ocorrência de precipitação intensa

(Pereira Filho *et al.*, 2002). Dentre estas bacias, estão as bacias do Ribeirão dos Meninos, Ribeirão dos Couros e Rio Aricanduva (figura 1b).

O Ribeirão dos Couros é afluente da margem esquerda do Ribeirão dos Meninos. Sua bacia possui uma área de drenagem de 45 km<sup>2</sup>. Nesta existem atualmente 6 reservatórios de retenção e 8 pontos monitorados por telemetria nos cursos d'água. A bacia do Ribeirão dos Meninos drena uma área de 59 km<sup>2</sup> e atualmente existem 7 reservatórios de retenção e 5 pontos monitorados por telemetria nos cursos d'água. Juntas, as duas bacias drenam uma área de 104 km<sup>2</sup> e formam a Bacia do Ribeirão dos Meninos, que é afluente esquerdo do Rio Tamanduateí, o principal contribuinte da margem esquerda do Rio Tietê na RMSP.

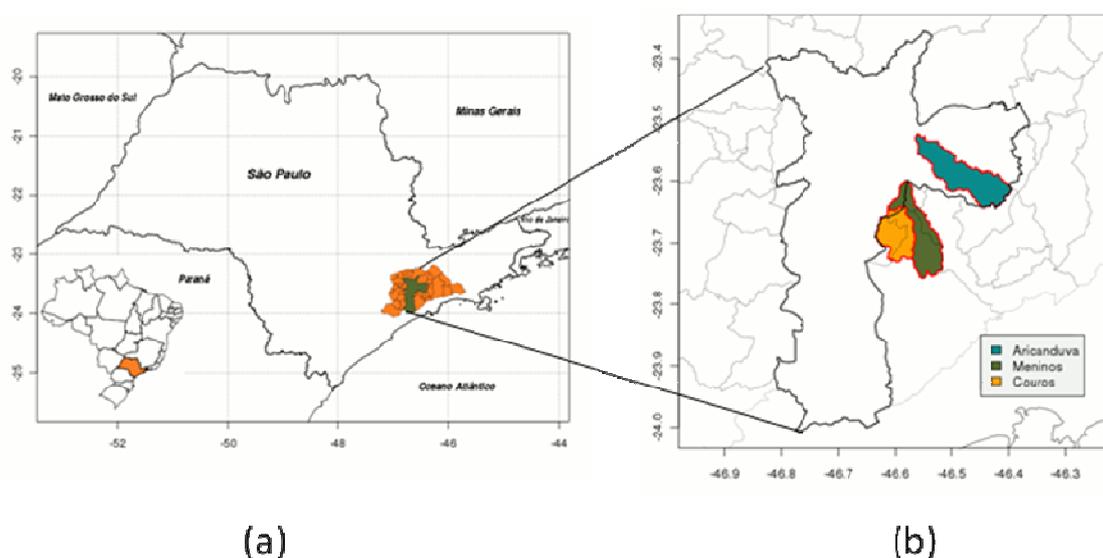


Figura 1: (a) Localização da RMSP. A área sombreada em laranja mostra o Estado de São Paulo e os municípios da RMSP. A área sombreada em verde mostra o município de São Paulo; (b) Localização das bacias hidrográficas utilizadas no trabalho. A linha cheia em negrito indica o município de São Paulo, as linhas cheias em cinza indicam os municípios da RMSP. As áreas sombreadas representam as bacias hidrográficas.

### Sistema de Alerta a Inundações do Estado de São Paulo

O SAISP (Sistema de Alerta a Inundações do Estado de São Paulo) foi criado no ano de 1977 após as fortes chuvas ocorridas no ano anterior que colocaram em risco a segurança do reservatório do Guarapiranga, localizado na cabeceira do rio Pinheiros, evidenciando a necessidade de um monitoramento hidrológico em tempo real.

O SAISP conta com dois tipos de monitoramento. Monitoramento de Superfície: É realizado com a utilização de estações telemétricas que monitoram precipitações, níveis, variáveis atmosféricas e qualidade da água em tempo real. Este monitoramento iniciou-se com apenas 5 estações telemétricas e

atualmente conta com 198 estações telemétricas. Monitoramento Atmosférico: É efetuado com radar meteorológico e teve início no ano de 1988, com a aquisição de um radar meteorológico banda S.

### **Radar Meteorológico de São Paulo (RSP)**

O Radar Meteorológico de São Paulo (figura 2) está localizado no município de Biritiba-Mirim (São Paulo), na Barragem de Ponte Nova, cabeceira do Rio Tietê. O radar foi fabricado pela Universidade de McGill do Canadá e é propriedade do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Um resumo das características técnicas do radar se encontra na tabela 1. O radar banda S possui uma resolução espacial horizontal padrão de 2 x 2 km, com raio de alcance quantitativo de 240 km. Pode-se chegar a resolução máxima de 1x1 km, com alcance de 120 km. A área máxima de abrangência é de 129.600 km<sup>2</sup> (figura 3). A resolução espacial vertical possui 18 níveis de amostragem, distribuída entre as alturas de 1.5 e 18 km.

O radar possui uma resolução temporal de cinco minutos em modo chuva, e os dados (*volume scans*) são transmitidos para a central de processamento no SAISP por meio de uma linha privada de comunicação, onde são processados para geração dos produtos. Para as estimativas de precipitação na bacia foram utilizados os campos de refletividades no formato “*Constant Altitude Plain Position*” (CAPPI) de 3 km de altura, com resolução espacial de 2x2 km e inicialmente transformados em taxa de precipitação ( $mm h^{-1}$ ), com a relação Z-R (equação 1) de Marshall e Palmer (1948).

$$Z = 200R^{1,6} \tag{1}$$

Onde, Z é a refletividade medida pelo radar (dBz) e R é a taxa de precipitação ( $mm h^{-1}$ ).

