

Aplicação de Análise Objetiva Estatística a Casos de Brisa Marítima na Área da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê

Fabício Daniel dos Santos Silva¹, Augusto José Pereira Filho², Gabriel Fonseca Sarmanho³

¹Instituto Nacional de Meteorologia. Eixo Monumental Via S-1, 70680-900, Brasília/DF.

E-mail: fabricio.silva@inmet.gov.br

²Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia e Geociências, Universidade de São Paulo. E-mail: apereira@model.iag.usp.br

³Departamento de Estatística, Instituto de Exatas, Universidade de Brasília. E-mail: gabriel.sarmanho@hotmail.com

ABSTRACT: The purpose of this research was the generation of new precipitation fields from the integration of data obtained at the telemetric net of the High Tiete Basin and from estimates of the Weather Radar of São Paulo, through an Objective Statistical Analysis. For such, Weather Radar of São Paulo precipitation fields were analysed and separated from those associated with the Sea Breeze Circulation. The result indicates that the radar usually over-estimates the precipitation associated to these systems. On top of that it was obtained the pattern of the spatial structure of the errors correlation of the precipitation fields from Weather Radar of São Paulo to Sea Breeze cases. These errors allowed for the utilization of Objective Statistical Analysis scheme for Sea Breeze cases.

Palavras-Chave: sea breeze, weather radar, spatial correlations, statistical objective analysis, brisa marítima, radar meteorológico, correlações espaciais, análise objetiva estatística

1. Introdução

Um radar meteorológico banda S (radar meteorológico de São Paulo-RSP), operando com comprimento de onda de 10cm, foi instalado na localidade de Ponte Nova, na área da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BAT), em 1988 (Pisani, 1995), permitindo substancial melhoria nas estimativas da chuva e previsão de enchentes em curto prazo (Pereira Filho, 1988) na área da bacia, que compreendendo toda a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). O radar meteorológico monitora a precipitação em um raio de alcance superior a 120 km, com resolução espaço-temporal equivalente a uma rede telemétrica com cerca de 1 pluviômetro a cada 2 km x 2 km. Tal radar tem suporte de uma rede telemétrica estabelecida na RMSP em 1976 (Barros e Braga, 1992).

Apesar dos erros de medição do radar e dos pluviômetros não serem conhecidos, as estimativas de chuva e as medições podem ser combinadas para diminuir erros (Pereira Filho e Crawford 1995). Este estudo tem por objetivo avaliar as medidas de chuva da rede telemétrica e a estimada com o RSP, em alguns casos de precipitação associada à Brisa marítima (BM). Além disso, integrar os dados de precipitação do RSP e da rede telemétrica da BAT, de modo a melhorar as estimativas dos campos de precipitação para estes tipos de sistemas meteorológicos. Utiliza-se uma técnica de Análise Objetiva Estatística-ANOBES, (Pereira Filho e Crawford 1998) para acumulações de precipitação de 60 e 120 minutos.

2. Metodologia

2.1 Dados de radar

Um conjunto de campos de precipitação de um radar sediado na localidade de Ponte Nova (Figura 1a), à altura constante de 3 km (CAPPI- *Constant Altitud Plan Position Indicator*) foi disponibilizado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica -DAEE, para o período 1998 a 2003. As refletividades, que obedecem a relação de Marshal-Palmer (1948), Z

= 200R^{1,6}, foram convertidas para taxas de precipitação (mm/h), permitindo identificar os tipos de sistemas precipitantes associados à BM.

