

Campos de Precipitação Parte I: Fundamentos Teóricos e Estudos Preliminares

Ilza Machado Kaiser
Fatec-Jahu – ilzakaiser@bol.com.br

Rodrigo de Melo Porto
EESC-USP – rodrigo@sc.usp.br

Recebido: 19/10/04 revisado: 03/05/05 aceito: 30/08/05

RESUMO

Este trabalho discute a composição de campos de precipitação a partir de duas fontes de dados: os pluviôgrafos e o radar. São revisados as características de cada equipamento de coleta de dados e elencadas diversas técnicas de composição desses campos. A conveniência da utilização de técnicas mistas não é consensual na bibliografia. Faz-se a comparação pontual dos valores de radar e pluviômetros e confronta-se com os valores da bibliografia. Verifica-se a capacidade dos métodos de estimar a chuva pontual diária. Verifica-se, com base em 2 meses de dados, o comportamento do volume diário de chuva e das chuvas máximas diárias pontuais. Os campos de precipitação são comparados com base na observação das isoetas diárias. Alguns métodos foram selecionados para estudo de caso mais detalhado apresentado na parte II deste artigo.

Palavras-chave: campos de precipitação, radar, pluviômetros

INTRODUÇÃO

A precipitação é o dado de entrada de diversas aplicações hidrológicas que variam da escala sinótica até pequenas bacias hidrográficas. Muitas atividades investigativas têm sido desenvolvidas para compreender, classificar e quantificar este fenômeno. Entretanto, ainda persiste uma grande incerteza quanto à sua distribuição espacial e temporal.

Tradicionalmente a chuva é medida em postos pluviométricos e pluviográficos, mas também pode ser medida de forma indireta por sensoreamento remoto, através de satélites e radares.

O satélite fornece informações sobre deslocamentos de grandes massas de ar e é usado regularmente em atividades meteorológicas. O radar proporciona informações discretizadas em pequenos intervalos de tempo e espaço. Seu uso mais freqüente está relacionado à meteorologia, seu emprego como fonte adicional de dados na modelação hidrológica tem se dado principalmente em âmbito acadêmico. A gestão de um grande volume de dados e questões relativas à sua calibração são os empecilhos apontados por Calheiros (1982) para a utilização do radar de forma

mais ampla.

Os programas NEXRAD (*Next Generation Radar*), nos Estados Unidos, e COST (*European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research*), na Europa, evidenciam o grande investimento humano e material que tem sido feito no estudo de radares. Porém, ainda hoje, os dados de radar são pouco explorados operacionalmente em hidrologia. Isto ocorre em função da dificuldade de acesso ao dado de radar, da falta de confiança neste dado e da falta de integração entre hidrólogos e especialistas em radar, conforme Braga & Massambani (1997) e Rossa *et al.* (2005).

Marshall e Palmer propuseram a primeira equação de calibração em 1948, baseada em observações experimentais de radares e pluviômetros. As equações ZxR relacionam a refletividade das gotas (Z, em dBz) a um nível de chuva (R, em mm h⁻¹). Há um grande número destas equações, desenvolvidas por diversos autores para explicar os diferentes tipos de precipitação (Smith *et al.*, 1975, Austin, 1987, Atlas, 1990 e Braga & Massambani, 1997).

A calibração do radar também pode ser feita com o disdrômetro, um equipamento desenvolvido para obter amostras estatisticamente representativas das dimensões das gotas presentes em um evento,

determinando, desta forma, o espectro das gotas de chuva. Estudos indicam que a calibração feita com o disdrômetro apresenta resultados mais consistentes, pois ambos os instrumentos fornecem resultados diretamente relacionados com o diâmetro das partículas (Antonio, 1998).

Pelas características intrínsecas dos equipamentos, deve-se ter claro que, apesar dos pluviômetros, disdrômetros e radares medirem o mesmo fenômeno – a chuva, a forma como essa medida é feita e as amostras analisadas são muito distintas. O pluviômetro analisa um pequeno volume de chuva coletado a 1,50m da superfície, o disdrômetro a distribuição dos tamanhos de gotas e o radar um grande volume amostrado a alguns quilômetros acima da superfície.

As características operacionais destes equipamentos interferem na qualidade dos dados finais. Para o radar os principais aspectos que afetam a quantificação da chuva são:

- Tipo de precipitação;
- Evaporação – quando umidade relativa do ar é muito baixa, parte da chuva detectada pelo radar evapora no percurso até o solo;
- Elevação da antena – quanto mais baixa a antena, maior a presença de ecos de terreno; quanto mais alta, maior a probabilidade do radar não interceptar a chuva que se forma a baixa altitude nos locais mais distantes;
- Interceptação da banda brilhante – quando o radar intercepta a camada de gelo presente em nuvens;
- Distância entre o radar e ponto amostrado – o radar ilumina regiões muito grandes que podem conter grande diversidade de estágios de precipitação, cujas medidas podem interferir umas com as outras causando o fenômeno de atenuação;
- Propagação anômala da radiação – o feixe do radar pode ser desviado quando interceptar uma camada de ar próxima do solo com alta refletividade;
- Desvio por ventos.

Além dessas imprecisões, existem também as originadas na aquisição de dados via pluviômetros e pluviógrafos, sumariadas por Govone (1996):

- Inclinação accidental do aparelho;
- Atritos mecânicos do aparelho;

- Tempo de oscilação do pluviógrafo;
- Ausência de medidas para precipitação fraca;
- Diferenças na forma de amostragem – como a medida é pontual, mesmo em redes densas alguns eventos com grande variabilidade espacial podem ser mal representados ao fazer a extração espacial dos valores medidos pontualmente;
- Desvio por vento – causam perdas na captação, que variam de 10 a 50%.

O radar meteorológico é o único instrumento que fornece informações da localização, da estrutura 3-D do campo de precipitação e uma avaliação quantitativa, com uma resolução comparável aos dos instrumentos clássicos de medida. O valor do radar corresponde à média da chuva em um volume atmosférico, que está relacionada à largura do feixe e a distância do ponto ao radar. Donzelli & Mezzasalma (1995) observaram alguns comportamentos típicos nas medidas de radar: ausência de registro para chuvas finas em baixa altitude; freqüente subestimativa e eventual superestimativa na presença de granizo ou de evaporação no início da precipitação.

Para Joss & Waldvogel (1990) a alta variabilidade do perfil de refletividade em uma única tormenta, e de evento para evento, também dificulta a obtenção de uma relação ZxR. Além disso, o fato do radar não fornecer medidas contínuas no tempo é mais um fator de incerteza, pois variações de intensidade podem ser omitidas, além da perda de informações com o deslocamento da tormenta (Liu & Krajewski, 1996).

ESPACIALIZAÇÃO DE EVENTOS DE CHUVA

O estudo da distribuição espacial de eventos de chuva pode ser feito através da composição de campos de precipitação ou pela determinação da precipitação média sobre a área. A obtenção deste valor médio está apoiada em alguma hipótese de distribuição espacial de chuva.