Tabela 1: Características técnicas do Radar Meteorológico de São Paulo

<b>Características técnicas do Radar Meteorológico de SP</b>	
Frequência de Operação	2,7 a 2,9 GHz - comprimento de onda (8-10 cm)
Potência de Pico	650 kW
Duração do pulso	2 mseg
Frequência do pulso (PRF)	250 PPS (pulsos por segundo)
Ganho da antena	38,00 DB
Largura do feixe	1.5°
Mínimo sinal detectável	17 dBz
Polarização	Horizontal



Figura 2: Radar Meteorológico de SP – Município de Biritiba Mirim – SP.

Os principais produtos do radar meteorológico são: CAPPI são mapas que mostram a taxa de precipitação em mm/h, a uma altitude constante, com raio de 240 km, em uma resolução de 2x2km, a cada 5 minutos, conforme pode ser observado na figura 4-a; ECHO-TOP é o máxima altura com refletividade mínima desejada, no caso da figura 4-b, 17 dBz . CHUVA ACUMULADA são mapas, com as mesmas características do CAPPI, conforme pode ser observado na figura 4-c, em que o produto mostrado é acumulação de chuva, em mm, de 1 hora, 12 horas e 24 horas; este último gerado às 10:00 UTC.

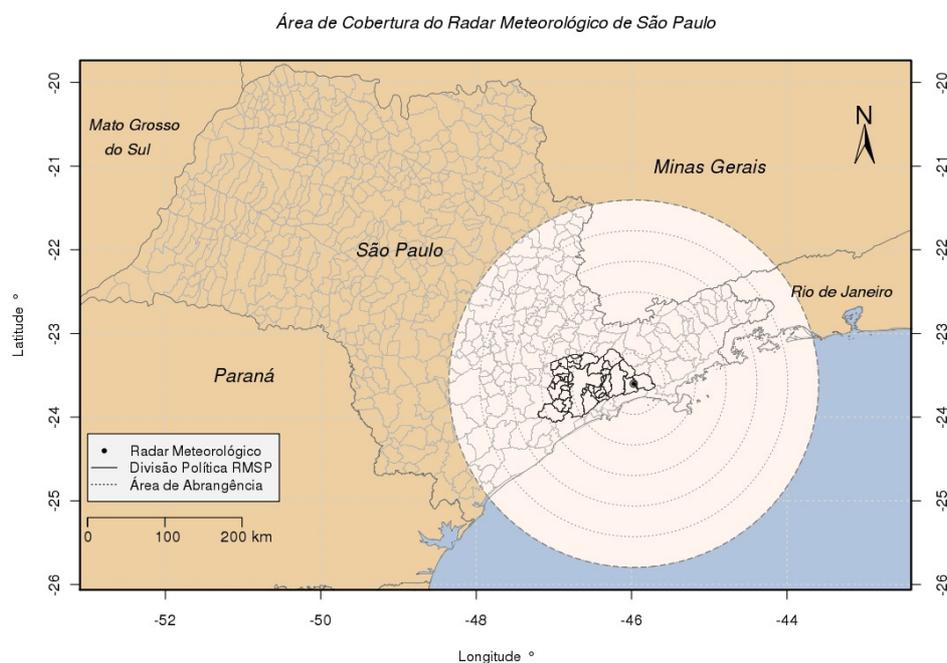


Figura 3: Área de Abrangência do Radar Meteorológico de São Paulo. A área sombreada em branco representa a cobertura do RSP, As linhas pontilhadas são os raios concêntricos a cada 40 km. As linhas cinza representam as divisões políticas municipais do Estado de SP e as linhas pretas, as divisões políticas dos estados e da RMSP. Fonte: Rocha Filho (2010).

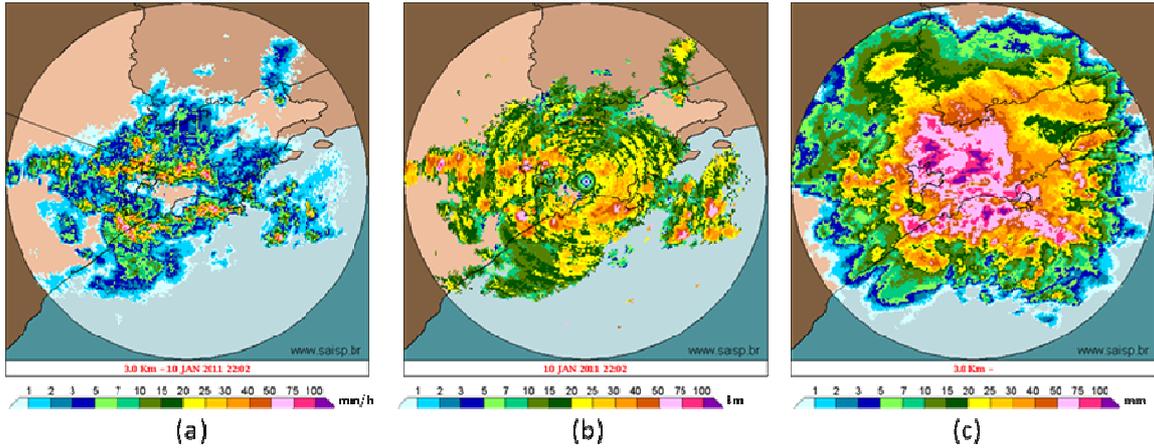


Figura 4: Exemplos de produtos do Radar de São Paulo (RSP). (a) CAPPI, (b) ECHO-TOP, (c) Chuva Acumulada.