2.2 Telemetria

A rede telemétrica da BAT conta com 27 unidades, com saídas de dados a cada 10 minutos. Para comparação com as respectivas acumulações de chuva em 10 minutos da rede telemétrica do Alto Tietê, valores acumulados de precipitação estimada foram obtidos de duas varreduras sucessivas do radar contendo, cada varredura, campos da taxa de precipitação com resolução temporal de 5 minutos, extraídos dos respectivos pontos referentes às localizações das estações telemétricas, sendo também estimada a precipitação diária da média entre as estimativas. Para verificar o viés do radar, utilizou-se nestas comparações o índice proposto por Wilson e Brandes (1979):

$$RP = \frac{\sum_{i=1}^N P_i^r}{\sum_{i=1}^N P_i^p} \quad (1)$$

A equação (1) permite identificar o viés médio entre a precipitação acumulada diária estimada com o radar e medida pelos pluviômetros. Estimou-se também o coeficiente de correlação de Pearson (Legates e McCabe, 1999) para 10, 30 e 60 minutos de acumulações.

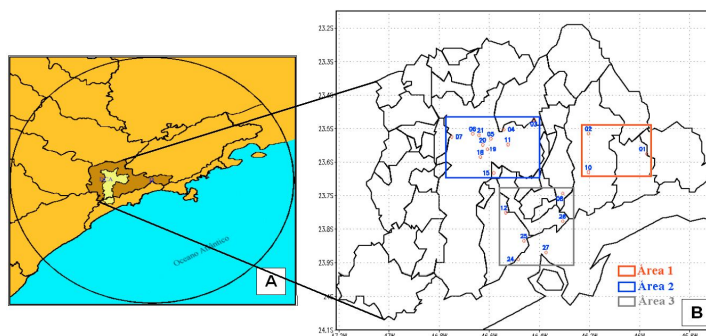


Figura 1. (a) Área de cobertura do radar meteorológico de São Paulo (Raio de 240 km) com destaques para a Bacia do Alto Tietê (BAT) e a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e (b) polígonos enquadrando a rede telemétrica na RMSP.

2.3 Correlações espaciais

As correlações espaciais do erro do radar para casos de brisa marítima foram calculadas utilizando cerca de 30% de todos os casos associadas a este sistema no período entre 1998 e 2003. A grande vantagem do uso dos dados de radar meteorológico para estimar estas correlações é a alta resolução espaço-temporal dos mesmos. O número total de pontos usados para determinar as correlações da amostra é uma função do número de pares em que há ao menos um deles com registro de precipitação mensurável. A correlação espacial é função da distância entre os pixels de 2 km x 2 km para os diferentes intervalos de acumulação citados, e é determinada da média de todas as estimativas de correlação para uma dada distância. Este procedimento extrai a componente isotrópica da correlação espacial, e uma função polinomial é ajustada as médias. A função ajustada deve decrescer monotonicamente com a distância (Pereira Filho et al., 1998). O cálculo destas correlações é de fundamental importância para aplicação de um sistema de ANOBES, pois falhas em considerar o impacto destes erros afetam adversamente os erros da interpolação (Pereira Filho et al, 1998).

A correlação do erro dos campos do radar pode ser estimada por (Pereira Filho et al, 1998):

$$\rho_{kl} = \frac{\langle (P_r^k - P_t^k)(P_r^l - P_t^l) \rangle}{\sqrt{\langle (P_r^k - P_t^k)^2 \rangle \langle (P_r^l - P_t^l)^2 \rangle}} \quad (2)$$

onde $P_r^{k(l)}$ = precipitação acumulada pelo radar (mm) no local k (l). Desde que a acumulação verdadeira $P_t^{k(l)}$ é desconhecida, ρ_{kl} é estimada no sentido climatológico (Creutin e Obled 1982) substituindo-se P_t pela média de longas séries de precipitação.