Os campos de precipitação podem ser compostos a partir de métodos de interpolação de dados pluviométricos. A integração na área fornece a chuva média. A análise de desempenho desses campos é feita através da comparação de valores pontuais ou de médias espaciais. Nesses estudos, é usual admitir-se como padrão de comparação a precipitação média calculada com a rede mais densa, uma vez que a distribuição real é

desconhecida. É difícil a comparação dos resultados obtidos pelos diversos autores, uma vez que não existe uma padronização na representação da variação espacial dos eventos de chuva (Silverman *et al.*, 1981).

As técnicas de interpolação usadas na composição dos campos de precipitação são classificadas em métodos simples e determinísticos, onde os mais conhecidos são: vizinho mais próximo, inverso da distância, inverso do quadrado da distância e ponderações por quadrantes. Nesse tipo de análise, a estimativa de chuva num ponto nunca será maior nem menor que os valores extremos observados. Além disso, todos os pontos terão valores de chuva, o que pode não corresponder à realidade. Nos métodos mais sofisticados estão os determinísticos, que consistem em interpolações polinomiais para traçado de isoetas e os estatísticos, que usam estimadores tais como *kriging*, entre outros (Creutin & Obled, 1982 e Govone, 1996).

Creutin & Obled (1982) fizeram revisão das técnicas de estimativa de valores pontuais de chuva usando várias técnicas de interpolação. Os métodos foram testados em uma região com alta variabilidade pluviométrica. Concluíram que o método do vizinho mais próximo é claramente insatisfatório, e que os métodos classificados como sofisticados forneceram estimativas melhores.

Costa & Righetto (1987) desenvolveram um algoritmo para a espacialização dos dados pontuais de chuva. A estimativa do valor da chuva para cada ponto leva em consideração a distância do ponto da malha às estações de medida. O método classifica a precipitação em convectiva ou frontal, e adota diferentes procedimentos para composição dos campos de precipitação. Para verificação da eficiência do método, os autores compararam com a precipitação média na área obtida pelo método de Thiessen. Consideraram o método das isoetas como padrão de comparação e concluíram que esse método é mais eficiente que Thiessen.

Observou-se o interesse em aliar as informações obtidas via radar aos dados medidos nos postos pluviométricos para composição dos campos de precipitação. Tem-se por consenso que:

- Pluviômetros e pluviógrafos medem a altura de chuva no nível do solo com precisão e de forma contínua no tempo, mas não fornecem indicações da distribuição espacial;
- Radares são capazes de fornecer informações sobre a distribuição espacial e

temporal, mas não coletam os dados de forma contínua, e fazem uma amostragem volumétrica de grande proporção.

O dilema do estudo conjunto foi sintetizado por Austin (1987): “a cada instante, a intensidade da chuva varia significativamente em distâncias menores que 1 km, e, em um ponto, ela pode mudar em intervalos de tempo de 1 minuto ou menos. Desta forma, a chuva amostrada por pluviômetros pode não ser representativa do volume amostrado pelo radar. Da mesma forma, a taxa de chuva observada instantaneamente pelo radar pode não representar as intensidades que ocorreram entre os intervalos de observação”.

Todas as técnicas que fazem o uso conjunto relacionam as medidas de radar com as de pluviômetros e propõem fatores de ajuste, que geralmente consideram as distâncias relativas entre os instrumentos de medida, o tipo de precipitação e o coeficiente G – razão entre a medida pontual pluviométrica e do radar ($G = P/R$). Nesses trabalhos, os pluviômetros são usados para ajustar os dados de radar. A verificação é feita através da análise de dados pontuais e médias espaciais. Geralmente consideram-se os dados de pluviômetros como sendo os corretos, ou seja, como o padrão de comparação.

Joss & Waldvogel (1990) enfatizam a necessidade de se fazer o ajuste e compensação de todos os erros sistemáticos conhecidos nas medidas de radar – perfil de refletividade, ecos de terreno e atenuação – antes de fazer a composição das duas fontes de dados para elaboração do campo de precipitação.

O coeficiente de correlação linear de dados pontuais de radar e pluviômetros, obtidos por Smith *et al.* (1975), em estudos de otimização de equações ZxR foi de 0,68. Observaram a tendência do radar apresentar resultados inferiores aos de pluviômetros. Verificaram muitos casos de não ocorrência simultânea de chuva nos dois aparelhos, que foi explicada pelas baixas taxas de precipitação não terem sido detectadas pelos pluviômetros e pela ocorrência de evaporação. Estudaram a distribuição estatística dos logaritmos de G e verificaram que ela se assemelha à distribuição normal com média aproximada em zero. Fizeram também um estudo da chuva integrada na área e no tempo, estudando a chuva diária. A integração em área para os pluviômetros foi feita por um processo semelhante ao polígono de Thiessen. Nessa etapa, o coeficiente de correlação entre os dados obtidos pelas duas fontes foi de 0,88. Observaram a tendência do radar

fornecer resultados mais elevados nos dias com chuvas muito baixas (<10mm/dia), do pluviômetro fornecer valores maiores para dias com chuvas moderadas(20 a 30 mm/dia) e nos dias com chuvas intensas a dispersão ser balanceada.

Barge *et al.* (1979) compararam os resultados de radar e pluviômetros no Canadá. Com vinte dias de dados, obtiveram um fator G com média de 1,15 e desvio-padrão de 2,95. Ao analisar um evento de 6 dias de duração constataram, porém, valores de G variando de 0,28 a 3. A explicação para estes valores foi a constatação de núcleos convectivos que foram medidos pelo radar e não pelos pluviômetros.

Brandes (1975) propôs um método de composição de campo a partir de dados de radar e pluviômetro. Para cada ponto do campo, é atribuído um fator de ponderação WT_i , calculado individualmente para cada pluviômetro (eq. 1).

$$WT_i = \exp\left(\frac{-r^2}{EP}\right) \quad (1)$$

onde r é a distância do ponto da rede ao pluviômetro e EP controla o grau de suavização, sendo determinado em função do espaçamento médio dos pluviômetros. A fixação de pares de valores de EP e WT_i definem um raio de abrangência, de modo que, para cada ponto do gride, somente serão considerados os pluviômetros que estiverem dentro desta região. Operacionalmente EP deve ser o menor possível, para que sejam preservados os detalhes do campo de precipitação analisado.

O cálculo é feito em duas etapas, na primeira, para cada ponto do campo faz-se uma ponderação dos WT_i obtendo um fator de correção F_1 .

$$F_1 = \frac{\sum_{i=1}^n WT_i * G_i}{\sum_{i=1}^n WT_i} \quad (2)$$

onde n é o número de pluviômetros e G_i – a razão entre o valor do pluviômetro e valor médio do radar, no entorno do pluviômetro.