### Modelo SHARP

O modelo SHARP (*Short Automated Radar Procedure*) é descrito em detalhes em Austin e Bellon (1974) e pode ser classificado como um modelo de extrapolação de imagens de radar no tempo. O modelo utiliza a correlação espacial cruzada entre padrões de imagens de radar em passos de tempo distintos (típicamente 30 minutos) para assim determinar o vetor deslocamento das células de precipitação. Os sistemas observados pelo radar são considerados homogêneos no tempo, desta forma a estrutura espacial é mantida constante durante a extrapolação. A correlação espacial e temporal cruzada pode ser escrita como:

$$\gamma(x_0, y_0, \Delta t) = \frac{1}{N \sigma_i \sigma_{i+1}} \iint [B(x, y, t_i) - \overline{B(t_i)}] \times [B(x + x_0, y + y_0, t_{i+1}) - \overline{B(t_{i+1})}] dx dy \quad (2)$$

Onde:

$\gamma(x_0, y_0, \Delta t)$  é a correlação cruzada entre os dois padrões separados por um intervalo de tempo  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ , e espaçados de  $(x_0, y_0)$ ;

$B(x, y, t_i)$  é o padrão de distribuição espacial no passo de tempo  $t_i$ , neste caso o padrão analisado é a taxa de precipitação em  $\text{mmh}^{-1}$ ;

$N = \iint dx dy$  é a área de integração onde encontram-se os padrões analisado;  $\overline{B(t_i)}$  é a o valor médio de  $B(x, y, t_i)$  dentro do domínio  $N$  no passo de tempo  $t_i$ , ou seja;

$$\overline{B(t_i)} = \iint B(x, y, t_i) dx dy / N \quad (3)$$

O desvio padrão de  $\overline{B(t_i)}$  na área N no passo de tempo  $t_i$  é:

$$\sigma_i = \left\{ \iint [B(x, y, t_i) - \overline{B(t_i)}]^2 dx dy / N \right\}^{1/2} \quad (4)$$

A máxima correlação,

$$\gamma_{\max}(a_0, b_0, \Delta t) = \frac{1}{N \sigma_i \sigma_{i+1}} \iint [B(x, y, t_i) - \overline{B(t_i)}] \times [B(x + a_0, y + b_0, t_{i+1}) - \overline{B(t_{i+1})}] dx dy \quad (5)$$

Os valores  $a_0$  e  $b_0$  são os incrementos de distância que produzem a melhor correlação espacial entre os dois padrões de precipitação. Assim, a velocidade de deslocamento médio dos sistemas pode ser determinada como:

$$V = (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (6)$$

Onde  $u = a_0 / \Delta t$  e  $v = b_0 / \Delta t$ . A partir da velocidade de deslocamento V determinada, pode-se advectar os campos de precipitação com qualquer valor de passos de tempo. Um exemplo pode ser observado na figura 5.

A acurácia de modelos advectivos possui dependência com a organização espacial dos sistemas precipitantes. Silva Farias (2009) mostrou que para um esquema advectivo de imagens de radar o desempenho médio das previsões é maior para sistemas estratiformes do que para convectivos. Ainda o melhor desempenho ocorre em até 90 minutos à frente e menor para integração maior que 120 minutos.