2.4 O esquema de Análise Objetiva Estatística (ANOBES)

A técnica da ANOBES é um esquema muito eficiente de interpolação que efetivamente reduz a variância do erro de análise. A equação da ANOBES é dada por (Pereira Filho et al, 1998):

$$P_a(x_i, y_i) = P_r(x_i, y_i) + \sum_{k=1}^K w_{ik} [P_p(x_k, y_k) - P_r(x_k, y_k)] \quad (3)$$

onde,

$P_a(x_i, y_i)$ = precipitação analisada (mm) no ponto de grade i ;

$P_r(x_i, y_i)$ = precipitação estimada pelo radar (mm) no ponto de grade i ;

$P_p(x_k, y_k)$ = medida da precipitação do pluviômetro (mm) para uma estação em um ponto k ;

$P_r(x_k, y_k)$ = precipitação estimada pelo radar (mm) para uma estação em um ponto k;

w_{ik} = peso a posteriori;

K = número de pluviômetros, e (x, y) = coordenadas (km).

Este esquema de análise maximiza o sinal da precipitação nos dados e minimiza os erros observacionais para produzir uma análise com erros menores do que teria em uma análise univariada de dados de radar ou de medidas pluviométricas. As vantagens preliminares do esquema da análise são os seguintes (Pereira Filho et al, 1998).

- A variância prevista do erro da análise é minimizada e conhecida;
- A técnica da ANOBES usa as propriedades estatísticas de campos observados de precipitação;
- Somente as medidas de chuva próximas à posição da análise são usadas para a interpolação do ponto de grade;
- A técnica é direta e relacionada às propriedades estatísticas (isto é, a covariância espacial) de sistemas reais de precipitação.

3. Resultados e Discussões

3.1 Características dos sistemas precipitantes associados à brisa marítima

Os sistemas de precipitação associados à brisa marítima foram classificados de acordo com a intensidade de precipitação, o grau aparente de organização dos ecos de chuva, sua distribuição horizontal, deslocamento e duração.

A Brisa Marítima (BM) pode dar origem a sistemas precipitantes convectivos e estratiformes. Os eventos convectivos induzidos pela BM se deslocam para oeste na forma de sistemas convectivos isolados, com características morfológicas semelhantes a eventos de convecção isolada. Em geral, desenvolvem-se entre 14:30 HL e 19:00 HL e tendem a formar linhas de células convectivas ao longo da costa, as quais são favorecidas pela Serra do Mar. Este tipo de sistema alcança a RMSP, onde normalmente produz precipitação convectiva intensa. Em alguns casos, a BM dá origem a pequenas bandas ou áreas de precipitação estratiforme, com pequeno tempo de vida. Na Figura 2, é possível observar o deslocamento de

núcleos convectivos alinhados em direção ao interior do continente, associada à frente de brisa marítima.

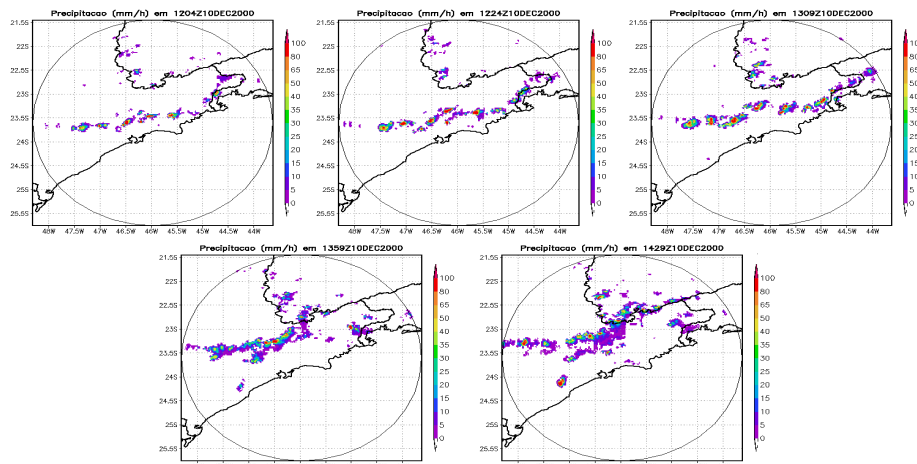


Figura 2. Campos de taxa de precipitação obtidos com o radar meteorológico de São Paulo, evidenciando atuação de núcleos de convecção associados à brisa marítima. Horários (UTC) e datas indicados. Escala de cores indica a intensidade de precipitação (mm h^{-1}).