Calcula-se, a seguir, nos locais das estações, a diferença D_i , ($D_i = G_i - F_1$) para todos os postos. Procede-se à segunda iteração, calculando novamente WT_i , com o valor de EP reduzido à metade. Calcula-se o novo fator de correção F_2 . O

campo de radar corrigido é obtido multiplicando-se o valor do radar por F_2 .

$$F_2 = F_1 + \frac{\sum_{i=1}^n WT_i * D_i}{\sum_{i=1}^n WT_i} \quad (3)$$

Brandes (1975) testou o método acima para nove eventos convectivos e comparou com dados de radar sem correção e com dados somente da rede pluviométrica com duas densidades: 900 e 1600 $\text{km}^2 \text{ plu}^{-1}$. Analisou a capacidade das técnicas estimarem a precipitação média de uma bacia e de representar a variação espacial da chuva. O padrão de comparação foi uma rede de 118 pluviômetros, igualmente espaçados. O resultado obtido pelo método de Brandes foi o que mais se aproximou do padrão. A redução nos erros médios foi da ordem de 10%, quando comparada com estimativas feitas somente pelos pluviômetros. A análise da capacidade de estimativa dos dados pontuais foi feita omitindo-se alguns pluviômetros e fazendo-se a correlação entre os valores medidos e os calculados usando apenas a rede pluviométrica e a técnica proposta. Houve um aumento nos coeficientes de correlação para o método de Brandes de 0,73 para 0,88 para densidade de 900 $\text{km}^2 \text{ plu}^{-1}$ e de 0,68 para 0,85 para 1600 $\text{km}^2 \text{ plu}^{-1}$. Os campos compostos apresentaram maior variação espacial.

Hildebrand *et al.* (1979) investigaram a eficiência de métodos compostos, similares ao método de Brandes, para estimativa da chuva média, em pequenas áreas, causada por processos convectivos, utilizando dados de regiões diferentes (Illinoi e Montana). Observaram que o campo de precipitações gerado apenas por pluviômetros difere bastante do campo do radar, e que este apresenta valores inferiores para todos eventos estudados. A composição dos dados forneceu resultados mais próximos aos da rede de pluviógrafos. Verificaram que, para a região de Montana, com clima seco, a correção dos dados de radar relativa aos efeitos da evaporação é imprescindível. Verificaram a ocorrência de ganho de eficiência na utilização das técnicas compostas, ao se variar a densidade da rede. Admitiram como verdadeiros os dados provenientes da rede completa de pluviógrafos. A densidade da rede foi paulatinamente sendo reduzida, e para cada etapa foram calculados os erros médios percentuais dos valores obtidos com o uso desta rede, dos dados do radar, e dos dados do radar ajustados. Concluíram que para densidades de

rede da ordem de 100 km² plu⁻¹ a combinação de dados não fornece resultados mais precisos do que quando se utiliza somente a rede de pluviógrafos. Para densidades inferiores, 250 a 300 km² plu⁻¹, as medidas combinadas são mais precisas para Illinois e menos precisas para Montana.

Govone (1996) apresenta um método, desenvolvido por Koistinen & Puhakka (1981), baseado no trabalho de Brandes, que insere um ajuste que depende da distância entre pluviômetro e radar. O cálculo do fator de ajuste $F(i,j)$ é feito de forma similar à apresentada pela expressão (2). Calcula-se o fator G para cada estação e plotam-se os dados de $\log(G)$ em função da distância entre o pluviômetro e o radar (ρ). Através de métodos de regressão, busca-se um ajuste $F(\rho)$ para estes dados. O cálculo final do campo é feito através da expressão 4 :

$$FF(i,j) = F(\rho(i,j)) + \exp\left(\frac{-\bar{r}_{ij}}{1,5ra}\right)(F(i,j) - F(\rho(i,j))) \quad (4)$$

onde ra é o coeficiente que considera o tipo de chuva, com valores sugeridos de 40 km para chuvas frontais e 10 km para processos convectivos; $\rho(i,j)$ é a distância do ponto ao radar; $F(\rho(i,j))$ é obtido substituindo o valor $\rho(i,j)$ na função $(F(\rho))$ já determinada; $FF(i,j)$ é o fator de ajuste final no ponto (i,j) . A estimativa final ajustada é obtida pela multiplicação do dado do radar pelo fator de ajuste final.

Barnston & Thomas (1983) investigaram a acurácia da medida da chuva via radar e radar corrigido por pluviômetros. Calcularam o fator G para uma região densamente instrumentada e aplicaram esse valor para toda área de estudo. Observaram que para pequenas alturas de chuvas, o índice G é bastante instável. Buscaram identificar nas diferenças observadas entre pluviômetro-radar e radar corrigido parcelas relativas a tendências e oscilações aleatórias, através da comparação das chuvas integradas em área do radar com e sem ajuste aos valores dos pluviômetros. Verificaram que a correção dos dados eliminou uma parcela das tendências, mas não interferiu na parcela aleatória. A análise dos resultados do radar (com e sem correção) x pluviômetro indicam um ajuste não linear. Para explicar este comportamento, propuseram uma análise por faixas de precipitação, classificando dias muito secos, secos, úmidos e muito úmidos, e verificaram que existe um comportamento diferenciado nestas faixas. Nos dias

mais secos (<1,5 mm/dia), o ajuste dos dados de radar tende a aumentar a diferença, na faixa intermediária (4 a 7 mm/dia) parece não haver diferença significativa entre dados ajustados e sem ajuste, e para faixa mais chuvosa (7 a 22 mm/dia) os dados ajustados se aproximam mais dos dados dos pluviômetros. Na análise global a média dos dados ajustados está mais próxima dos valores dos pluviômetros.

Barnston (1991) investigou erros de amostragem e medida associados à determinação da chuva média em uma área, a partir de dados de pluviômetros. Partindo de um campo de precipitação gerado pelo radar como paradigma, coletou amostras neste campo e avaliou o erro de amostragem para várias densidades amostrais. Determinou que o desvio-padrão dos erros amostrais, para todos os dados do estudo, corresponde a 15% da chuva média. Esse valor varia de 11% para os dias mais úmidos a 30% nos dias mais secos. Concluiu que os ajustes propostos nas medidas do radar (via relação G) são muito efetivos para eliminação de tendências, mas não na resolução, e que, para os dias secos, o ajuste parece piorar a resolução dos resultados.

Collier (1986b) fez estudos para composição de campos de precipitação a partir de dados de radar com e sem ajuste baseados em dados pluviométricos obtidos em uma rede telemétrica. Comparou as estimativas de precipitação feitas usando somente a rede telemétrica de pluviômetros e usando o radar calibrado por esta rede. Concluiu que dentro de uma área de 75 km do radar, para qualquer tipo de chuva, o espaçamento da rede deveria ser de 20 km, para produzir estimativas mais precisas que as obtidas a partir de dados de radar calibrados. Isto implica em um aumento de 200% no número de pluviômetros existentes.