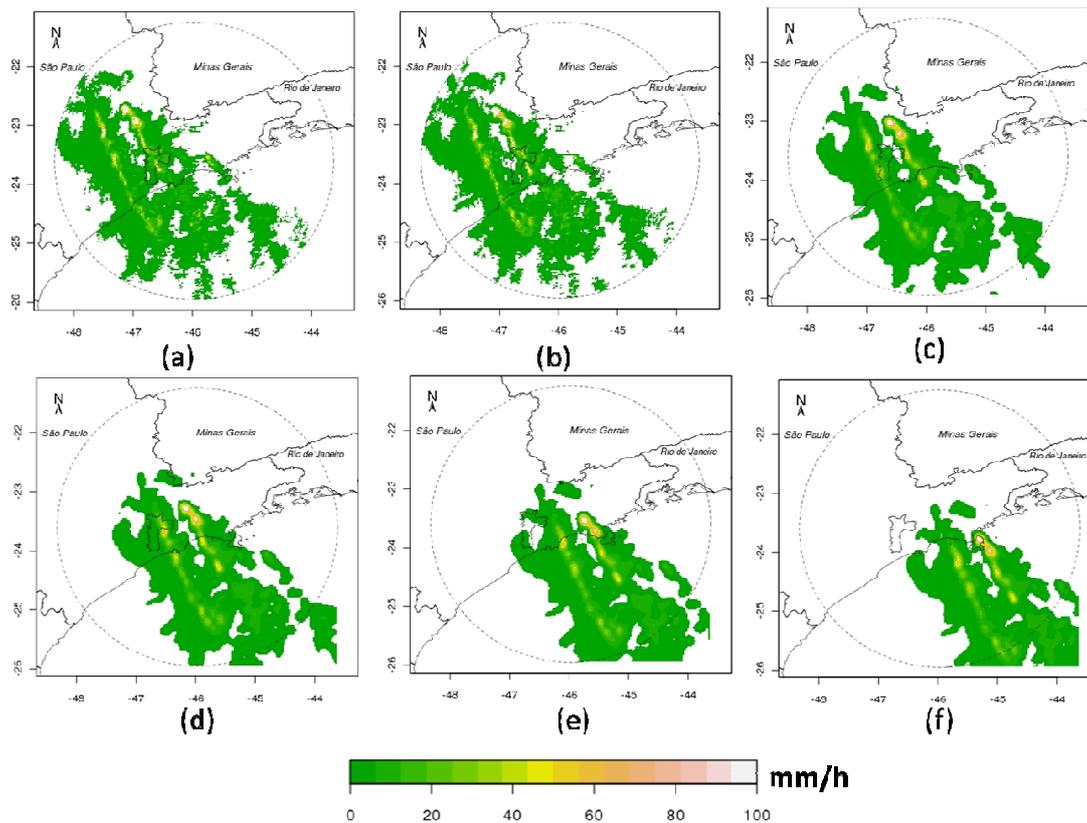


Figura 5: Exemplo de previsão efetuada pelo modelo SHARP. As imagens (a) e (b) são imagens precipitação observada (CAPPI 3 km) dia 07 de Junho de 2011, às 20:54UTC e 20:59UTC respectivamente. As imagens (c), (d), (e) e (f) são as previsões para 30, 60, 90 e 120 minutos a frente do horário de (b), respectivamente. A região sombreada indica a taxa de precipitação em  $\text{mmh}^{-1}$ . A linha pontilhada indica a área de monitoramento quantitativa do radar de São Paulo. A linha em preto dentro do continente indica o município de São Paulo.

### Modelo de Previsão Qualitativa para Bacias Hidrográficas (MPQBH)

O modelo proposto é um *expertise system* baseado em imagens do radar meteorológico de São Paulo, previsões do modelo SHARP e limites físicos das bacias. Alertas são emitidos para as bacias todas as vezes que a precipitação observada ou prevista na bacia supera os *thresholds* pré-determinados para cada bacia. São utilizados 3 tipos de *thresholds*: Porcentagem da área da bacia com ocorrência de precipitação, intensidade da precipitação, número de passos de tempo com ocorrência de precipitação.

Para cada bacia, são determinados os pontos de grade do CAPPI do radar de São Paulo internos aos domínios da mesma. O número total de pontos internos é considerado a área que cobre 100% da bacia. Então o primeiro *threshold*, relacionado com a porcentagem da bacia é estabelecido. Inicialmente adotou-se 30% para todas as bacias descritas neste trabalho. A figura 6-a mostra um exemplo dos pontos de grade do radar sobre o município de São Paulo e parte da RMSP, com destaque para as bacias utilizadas neste trabalho. A figura 6-b mostra em detalhe, os pontos de grade do RSP que

estão dentro dos domínios da bacia do rio Aricanduva. Observa-se 21 pontos de grade internos a bacia. Adotando-se o critério citado anteriormente de 30% da área da bacia citada, o *threshold* de área neste caso é de 6 pontos de grade ou píxeis.

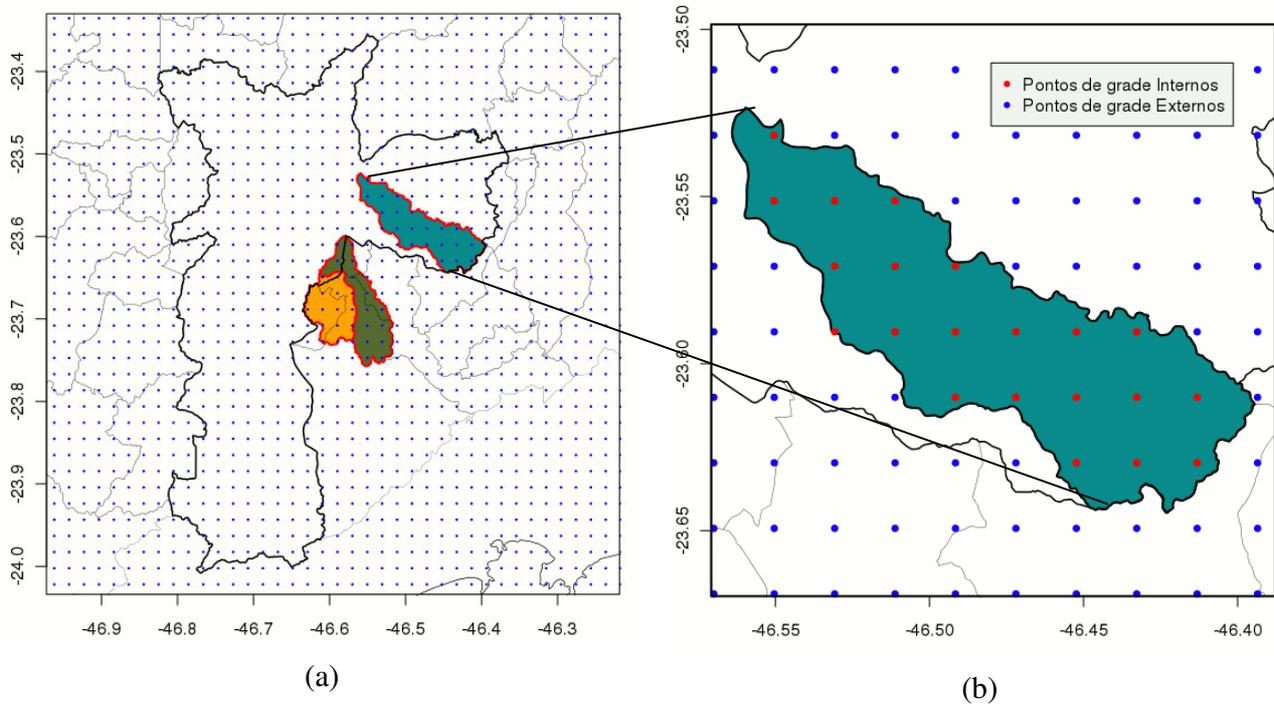


Figura 6: (a) Pontos de grade do RSP sobre o município de São Paulo (MSP) e parte da RMSP. Os pontos em azul indicam o centro da grade. A linha preta em negrito indica os limites do MSP e as áreas sombreadas indicam as bacias utilizadas no estudo. (b) Idem a (a), exceto pelo detalhe na bacia do rio Aricanduva. Em (b) os pontos em vermelho indicam os pontos de grade internos a bacia e que são utilizados para emissão dos alertas.