3.2 Comparações entre as precipitações estimadas pelo RSP e medidas pela rede telemétrica

Para os eventos associados a BM, foi estimado o viés médio, em função da acumulação total média dos pluviômetros e dos pixels do radar correspondentes, e coeficientes de correlação para intervalos de acumulação de 10, 30, e 60 minutos. Para tais casos, o acumulado diário do radar na maioria das vezes superestima os valores de precipitação associados a BM (Figura 3a).

Para tais intervalos, foi observado que as correlações aumentam com o tempo de acumulação, o que sugere uma diminuição da variância temporal, para acumulações mais longas. Nos casos de brisa marítima (Figura 3b, c e d), observa-se uma melhora nos valores de correlações para a acumulação de 30 minutos, não sendo muito acentuada a melhora destes valores para a acumulação de 60 minutos em relação a de 30 minutos, com razoável aumento da variabilidade entre os percentis inferior e superior. Este fator está associado a escala de tempo do sistema ao causar precipitação sobre um pluviômetro, muitas vezes de ordem inferior a 60 minutos, o que acaba por incrementar, também, mais erro associado a estimativa de chuva pelo radar. O valor mediano, nestes casos, aumenta suavemente para os maiores intervalos de acumulação.

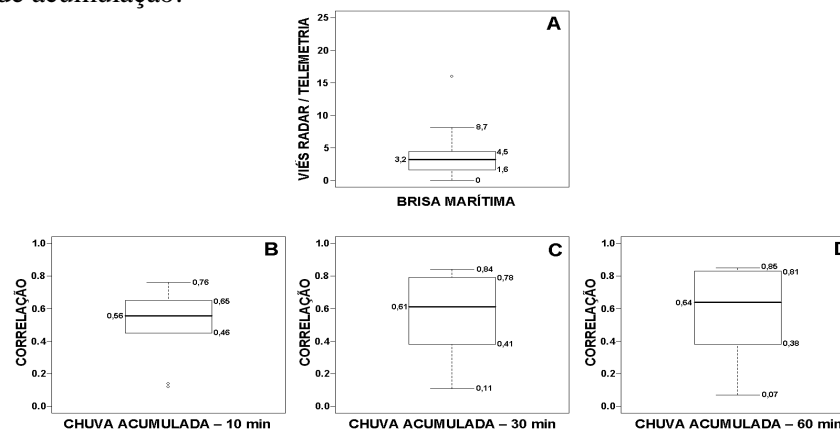


Figura 3. Plotagens box e whisker para o viés associado a eventos de Brisa Marítima (A), e plotagens box e whisker para a correlação para intervalos de acumulação da precipitação de 10 minutos (B), 30 minutos (C) e 60 minutos (D). As caixas denotam a mediana de 50% dos valores entre os percentis de 25 e 75%, com a linha vertical compreendida entre os valores máximos e mínimos.. As caixas denotam a mediana de 50% dos valores entre os percentis de 25 e 75%, com a linha vertical compreendida entre os valores máximos e mínimos.

3.3 Correlações espaciais derivadas diretamente da precipitação estimada com o radar meteorológico de São Paulo

Um total de 29 dias de eventos de chuva associados a BM foi usado para obter a estrutura das correlações em função das distancias para as acumulações de 15, 30, 60 e 120 minutos. Este número representa cerca de 30% do total de dias em que ocorreram estes sistemas com séries de acumulações completas. Houve muitos dias com dados de eventos incompletos, ora por problemas nos dados de radar, ora por problemas nas medidas de telemetria. Os coeficientes de correlações espaciais foram calculados para os quatro intervalos de acumulação mencionados (Equação 2). As curvas ajustadas do componente isotrópico das funções de correlações espaciais médias dos eventos de BM foram ajustadas por funções polinomiais de sexta ordem. As curvas da Figura 4 mostram as correlações médias ajustadas em função da distância, as quais decrescem monotonicamente. A Tabela 1 apresenta os coeficientes dos polinômios ajustados aos quatro intervalos de acumulação; 15, 30, 60 e 120 minutos, para os casos de BM analisados. A equação polinomial de sexta ordem ajustada é do tipo:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6$$

Tabela 1. Coeficientes dos Polinômios das Curvas de melhor ajuste das Correlações Espaciais para sistemas do tipo Brisa Marítima.