Austin (1987) comparou estimativas de chuvas feitas por radar e por pluviômetros, procurando identificar as causas físicas das discrepâncias nos valores observados. Foram avaliados dados de dois radares, de 33 pluviógrafos distantes do radar de 40 a 128 km e mais 32 com distâncias de 128 a 200 km. Foram avaliados 20 eventos de chuva e feitas 374 comparações individuais de RxP. Ao analisar o total precipitado nos pluviômetros e as medidas totais feitas pelo radar, a diferença ficou em torno de 10%; porém, analisando individualmente os eventos, foram encontradas diferenças da ordem de mais ou menos 20%. A autora classificou e analisou separadamente os eventos em função da intensidade do processo convectivo. Identificou as condições sinóticas de

cada evento e determinou os processos físicos preponderantes. Verificou que, para cada classe de eventos analisada, existem comportamentos relativos entre radar e pluviômetro típicos. Austin (1987) conclui que para pesquisa e uso operacional, o radar dá informações consistentes, principalmente em eventos convectivos intensos. Em outras circunstâncias, ele dá informações qualitativas. Ela defende os processos de análise e ajuste que busquem identificar as causas físicas das distorções e o emprego de diferentes equações ZxR. Critica o método de ajuste proposto por Brandes, afirmando que as correções nos valores do radar só se justificam quando for observado um desvio consistente.

Smith (1990) discorre sobre a conveniência de ajustar os dados de radar com dados de pluviômetros. Mostra trabalhos que estudam o comportamento típico do coeficiente G que indicam um bom ajuste à curva log-normal, corroborando resultados anteriores. Relata os resultados de análise de distribuição de G (valores diários) que obtiveram valores entre 0 a 20, com pico de freqüência de 2 a 5.

Donzelli & Mezzasalma (1995) estudaram a dependência espacial e temporal do fator G. Perceberam que o radar subestima os valores, o que fica mais evidente quando se analisa o valor diário. Não acharam relação entre G e a distância do radar. A análise de auto-correlação espacial e temporal dos valores de R, P e G indicam uma piora à medida que se aumentam os intervalos de tempo e espaço. Apesar de não alcançarem resultados conclusivos, afirmam que o uso de pluviômetros para corrigir os campos de precipitação gerados por radar é útil, pois dilui as imprecisões das equações ZxR. Sinalizam que melhores resultados podem ser obtidos quando se usam relações ZxR específicas para o tipo de precipitação e quando for possível identificar a causa física das divergências e corrigir através de fatores de ajustes específicos.

Steiner *et al.* (1999) verificam o impacto da qualidade de dados pluviométricos nos campos ajustados de radar. O experimento foi realizado com 30 postos pluviométricos, sendo 12 pluviógrafos e 1 disdrômetro. Selecionaram 30 eventos com alturas diárias de chuva na faixa de 10 a 70 mm. Os autores observaram que em 80% dos casos, o radar apresentou resultados menores que o pluviômetro. A relação G variou de 0,39 a 2,49. Observaram uma alta freqüência de falhas nos pluviógrafos de báscula.

Usaram vários cenários para comparação dos resultados: radar sem ajuste, um limite de

refletividade mínimo, um limite de refletividade máximo para evitar as distorções em função da presença de granizo e campo de radar ajustado para retirar as tendências. O desempenho foi avaliado em função do RMSE (*root mean square error*). O método proposto para eliminação de tendência sempre diminui a diferença entre valores medidos nos pluviômetros e no radar. Portanto, sua utilização pode atenuar inadequações na fórmula do radar. Concluíram que a utilização do método de eliminação de tendências, com base apenas em dados de pluviógrafos confiáveis, pode reduzir o RMSE à valores da ordem de 10%, observando que os valores encontrados por outros pesquisadores em diversos trabalhos variam de 8 a 42%, porém com valores mais freqüentes da ordem de 30%.

METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é o estudo comparativo de campos de precipitação compostos por várias metodologias utilizando dados de radar e pluviômetros.

Os dados de radar foram cedidos pelo Instituto de Pesquisas Meteorológicas de Bauru (IPMet), que opera um radar banda S. Esse radar faz uma varredura completa a cada hora com a antena mais baixa, com o objetivo de vigilância meteorológica. Uma vez detectado qualquer evento na região mais interna, na qual é possível fazer a quantificação dos eventos, a antena do radar passa a ser movimentada e faz a varredura para todas as elevações. Este conjunto de dados rearranjado fornece os CAPPIS (*Constant Altitude Plan Position Indicator*). Nessa fase, os dados de refletividade (Z) estão em dBz e são convertidos pela equação Marshall Palmer em intensidade de chuva (R) em mm h^{-1} . O intervalo mínimo para repetição do procedimento é de 5 minutos e o equipamento consegue discretizar 256 níveis de intensidade de precipitação. O CAPPI operacional padrão é de 3,5 km.

A maior resolução espacial é de 1 km^2 . Os dados brutos são armazenados em fitas magnéticas em formato binário, após gerarem produtos elementares de visualização e manuseio. O IRIS (*Interactive Radar Information System*), um programa aplicativo dedicado de radar instalado nos sistemas operados pelo IPMet, possibilita o ajuste de alguns parâmetros técnicos do radar para coleta de dados com a melhor qualidade possível. Nessa fase é aplicado um filtro para eliminar os ecos de terreno e

os efeitos de propagação anômala (Antonio, 1998).

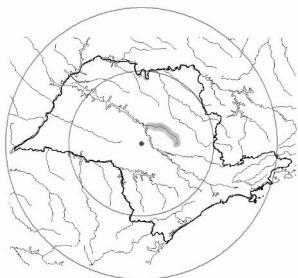


Figura 1 – Localização - O ponto indica o radar. O círculo interno, com raio de 240 km indica a região de registros quantitativos, e o círculo externo, com raio de 450 km a região de registros qualitativos. A área sombreada indica a bacia do rio Jacaré-Guaçu apresentada em detalhe na figura 2.

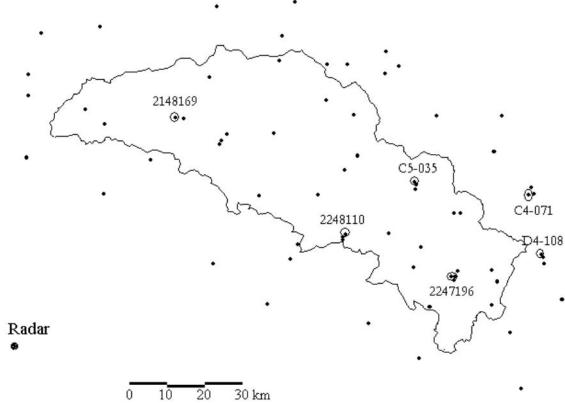


Figura 2 – Localização dos postos pluviométricos e do radar. As estações assinaladas foram retiradas para o estudo de estimativa pontual.

A região estudada, bacia do rio Jacaré-Guaçu, conta com 65 estações pluviométricas, cujos dados foram obtidos junto ao DAEE e ANA. (figura 2).