Se a precipitação observada ou prevista ocorrer sobre uma área maior do que o *threshold* estabelecido, o próximo passo é disparado, a comparação da intensidade. O *threshold* de intensidade depende da bacia, assim como o de área. Para as bacias deste trabalho, adotou-se inicialmente 30 mm/h, que é o primeiro nível com classificação de intensa adotado pelo SAISP. Se esta condição for satisfeita, compara-se se a precipitação observada está ocorrendo a mais de  $T$  minutos, onde  $T$  é configurado de acordo com as dimensões e principalmente tempo de resposta da bacia.

O *threshold* de tempo de ocorrência é utilizado somente para as precipitações observadas e não para as previstas. A partir destes passos, os alertas podem ser emitidos em escala de cor. Quanto menor o tempo de ação, maior é o destaque da cor de alerta. O esquema do modelo e a criticidade dos alertas é mostrado na figura 7. A saída é gravada em formato XML e posteriormente formatada em KML para exibição no software *Google Earth* ou similares. O modelo é iniciado a cada 10 minutos e dispara a cada rodada o modelo SHARP com passos de 15 minutos.

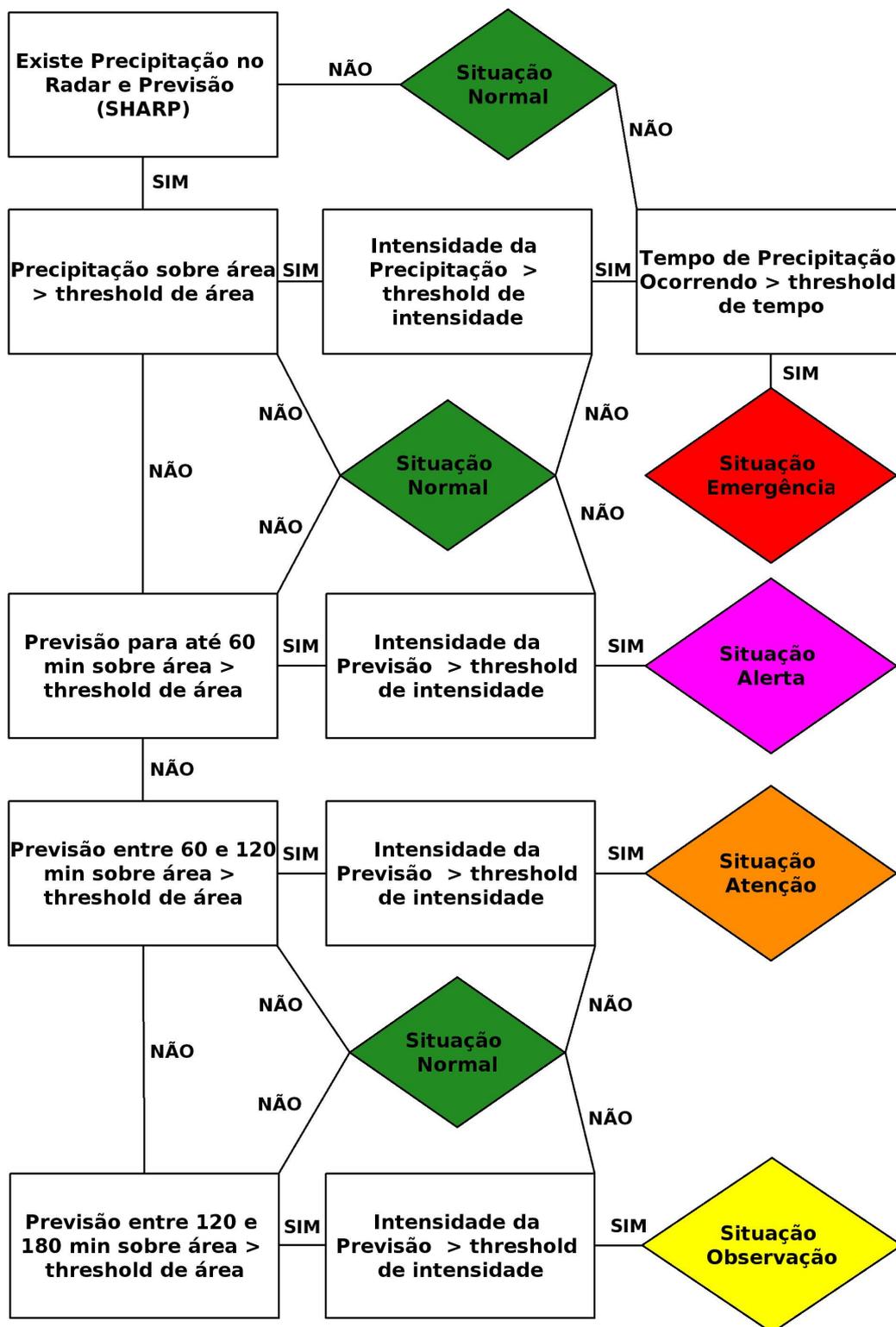


Figura 7: Fluxograma Modelo de Previsão Qualitativa para Bacias Hidrográficas.

A avaliação do desempenho do modelo será efetuada com os escores estatísticos: índice de acerto crítico (CSI), probabilidade de detecção (POD) e razão de falso alarme (FAR). A formulação dos índices pode ser observada na figura 8.