BM	X6	X5	X4	X3	X2	X1	X0
15 min	6,82E-9	- 1,00E-6	5,88E-5	- 1,77E-3	2,94E-2	- 2,70E-1	0,985
30 min	6,09E-9	- 8,28E-7	4,53E-5	- 1,29E-3	2,11E-2	- 2,12E-1	0,923
1 hora	2,18E-9	- 3,03E-7	1,68E-5	- 4,89E-4	8,83E-3	- 1,24E-1	0,991
2 horas	-3,17E-9	3,25E-7	- 1,05E-5	4,85E-5	3,86E-3	- 9,14E-2	0,999

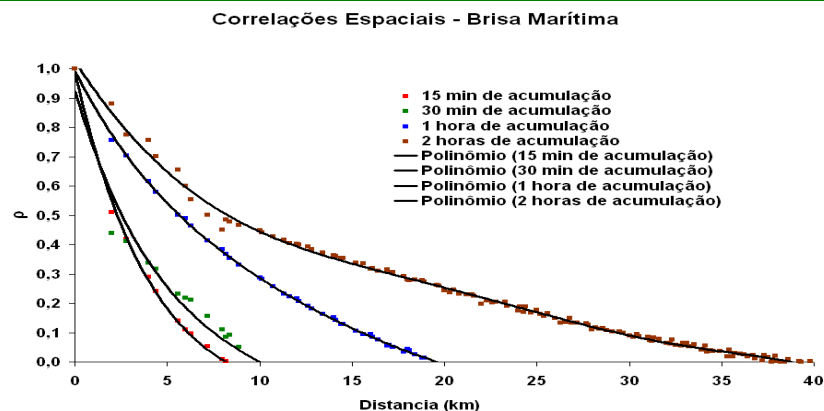


Figura 4. Coeficientes de correlações espaciais médias estimadas de acumulações de precipitação com o radar meteorológico de São Paulo para píxeis de 2 km × 2 km, para casos de Brisa Marítima. Os intervalos de tempo das acumulações são indicados, bem como a curva polinomial que melhor ajusta os dados.

Para eventos de Brisa Marítima, a correlação diminui para 0,5 em 2,5 km e 5 km em 15 e 30 minutos de acumulação. Para 60 e 120 minutos de acumulação, a correlação decresce para 0,5 em 6 e 8,5 km, respectivamente. Percebe-se que a precipitação associada à brisa marítima mantém correlação espacial para pequenos intervalos de tempo. Isto ocorre porque a precipitação associada à brisa é de curta duração, muitas vezes na forma de células convectivas alinhadas devido a efeitos orográficos, com propagação mais rápida. As correlações caem para zero para distâncias de 8,5, 10, 20 e 40 km para 15, 30, 60 e 120 minutos de acumulação, respectivamente.

O esquema de ANOBES foi aplicado a três casos independentes de eventos de BM.