Antonio (1998) comparou as medidas de chuva com disdrômetro, pluviógrafos e radar na região de abrangência dos radares do IPMet de Bauru e Presidente Prudente, com o objetivo de determinar equações ZxR. As equações obtidas para os pluviógrafos diferem bastante entre si e das equações tradicionais, e apresentam coeficientes de correlação variando de 0,88 a 0,29. O cálculo de equações ZxR a partir de disdrômetros contou com um universo maior de dados em função da natureza das medidas disdrométricas. As equações obtidas variam em função da localização do disdrômetro e

da natureza do evento (frontal/convectivo); apresentam coeficientes de correlação superiores a 0,95.

Foi feito um estudo piloto para testar e selecionar técnicas de interpolação dos dados e verificar o desempenho de duas equações ZxR (Marshall Palmer e Antonio). O teste foi realizado em dois períodos de 1995: verão (janeiro e fevereiro) e inverno (junho à agosto).

A primeira etapa do trabalho consistiu na análise dos índices G. Os resultados foram organizados em gráficos acumulados e distribuídos de G e log (G) que indicam um comportamento padrão que não difere em função da equação ZxR utilizada. O fato dos pontos se ajustarem melhor à distribuição logarítmica confirma os resultados já apresentados na revisão bibliográfica, conforme figura 3.

Nos meses secos, os resultados não se ajustam tão bem à distribuição log-normal. Tal fato pode ser explicado pela natureza dos eventos e pelo menor número de pontos desta amostra, que apesar de corresponder a um período mais longo, contém um número de eventos significativamente menor.

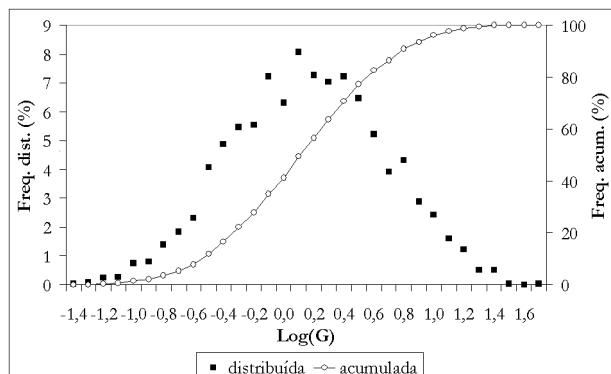


Figura 3 – Distribuição de log(G).

Da análise dos dados separados por períodos, percebe-se que a amplitude dos valores de G é bem menor nos meses mais secos, conforme indicado na tabela 1. Os valores de G variaram na faixa de 0 até 44,7. Observa-se porém que, para qualquer período analisado, a maior parte deles estão abaixo de 10. A amplitude da faixa de pico varia de 0,25 à 4. Observa-se que, embora tenham sido encontrados valores de G extremamente altos, a faixa de pico e o comportamento geral deste índice está coerente com a literatura.

Tabela 1 - Tabela Resumo de Resultados.

Equação – período (meses de 1995)	Amplitude G	G(90%)	G(1%)	% (G=0,1)	% (G=0,2)	% (G=10)	% (G=5)	Amplitude G(Pico)
M P – Jan -Fev	0 – 44,7	7,9	0,085	1,7	5,16	93,4	81	0,8 – 4
M P Jun – Jul -Ago	0 – 9,7	2,5	0,15	-	5,1	100-	97	0,25 -1,6
M P – completo	0 – 44,7	6,0	0,09	1,4	5,5	96	86,4	0,8 - 3,16
Antonio – Jan -Fev	0 – 30,5	8,1	0,15	1,5	4,9	93	81	1 - 4
Antonio – Jun – Jul –Ago	0 – 10,1	2,7	0,16	0,7	5,2	100-	96,3	0,25 - 2

G(x%) – x % dos valores de G são inferiores ao valor indicado. % (G=x) - % dos valores inferiores a G = x G(Pico) – faixa de valores de G mais freqüentes.

Foi utilizado o SIG (Sistema de Informação Geográfico) Spring (© Inpe) para visualização e execução de algumas técnicas de interpolação. Quando a técnica de interpolação desejada não estava disponível no *software*, foram escritos programas em Visual BASIC, e a grade interpolada nele gerada foi importada para o Spring, para visualização e comparação. As técnicas de interpolação utilizadas para composição de campos de precipitação e as respectivas ferramentas são as seguintes:

- Interpolação linear (IL) – Spring;
- Média simples (MS): média simples dos oito postos mais próximos – Spring;
- Média ponderada (ID): média ponderada dos oito postos mais próximos, admitindo como peso o inverso da distância – Spring;
- Média ponderada por quadrante (MPQ): repete o procedimento anterior por quadrante, depois faz a média simples dos quatro quadrantes – Spring;
- Média ponderada (IQD): média ponderada dos oito postos mais próximos, admitindo como peso o inverso do quadrado da distância – Visual BASIC;
- Método de Costa e Righetto (C) – Visual BASIC.

Nas técnicas baseadas apenas na rede pluviométrica, o cálculo foi feito *pixel a pixel*, cada qual com 1 km de lado.

Inicialmente foram usadas duas equações de radar:

- Marshall Palmer (R-MP) – $Z = 200R^{1,6}$
- Antonio (R-A) – $Z = 316R^{1,34}$

O resultado final corresponde à chuva em milímetros acumulada em área de 1 km². Por coerência com os dados da rede pluviométrica, a unidade temporal de trabalho utilizada foi o dia. Os dados fornecidos pelo IPMet foram reorganizados para representar o mesmo período diário dos dados pluviométricos (coleta às 7 horas).

- Método de Brandes (B): foram adotados os seguintes critérios: EP =500 – o que significa que na primeira interação, foram considerados os pluviômetros com distâncias inferiores a 58,77 km e, na segunda, somente aqueles com distâncias inferiores a 41,55 km do *pixel* analisado. Se, na primeira interação não existisse pluviômetro à distância inferior a 58,77 km do *pixel* analisado, o dado original do radar era mantido.

Quando existiam pluviômetros para fazer a primeira interação, mas não a segunda, manteve-se o valor da correção da primeira interação. No cálculo do índice G, situações com registro pluviométrico e de radar inferiores à 2,5 mm não foram considerados, conforme indicação do autor Brandes (1975), pois podem distorcer muito os resultados.

- Método de Koistinen e Puhakka (KP): para fazer a correção em função da distância entre o ponto e o radar, foram feitas curvas de regressão para as duas equações de radar e todos os períodos analisados. Observou-se que os coeficientes de correlação são muito baixos em todas as situações. Este comportamento corrobora as afirmações encontradas na literatura sobre a ausência de relação entre as observações de radar e a

distância nos radares banda S. Optou-se por usar a reta de regressão obtida pela equação de Marshall-Palmer para todo o ano de 1995, por compreender uma amostra maior de dados.

Quanto ao parâmetro ra , seguiu-se a orientação proposta na metodologia: para o período de janeiro e fevereiro, usou-se o valor relativo à chuva convectiva ($ra = 10 \text{ km}$) e, no outro período, o de chuvas frontais ($ra = 40 \text{ km}$).