Considera-se acerto quando pelo menos 3 rodadas do modelo apontam alerta com antecedência de no mínimo 20 minutos do horário da ocorrência do alerta no posto telemétrico, ou no caso de evento de chuva sobre a bacia quando o modelo não dispara o alerta e o posto telemétrico não registra aumento significativo no nível. Erro é atribuído quando o modelo não detecta o alerta e o nível do posto telemétrico atinge o nível considerado crítico. Falso alarme ocorre quando o modelo dispara o alerta e o nível do curso d água não atinge o nível crítico.

	Nível > Alerta	Nível < Alerta
Previsão de Evento Crítico	ACERTO	FALSO ALARME
Sem Previsão de Evento Crítico	ERRO	ACERTO

Figura 8: Critérios para determinação dos índices CSI, POD e FAR.

$$POD = \frac{acertos}{acertos + erros} \quad (7)$$

$$CSI = \frac{acertos}{acertos + erros + falso\_alarme} \quad (8)$$

$$FAR = \frac{falso\_alarme}{acertos + falso\_alarme} \quad (9)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Bacia do Ribeirão dos Couros

Foram analisados os meses de janeiro, fevereiro e março de 2011, em um total de 90 dias, com ocorrência de 54 eventos de precipitação sobre a bacia. Destes, 17 causaram elevação do nível do curso d água principal em pelo menos 2.7 metros, atingindo o nível considerado alerta pelo SAISP. A figura 9 mostra a comparação do modelo na detecção destes eventos. Observa-se que dos 17 eventos o

modelo detectou 8 e deixou de detectar 9. Em 32 eventos não houve alerta para eventos, que por sua vez não causaram elevação do nível e ainda registrou-se falso alerta em 5 eventos. Para estes números, os escores estatísticos apresentam valores de CSI de 73%, POD de 0.82% e FAR de 13%. Os valores de índice de acerto crítico é significativamente alto se comparado com desempenho de modelos atmosféricos (Pereira Filho *et al.*, 2006), sistemas de previsão a curtíssimo prazo (Pereira Filho *et al.*, 1999) ou mesmo simulações quantitativas de vazão (Rocha Filho, 2010). Porém pode-se atribuir este alto valor aos eventos de baixa intensidade de precipitação, onde o modelo não gerou alerta e o nível do curso d'água também não se elevou. Os eventos de maior importância, isto é, os de alta intensidade, o modelo foi capaz de detectar aproximadamente 48%, com erro em 52%, valores compatíveis com os encontrados na literatura.

Os erros podem ser atribuídos a eventos de natureza convectiva. O modelo SHARP é um modelo advectivo, que não detecta a formação de novas células de tempestade. Ainda, eventos de escalas menores podem ser subestimados pelo radar. No período analisado, 82% dos eventos são de origem convectiva e 18% estratiforme. Os casos de falso alerta também podem ser atribuídos aos sistemas convectivos, pois a advecção destas células pode ocorrer para regiões equivocadas. Ainda problemas na estimativa de precipitação podem causar superestimativas na intensidade da precipitação.

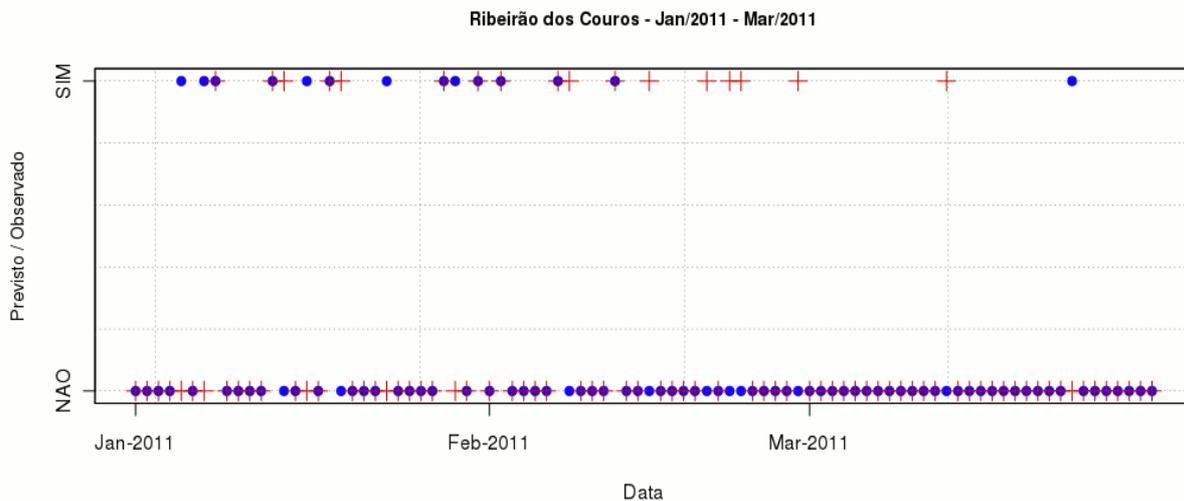


Figura 9: Previsões e observações para a bacia do Ribeirão dos Couros. Os pontos em azul indicam as previsões. As cruces em vermelho indicam os eventos observados. Os valores “SIM” indicam eventos que o modelo gerou alerta para os pontos em azul e dias com ocorrência de elevação significativa do nível para as cruces vermelhas.