3.4 Aplicação da ANOBES

Uma série de dados independentes foi separada para testar o esquema da ANOBES. Três casos de BM foram analisados para os intervalos de acumulação de 60 e 120 minutos. O objetivo foi de avaliar o esquema para casos de precipitação fraca, moderada e intensa, de acordo com as medições dos pluviômetros da rede telemétrica e estimativas do radar meteorológico de São Paulo. De acordo com a irregularidade espacial dos pluviômetros da rede telemétrica do Alto Tietê, a análise do total de precipitação será para três subáreas da RMSP com diferentes conjuntos de pluviômetros. Estas três áreas foram numeradas de áreas 1, 2 e 3, (Figura 1b). Os campos de precipitação acumulada do radar e da ANOBES são mostrados para um dos casos de BM. A evolução temporal das médias de precipitação nas áreas dos postos e dos respectivos pixels do radar são também analisados. Campos das diferenças entre as estimativas de precipitação do radar e da ANOBES também são mostrados, para o mesmo caso de BM, para evidenciar as áreas nas quais o radar subestimou ou superestimou a precipitação.

• Casos de Brisa Marítima

Os casos de BM selecionados foram os dos dias 08/01/2000, 05/12/1999 e 09/03/1999. O evento de chuva do dia 08 de janeiro de 2000 foi de baixa acumulação. As médias de precipitação obtidas da telemetria e do radar foram, respectivamente, 6,0 mm e 7,6 mm. A ANOBES estimou um valor intermediário de 6,6 mm. A Figura 5 (superior à esquerda) mostra boa coerência referente a amplitude entre as três estimativas, com máximo às 18:00 horas. Os campos de precipitação do Radar, ANOBES e o campo diferença entre eles estão mostrados na Figura 6. Neste caso, apenas para a acumulação de 60 minutos entre 17:00 e 19:00 horas. Dos campos do radar, nota-se que este é um típico caso de convecção organizada ao longo da costa induzido pela BM, inicialmente mais evidente às 16:00 horas. Nas duas horas seguintes, pode-se acompanhar o deslocamento da convecção para o interior do continente, e a modificação de suas características morfológicas, com a precipitação convectiva mais intensa às 19:00 horas. Neste tipo de sistema, para acumulações de 60 minutos, a correlação espacial se torna nula em 20 km. Desta forma, nos campos da ANOBES, o efeito do raio de influência dos pluviômetros é evidente na área 3 (retângulo cinza), quando foi observada precipitação pela telemetria não detectada pelo radar. Notam-se neste caso círculos concêntricos de taxas de precipitação que se propagam além do ponto específico do pluviômetro. Outra característica importante que é mais bem observada neste tipo de sistema é a propagação anômala de precipitação fora dos retângulos onde se encontram os conjuntos de dados telemétricos. Este efeito ocorre devido à técnica da ANOBES não ser apropriada para interpolação de dados muito além das áreas onde se encontram as medidas telemétricas que serão integradas aos respectivos valores de precipitação estimados pelo radar.

No evento de 05/12/1999, para 60 minutos de acumulação, a telemetria registrou 4,7 mm, uma quantidade de chuva reduzida quando comparada ao radar, que estimou 23,1 mm e a ANOBES com 20,1 mm. Para 120 minutos de acumulação a ANOBES reduziu este valor para 17.6 mm. Choveu entre 17 e 19:00 horas, com máximo às 18:00 horas, quando a telemetria mediu 2,6 mm contra 9.3 mm do Radar, Figura 5 (superior à direita). Os campos de precipitação do Radar, ANOBES e diferença não são aqui mostrados. Neste evento, assim como no anterior, o radar superestimou a precipitação em mais de 10 mm. As áreas onde o radar subestimou a precipitação não foram tão significativas quanto as áreas onde houve superestimativas, de forma que a taxa de acumulação pela ANOBES foi muito próxima do acumulado pelo radar.

O evento de 09/03/1999 foi o mais intenso com dois máximos de precipitação, às 18:00 horas e, outro entre 23 e 24 horas, Figura5 (centralizada abaixo). A ANOBES obteve valores muito próximos aos do Radar (Figuras não mostradas). Para este caso, o Radar subestimou a precipitação da telemetria em mais de 10mm. Este foi um dos poucos eventos em que a telemetria registrou quantidade maior de precipitação do que a estimada pelo radar.