Tanto no método de Brandes como no método de Koistinen e Puhakka, foram testadas as duas equações de radar: Marshall-Palmer e Antonio (B-MP, B-A, K-MP, K-A). Os resultados foram comparados entre si, utilizando os seguintes recursos:

- Retirada de 6 estações e verificação da eficiência do método em simular o valor pontual medido;
- Volume total precipitado em uma área; e
- Análise visual de isoetas no SIG Spring.

A escolha das estações eliminadas considerou um critério de abrangência espacial e privilegiou pares de estações bastante próximas, de forma que, num raio de 2,5 km da estação eliminada, existisse outra estação que compusesse a rede de amostragem. As estações retiradas estão indicadas na figura 2.

Primeiramente foi analisada a capacidade dos métodos de estimar a chuva pontual. Dessa forma, para o período de janeiro e fevereiro foi comparado o valor da chuva gerado pelos diversos métodos com o valor real (valor dos seis pluviômetros retirados da análise).

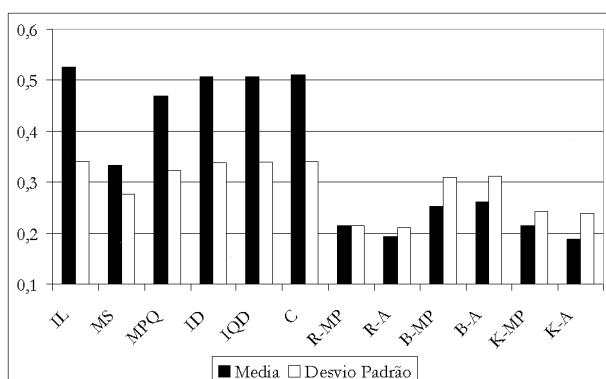


Figura 4 – Coeficientes de correlação espacial jan/fev-95.

Foram feitos dois estudos de correlação entre os resultados medidos e estimados. No primeiro, chamado de estudo de correlação espacial, analisou-se, para cada dia, a correlação entre os dados estimados pelos métodos de interpolação e os valores medidos nos 6 pluviômetros eliminados. Desta forma, existiam seis pontos para a determinação dos coeficientes de correlação diárias. Apresenta-se na figura 4, o coeficiente de correlação médio e seu desvio-padrão, calculado a partir de 2 meses de dados (59 dias).

Os resultados indicam que nenhum dos métodos é eficiente para a estimativa pontual da chuva. Os melhores coeficientes foram da ordem de 0,5. Os resultados podem ser agrupados em três faixas:

- Métodos baseados somente nos pluviômetros: apresentam os melhores coeficientes de correlação. Dentre eles, o método da média simples foi o que apresentou o pior resultado;
- Somente radar: apresentam os piores resultados;
- Métodos mistos: os resultados ainda podem ser separados em dois sub-grupos: método de Brandes e Koistinen e Puhakka, com os últimos tendo apresentado resultados ligeiramente inferiores.

Os desvios-padrão dos coeficientes de correlação dos métodos baseados nos dados de radar são muito elevados, o que indica um comportamento bastante variável na eficiência da estimativa.

Essa forma de análise foi estendida para o período de estiagem. Observou-se uma leve queda nos coeficientes dos métodos baseados em pluviômetros (0,4) e um aumento no desvio-padrão para todos os métodos. Ressalta-se o baixo número de dias de chuva no período, com registros de radar em apenas 5 dias e 10 dias nos pluviômetros. A análise indica que os métodos de composição de campos de chuva não são adequados para estimar o seu valor pontual. O tamanho da série utilizada é certamente uma das causas dos baixos coeficientes de correlação, pois um dado discrepante na série tem um impacto significativo.

Ainda na comparação pontual de valores, foi feita uma análise temporal. Os dados foram organizados por posto e, para cada método, foi calculado o coeficiente de correlação entre os

valores estimados e os medidos. Cada coeficiente de correlação foi calculado a partir de 59 pares de dados. A diferença entre as duas análises é que na primeira (análise espacial) o cálculo de correlação é feito a partir de seis pares de pontos, obtendo-se 59 valores de coeficientes de correlação, e apresentou-se sua média e desvio-padrão. Na segunda análise, para cada posto e método existe apenas um coeficiente de correlação calculado para os 59 pares de dados, e a média apresentada ao final corresponde à média dessas seis estações.

A segunda análise, aplicada aos meses de janeiro e fevereiro de 1995, mostra uma melhor capacidade de estimativa para os métodos baseados em pluviômetros. Quando os dados de radar são introduzidos, os coeficientes de correlação diminuem. De modo geral, o radar apresenta os piores resultados e os métodos compostos melhoraram os coeficientes de correlação (figura 5).

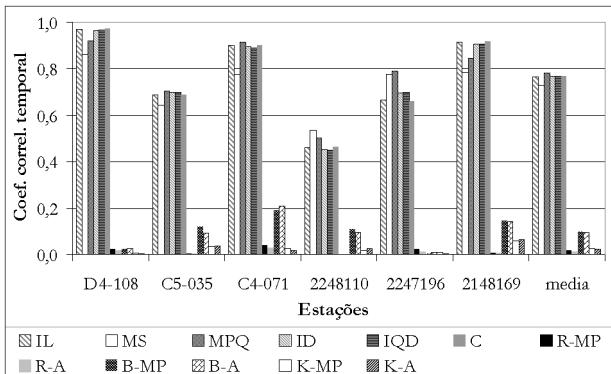


Figura 5 – Coeficientes de correlação temporal jan/fev-95.

Essa análise também foi estendida para o período de estiagem, com a eliminação dos métodos considerados redundantes. A tendência geral manteve-se: correlação boa para campos gerados por pluviômetros e ruins para os que utilizam os dados de radar. Observa-se, porém, que os coeficientes de correlação do radar têm a mesma ordem de grandeza dos métodos compostos e, para algumas estações, apresentam valores superiores (figura 6).

Como comportamento peculiar, destaca-se a estação 2248110, que apresenta os coeficientes de correlação mais baixos para os métodos de pluviômetro, e a estação C4-071, no período seco, que apresenta os piores coeficientes de correlação para os métodos compostos e de radar. O

comportamento das estações parece não guardar relação com seu posicionamento.

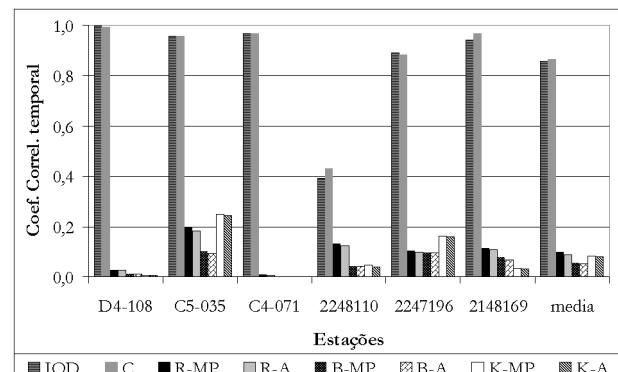


Figura 6 – Coeficientes de correlação temporal jun/ago-95.