## Bacia do Ribeirão dos Meninos

Em 90 dias analisados, 52 eventos de precipitação sobre a bacia foram identificados (figura 10). Em 13 ocasiões o nível do curso d'água principal se elevou em 2.44m até o nível de alerta (SAISP). Em 8 destes eventos foram detectados com antecedência e alertas foram gerados, nos 5 eventos restantes o modelo não previu que o sistema precipitante causaria problemas na bacia. Houve ainda o registro de 10 falsos alertas. Em 30 ocasiões com ocorrência de precipitação sobre a bacia sem elevação significativa do nível, o modelo não gerou alerta. Para esta bacia então, CSI de 72%, POD de 88% e FAR de 21%. O aumento do valor de probabilidade de detecção em relação a bacia dos Couros vem acompanhado de um aumento significativo de falsos alarmes. Mais uma vez nota-se o valor elevado de CSI, e atribui-se novamente o grande número de eventos de precipitação de baixa intensidade com acerto do modelo.

Para os eventos mais críticos (13), a porcentagem dos alertas detectados corretamente é de 62% contra 38% de falhas. Estes valores ainda podem ser considerados altos em comparação com valores da literatura. Da mesma forma da bacia anteriormente analisada, tanto erros quanto falsos alertas podem ser atribuídos a natureza dos eventos precipitantes (81% convectivo e 19% estratiforme) que são equivocadamente extrapolados no tempo. Problemas nas estimativas de precipitação também podem influenciar os resultados.

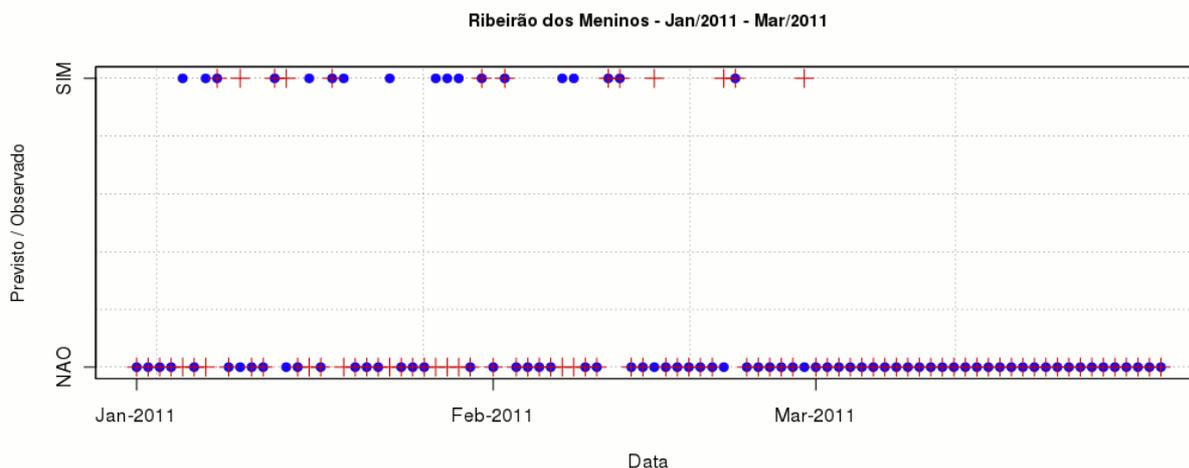


Figura 10: Idem a figura 9 exceto para a bacia do Ribeirão dos Meninos.

## Bacia do Rio Aricanduva

Para os 90 dias analisados, 51 eventos de precipitação sobre a bacia foram identificados. Destes apenas 4 causaram elevação significativa no curso d'água principal (figura 11). Em 4 eventos críticos o modelo detectou 3, porém existe uma grande quantidade de falsos alertas. Eventos não críticos com acerto do modelo (não gerou alerta) totalizam 25 casos. O número de falso alerta é de 24. Os índices assumem valores, CSI de 52%, POD de 97% e FAR de 46%. Neste caso há um claro indício de que os *thresholds* utilizados para esta bacia necessitam de revisão, principalmente de intensidade e área de cobertura da precipitação.

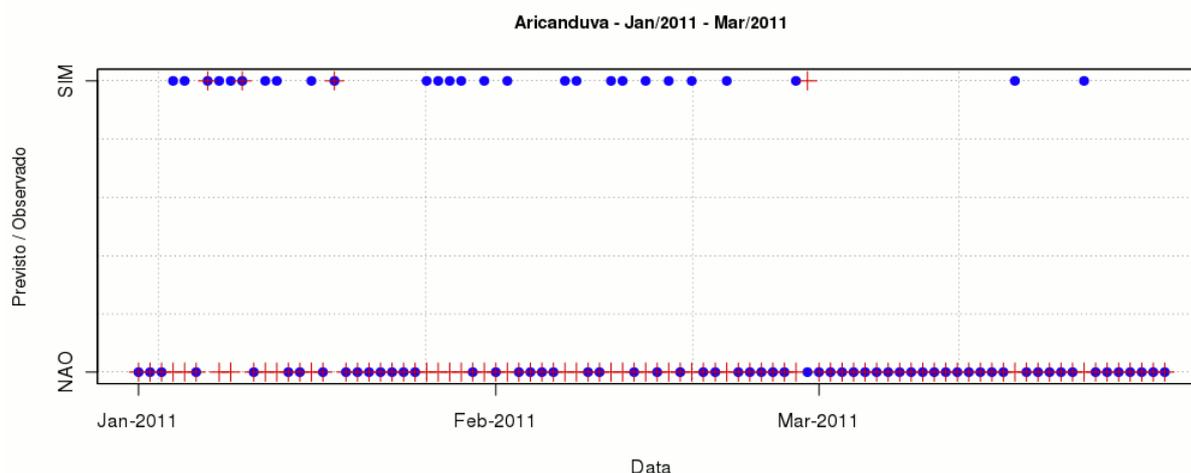


Figura 11: Idem a figura 9 exceto para a bacia do rio Aricanduva.

## CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho de um modelo de previsão qualitativa para bacias hidrográficas propostas pelos autores. Foram selecionadas 3 sub-bacias com histórico de problemas dentro dos domínios da Bacia do Alto Tietê e 90 dias de resultados dentro do período chuvoso de 2010-2011.

Avaliam-se os índices de desempenho para 3 bacias. Os melhores resultados são da bacia do Ribeirão dos Couros, com CSI de 73%, POD de 0.82% e FAR de 13%, seguido pela bacia do Ribeirão dos Meninos com CSI de 72%, POD de 88% e FAR de 21% e o pior resultado para a bacia do Rio Aricanduva com CSI de 52%, POD de 97% e FAR de 46%. A utilização de um modelo advectivo para previsão de precipitação introduz dependências dos resultados com a organização do sistema precipitante, principalmente sobre bacias de porte pequeno e médio (até poucas centenas de km<sup>2</sup>). A revisão dos *thresholds* com periodicidade é necessária, pois bacias urbanas encontram-se em freqüente retificação.

O modelo se mostrou adequado para emissão de alertas do tipo qualitativo para as 2 primeiras bacias, com acerto de 48% e 62% respectivamente dos eventos críticos. No caso da bacia do rio Aricanduva o número elevado de falso alerta prejudica a utilização dos alertas. Ressalta-se que os alertas emitidos necessitam de interpretação de profissionais com conhecimento do funcionamento das ferramentas utilizadas no modelo, principalmente nas estimativas de radar.

Sugere-se para trabalhos futuros a melhoria da estimativa de precipitação a partir de integração de estimativas de radar com redes de superfície, testes com diferentes tipos de esquemas de previsão a curtíssimo prazo (algoritmos de *tracking* por exemplo) e revisão dos *thresholds*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSTIN, G.L., and A. BELLON, 1974: “*The use of digital radar records for short-term precipitation.*” Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society., 100, 658-664.

BARCLAY, P.A., WILK, K.E. “*Severe storm radar echo motion and related severe weather events hazardous to aviation operation ESSA*” Tech. Memo. ERLTM-NSSL. v.46, pp. 63, 1990.

BOWLER N.E.H, PIERCE C.E, SEED A. “*Development of a precipitation nowcasting algorithm based upon optical flow techniques*”. Journal of Hydrology. 288: 74–91 2004.

CALVETTI, L.; BENETI, C.; PEREIRA FILHO, A. J. “*Integração do radar meteorológico doppler do Simepar e uma rede pluviométrica para a estimativa da precipitação*” in: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003, Belo Horizonte. Anais do Simpósio de Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003. CD-ROM.

FUSP – Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo. “*Plano da Bacia do Alto Tietê*”. Sumário executivo. Comitê da Bacia do Alto Tietê, São Paulo, 2002.

HILST, G.R., RUSSO, J.A.. “*An objective extrapolation technique for semi-conservative fields with an application to radar patterns*”. Tech. Memo 3, The Travelers Research Centre Hartford, CT, pp. 34. 1960.c

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Sinopse do Censo Demográfico 2010. Disponível em [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/sinopse\\_tab\\_rm\\_zip.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/sinopse_tab_rm_zip.shtm) <

JOHNSON, J.T., MACKEN, P.L., WITT, A., MITCHELL, E.D., STUMPF, G.J., EILTS, M.D., THOMAS, K.W. “*The Storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm*”. Weather and forecasting, 13, 263–276. 1998.

LEGATE, D. R.; DELIBERTY, T. L. “*Measurement biases in the United States rain gauge network*”. Water Resource Bulletin. v. 29, p. 855-861, 1993.

MARSHALL, J. S., PALMER, W. MCK. “*The distribution of raindrops with size*”. Journal of Meteorology, v. 5, p. 165-166, 1948.

PEREIRA FILHO, A. J., CRAWFORD, K. C. and STENSRUD, D. J., “*Mesoscale precipitation fields: part II: hydrometeor logic modeling*”, Journal of Applied Meteorology, Vol. 38(1), 101-125. 1999

PEREIRA FILHO, A. J.; HAAS, R.; AMBRIZZI, T. “*Caracterização de eventos de enchente da bacia do Alto Tietê por meio do radar meteorológico e da modelagem numérica de mesoescala*”. in: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 22, 2002, Foz do Iguaçu, Paraná. Anais do XXII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, CD-ROM.

PEREIRA FILHO, A.J; VEMADO, F.; HALLAK, R.; HAAS, R. “*Desempenho das previsões do sistema ARPS para São Paulo*”. in: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis, Santa Catarina. Disponível em:  
<<http://www.cbmet.com/cbm-files/14-d77dd1375916080d683e7a346f9185e8.pdf>>

ROCHA FILHO K. L. “*Modelagem hidrológica da bacia do Rio Pirajuçara com TOPMODEL, telemetria e radar meteorológico.*” 138 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SILVA FARIAS J. F. “*Previsão de chuva a curtíssimo prazo na área de abrangência do radar meteorológico de São Paulo.*” 99 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SILVA, R. T.; PORTO M. F. A. “*Gestão urbana e gestão das águas: caminhos da integração*”. Estudos Avançados, v. 17, n. 47, p. 129-145, 2003.

SMITH K.T, AUSTIN G.L. “*Nowcasting precipitation – A proposal for a way forward*”. Journal of Hydrology. 239: 34–45. 2000

TATEHIRA, R., NAKAYAMA, T. “*Objective forecasting of heavy precipitation using numerical prediction model output*”. WMO symposium on the interpretation of broad-scale NWP products for local forecasting purposes. Warsaw, 11–16 October 1976, 121–127, 1976.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. *Drenagem Urbana*. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS, 1995. 428 p.