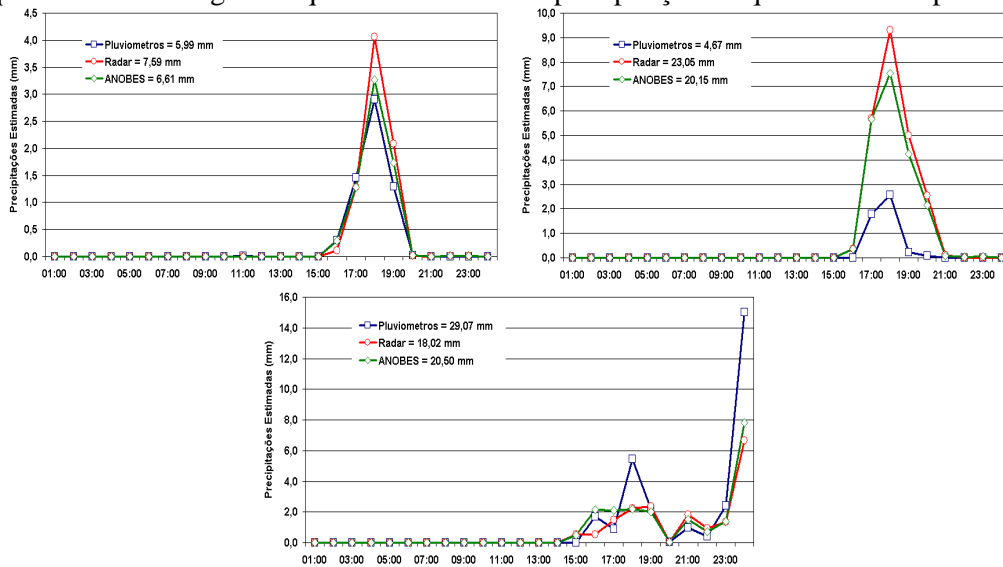
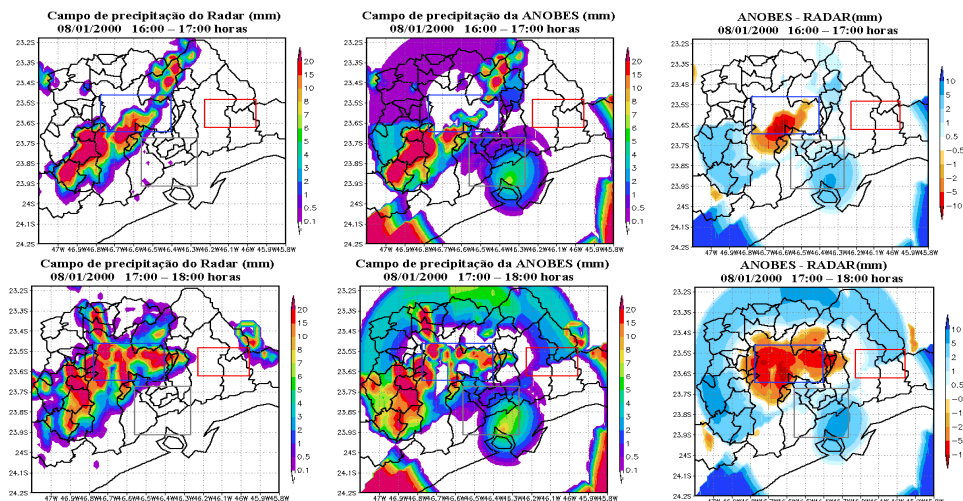


Figura 5. Distribuição da precipitação média horária medida pelos pluviômetros, estimadas pelo radar e corrigida pela ANOBES, para os dias 08/01/2000, 05/12/1999 e 09/03/1999, para o intervalo de 60 minutos de acumulação.