Esses estudos indicam que a estimativa de valores pontuais de chuva é mais eficiente quando se utilizam métodos baseados apenas em pluviômetros. Entretanto, deve-se fazer a ressalva que se considera, como dados verdadeiros, os valores medidos em pluviômetros.

A partir desse estudo preliminar foram constatadas a semelhança dos resultados de radar e a redundância de trabalhar com as duas equações. Optou-se então por seguir usando apenas a equação clássica de Marshall-Palmer. Da mesma forma, para os métodos baseados em pluviômetros, o estudo segue usando o método Costa e o IQD.

Os algoritmos mistos induzem à super correlação, tanto a maior como a menor, dependendo da relação G das estações que participam do cálculo. No caso de minoração, existe um evidente limitador inferior que é a chuva nula. Quando o algoritmo sugeria correções que indicassem chuva negativa, optou-se por manter o registro de radar inalterado.

Quando o valor de G é alto, isto é, quando o registro pluviométrico de uma ou mais estações consideradas no cálculo indicam valores muito superiores aos do radar, os valores corrigidos resultam em chuvas muito elevadas (da ordem de centenas de milímetros). Para evitar estes inconvenientes, foi proposta uma modificação no algoritmo original restringindo os valores de G. Trabalha-se com valores superiores a 0,1 e inferiores à 10; quando G não atende esta condição, o posto pluviométrico é desconsiderado. Verifica-se na tabela 1 que os valores que ficam fora dessa faixa são da ordem de 5%. Os campos de precipitação compostos desta forma receberam o nome de B-MP10 e KP-MP10.

Analisaram-se, de forma preliminar, os volumes diários de chuva, os volumes acumulados e os máximos pontuais na bacia para os meses de janeiro e fevereiro de 1995.

Existem dias em que os pluviômetros registram um grande volume de chuva e o radar um valor significativamente menor, e vice-versa. Os métodos compostos parecem apresentar um comportamento intermediário, porém, em alguns dias, apresentam picos mais elevados que os dos outros dois métodos (figura 7).

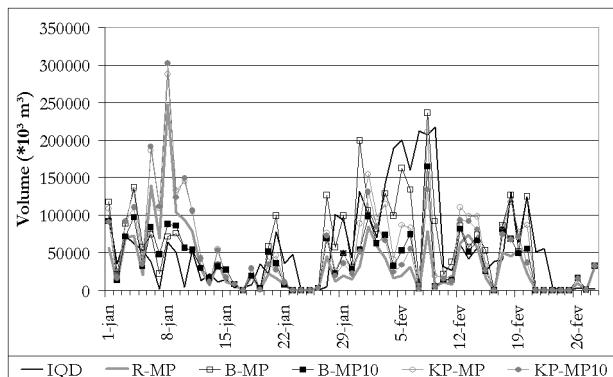


Figura 7 – Volume diário de chuva.

Organizou-se um gráfico de dupla acumulação das alturas de chuva. Todos os métodos foram plotados em função do método de interpolação linear (figura 8). Observa-se que o radar fornece os menores valores, seguidos pelo método de Brandes, com restrição. Há acentuadas mudanças na inflexão das curvas dos métodos baseados no radar, o que indica que o comportamento não é constante. Os métodos IQD e Costa, seguem praticamente uma reta com inclinação de 45°.

Na figura 9, indicam-se os maiores valores pontuais de precipitação encontrados na bacia, isto é, a máxima chuva diária encontrada em um *pixel* da bacia. A chuva máxima indicada não corresponde necessariamente ao mesmo *pixel* para cada método.

Para os métodos baseados apenas nos pluviômetros, os valores máximos são inferiores a 150 mm. Para os dados de radar, os valores máximos são da ordem de 120 mm e os valores máximos alcançados pelos métodos compostos chegam a 400 mm. A explicação para estes valores exagerados pode ser obtida pela análise do dia 27 de janeiro. Nesse dia os campos de radar e pluviômetros são parecidos, ambos indicam dois núcleos de chuvas em áreas próximas, mas não exatamente coincidentes. A distância entre os núcleos de chuva

nos campos gerados por radar e pluviômetro é de 14 km. O valor elevado de chuva do pluviômetro em uma região de chuva não tão intensa no radar força o surgimento de um fator de correção elevado, da ordem de 9. Quando esse fator é aplicado no núcleo de chuva elevado do radar, surgem valores de chuva em *pixels* da ordem de 400 mm.

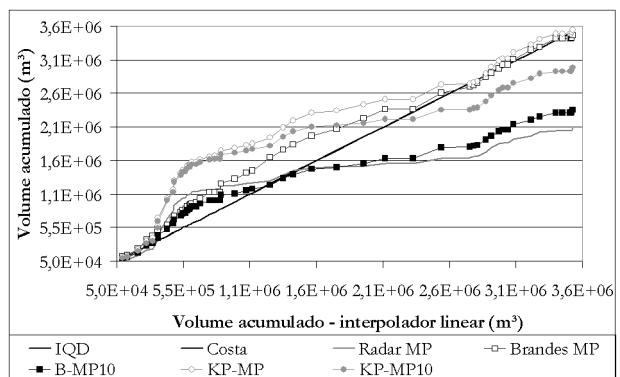


Figura 8 – Dupla acumulação.

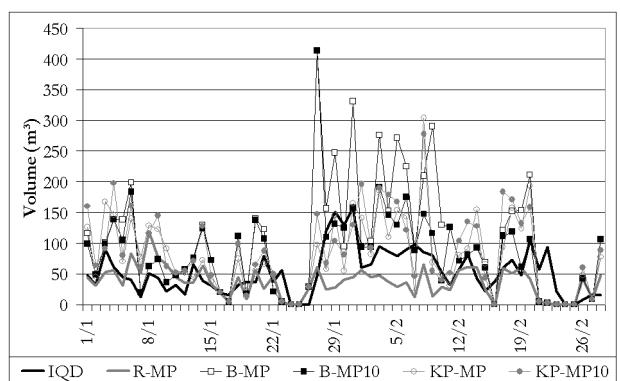


Figura 9 – Valores máximos pontuais.

Da análise visual das isoetas diárias feitas por meio do software Spring, verificou-se que os campos de precipitação não apresentam um comportamento constante. Alguns dias os campos são semelhantes, em outros muito diferentes. Normalmente o pluviômetro indica chuvas mais intensas, porém encontra-se também a situação inversa. De um modo geral o radar apresenta um campo de precipitações bem mais disperso, com núcleos menos definidos que os métodos derivados dos pluviômetros. Os campos de radar apresentam círculos concêntricos com centro no radar, a distâncias fixas: são resultantes da composição dos campos na integração do CAPPI e são reproduzidos também nos campos compostos.