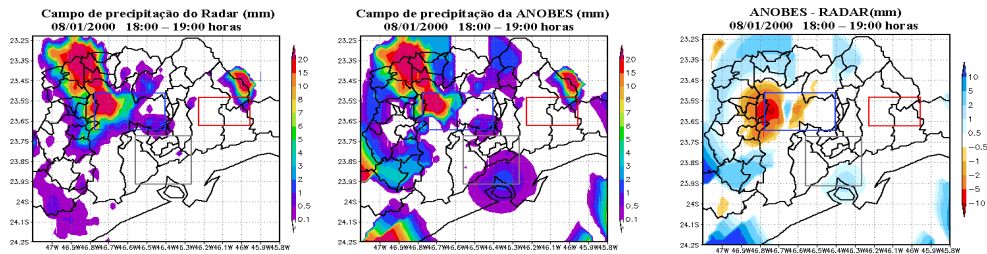


Figura 6. Campos de precipitação acumulada em 60 minutos no dia 16/02/2000 estimada com o (1) Radar – coluna da esquerda; (2) ANOBES – coluna do meio e (3) campo diferença entre ANOBES e Radar – coluna da direita. Retângulos azul, vermelho e cinza indicam as áreas de maior densidade de postos pluviométricos, onde foram efetuados os respectivos cálculos da ANOBES.

4. Conclusões

Os resultados das correlações espaciais indicam que sistemas de vida curta e com menor abrangência espacial, como é o caso dos associados a BM, possuem correlações espaciais que decrescem rapidamente com a distância, atingindo poucos quilômetros mesmo para intervalos de acumulações maiores. Estas estatísticas foram usadas numa técnica de análise objetiva estatística (ANOBES) para a integração de dados de telemetria aos dados do radar. Evidenciou-se que o ANOBES poderia ter melhor desempenho com uma rede de superfície maior e melhor distribuída. Desta forma, para sistemas convectivos como BM, a ausência de dados de chuva da telemetria para além das três áreas, resulta em erros maiores. Isto ocorre porque as funções de correlação utilizadas na ANOBES decaem rapidamente com a distância. Sem dados telemétricos para ajustar as estimativas do radar, a ANOBES depende exclusivamente do campo de chuva do radar e, também, é provável que células convectivas individuais de vida curta possam ocorrer entre os postos pluviométricos da rede telemétrica e, evidentemente, estes dados não são medidos. Mesmo assim, a ANOBES se mostrou uma técnica robusta, diminuindo as diferenças entre as estimativas de chuva do radar e as medidas da rede de superfície nas três áreas com dados telemétricos.

5. Referências Bibliográficas

- BARROS, M.T.L. ; B.P.F, BRAGA JR, . São Paulo Flood Warning System : Integrating Different Levels of Data Quality and Availability. In: *2nd. International. Symposium on Hydrological., Applications of Weather Radar*, 1992, Hannover, Alemanha, 1992.
- LEGATES, D. R., AND McCABE, G. J., 1999: Evaluating the Use of “Goodness of Fit” measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation. *Water Resources Research*, 35: 233-241.
- MARSHALL, J. S.; PALMER, W. M. K. The distribution of raindrops with size. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, v. 5, p. 165-166, 1948.
- PEREIRA FILHO, A. J.; CRAWFORD, K. C.: Integrating WSR-88D estimates and Oklahoma Mesonet Measurements of rainfall accumulations: a statistical approach. *27th radar conference.*, 1995, Vail, Colorado. Boston, Massachusetts: American Meteorological Society, 1995. p. 240-242.
- PEREIRA FILHO, A. J.; BARROS, M. T. L: Flood warning system for megacities: a Brazilian perspective. In: *International Conference on Hydrology in a changing environment*, 1998. British Hydrological Society.
- PISANI, A., 1995, *Avaliação dos Dados do Radar Meteorológico de São Paulo para Aplicação em Hidrologia*, Tese de Doutorado, Dep. de Engenharia Hidráulica /Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- WILSON, J. W., BRANDES, E. A. Radar rainfall measurement: a summary. *American Meteorological Society Bulletin*, v.60, 1048-58, 1979