Os campos gerados com base em dados pluviométricos são muito parecidos entre si e o método do IQD apresenta sempre as isoletas mais arredondadas.

Os campos gerados pelas técnicas de integração dos dados reproduzem a forma do campo de radar, com trechos intensificados ou atenuados. O método de Brandes é mais influenciado pelos pluviômetros e quando usado sem limitação tende a fazer correções superestimadas. A introdução dos limites atenua as correções e faz com que o campo permaneça mais parecido com os valores de radar, o que faz sentido, pois os limites foram introduzidos no sentido de diminuir a influência de pluviômetros, quando eles apresentam um valor muito discrepante do radar. Os campos gerados pelo método Koistinen e Puhakka são mais fiéis, quantitativa e qualitativamente, ao campo de radar.

Os métodos de ajuste não apresentam sempre o mesmo padrão de comportamento. Em alguns dias com registros parecidos, os métodos compostos acentuam as diferenças e em outros fornecem valores intermediários. Em alguns dias com campos muito discordantes entre pluviômetros e radar, os métodos não modificaram significativamente os campos de radar.

CONCLUSÕES

Os índices de G (razão entre a medida pluviométrica e a do radar) obtidos no trabalho são coerentes com os valores indicados na bibliografia, embora tenham sido encontrados valores extremos maiores.

Observa-se pelos resultados apresentados que os métodos de composição de campo de precipitação baseados em instrumentos de coleta diferentes não fornecem valores pontuais semelhantes e que nem sempre as técnicas compostas tendem a fornecer valores intermediários.

A comparação de volumes mostra um comportamento diário não homogêneo; a curva de dupla acumulação indica a tendência relatada na bibliografia, do radar subestimar, e os métodos compostos indicam um volume precipitado semelhante ao do método baseado em pluviômetros no final do período estudado (janeiro e fevereiro).

A ambigüidade observada na revisão bibliográfica sobre a conveniência de usar o fator G para ajuste do campo de radar pode ser observada

na análise das isoletas diárias e no gráfico de máximos apresentados: em alguns dias as ajustes aproximam os resultados e em outros geram valores exagerados. Dessa forma é interessante analisar o comportamento dos métodos compostos com maior restrição de G.

AGRADECIMENTO

Ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas da UNESP – IPMet, pelo acesso aos dados do radar. Aos revisores, pelas sugestões e correções apresentadas.

REFERÊNCIAS

- ANTONIO, M. A (1998) *Técnica de ajuste em tempo real de medida de chuva com radar*. Botucatu, SP, tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, 156 p.
- AUSTIN, P. M. (1987) Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. *Monthly Weather Review*. v. 115, maio, p. 1053-1071.
- BARGE, B. L. et al.. (1979) Rainfall measurements by weather radar: applications to hydrology. *Water Resour. Res.* v. 15, n. 6, p. 1380-1386.
- BARNSTON, A. G.; THOMAS, J. L. (1983) Rainfall measurement accuracy in FACE: a comparison of gage and radar rainfalls. *J. Climate and Appl. Meteor.* v. 22, p. 2038-2052.
- BARNSTON A. G. (1991) An empirical method of estimating raingage and radar rainfall measurement bias and resolution. *J. Appl. Meteor.* v. 30, p. 282-296.
- BRAGA JR., B.; MASSAMBANI, O. (ed.) (1997) Weather radar technology for water resources management. São Paulo, IRTCUD/USP, IHP-UNESCO. Disponível em: <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/radar/content.html>. Último acesso: 30/06/2005.
- BRANDES, E. A. (1975) Optimizing rainfall estimates with the aid of radar. *J. Appl. Meteor.* v.14, n. 7, p. 1339-1345.
- CALHEIROS, R. V. (1982) *Resolução espacial de estimativas de precipitação com radar hidrometeorológico*. São Carlos, SP, tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento, EESC-USP, 229 p.
- COLLIER, C. G. (1986 b) Accuracy of rainfall estimates by radar, part II: comparison with raingauge network. *J. Hydrology*, v. 83, p. 225-235.

- COSTA., A. R.; RIGHETTO, A M. (1987) Algoritmo para determinação de uma distribuição da precipitação sobre uma bacia hidrográfica. *Estudos*, v. 14, n. 3-4, p. 169-182.
- CREUTIN, J. D.; OBLED, C. (1982) - Objective analysis and mapping techniques for rainfall field: an objective comparison. *Water Resources Res.*, v. 18, n. 2, p. 413-431.
- DONZELLI, V.; MEZZASALMA, P. (1995) Measurement accuracy in raingauge-radar adjustment techniques. *Proc. Int. Symp. Hydrological Applications of Weather Radar*. São Paulo, p. 52-61.
- GOVONE, J. S. (1996) *Avaliação do desempenho da técnica de filtro de Kalman na estimativa de precipitação por radar meteorológico*. São Carlos, SP, tese de Doutorado. em Hidráulica e Saneamento, EESC-USP, 164 p.
- HILDEBRAND, P. H. et al. (1979) Measurement of convective mean rainfall over small areas using high-density raingauges and radar. *J. Appl. Meteor.*, v. 18, p. 1316-1326.
- JOSS, J.; WALDVOGEL, A. (1990) Precipitation Measurement and Hydrology. In: Atlas, D. (org.) *Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary of Radar Meteorology Conference*. American Meteorological Society. Boston, p. 577-601.
- KOISTINEN, J.; PUHAKKA, T. (1981) An improved spatial gauge-radar adjustment technique. 20th Conference on Radar Meteorology – Boston. *Proceedings...* pp. 179:186 apud GOVONE (1996)
- LIU C.; KRAJEWSKI, W. F. (1996) A comparison of methods for calculation of radar-rainfall hourly accumulations. *Water Resources Bull.* v. 32, n. 2, abril, p. 305-315.
- ROSSA, A. et al. (2005) *Use of radar observations in hydrological and NWP models* – COST 717 – Final Report. Disponível em: <http://www.smhi.se/cost717/doc.html>. Último acesso: 30/06/2005.
- SILVERMAN, B. A. et al. (1981) On the sampling variance of raingage networks. *J. Appl. Meteor.* v. 20, p. 1468-1478.
- SMITH, P. L. et al.. (1975) Derivation of an R-Z relationship by computer optimization and its use in measuring daily aerial rainfall. *Proc. 16th Radar Meteorology Conference*. p. 461-466.
- SMITH, P. L. (1990) – Precipitation Measurement and Hydrology: Panel Report In: Atlas, D. (org.) *Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th*

Anniversary of Radar Meteorology Conference. American Meteorological Society. Boston p. 607-618.

Precipitation Fields. Part I: Basic theory and preliminary studies

ABSTRACT

This article discusses the precipitation field composition using two data sources: rain gauges and radar. The main characteristics of the equipment are listed and some precipitation field compositions are presented. The relative point rain gage and radar values were confronted and compared with data in the literature. Preliminary tests with these methods were done to evaluate and select some of them for further studies presented in part II.

Key Words: precipitation fields, radar, rain gauge