

INUNDAÇÕES EM SÃO CARLOS, SP: AVALIAÇÃO DE CHUVAS COM RADAR

Mauricio de Agostinho Antonio¹
Juliana Pontes Machado de Andrade²

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP
Instituto de Pesquisas Meteorológicas – IPMet
Caixa Postal 180 – 17096-370 – Bauru – SP, Brasil
mauricio@ipmet.unesp.br

²Universidade de São Paulo – USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
Departamento de Hidráulica e Saneamento – SHS
Caixa Postal 359 – 13560-970 – São Carlos – SP, Brasil
jupontes@sc.usp.br

ABSTRACT. This work presents three flood events in the urban catchment of the Gregorio creek basin in São Carlos, SP, and the rain evaluation of rain estimated by the Bauru weather radar. The radar rain quantification was made using a Z-R relationship derived from radar reflectivity and total rain from raingage, in these flood cases. Another radar rain quantification for those days was made using the classical Marshall-Palmer (M-P) Z-R relationship. Differences less than 5% between raingage and radar data for the first equation, and around 80% using the M-P equation, do recommend using a specific Z-R relationship for individual situations. The rain data from radar monitoring as input in flood forecast models can help the anticipation of flood episodes, to facilitate short-term warnings.

Palavras-Chave: remote sensing, hydrometeorology, weather radar, rain, sensoriamento remoto, chuva, radar meteorológico, hidrometeorologia.

1. Introdução e objetivos

A cidade de São Carlos, SP, durante o período de verão, observa alguns eventos de inundação e alagamentos em sua área central. O córrego do Gregório possui grande parte de sua bacia hidrográfica situada na área urbana, na qual está incluído o centro comercial do Município, em situações de chuvas mais severas, deixa sua calha, canalizada naquele trecho, e inunda avenidas e ruas ribeirinhas, onde as edificações mais próximas também sofrem prejuízos.

Com a evolução da urbanização, desde a década de 1940 vários episódios de inundações foram relatados e têm sido objeto de estudo de vários pesquisadores (Mendes, 2005).

Com o início da utilização de radares meteorológicos no Estado de São Paulo a partir da metade dos anos 1970, vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos para uma efetiva utilização do radar como instrumento de quantificação de precipitação em área (Antonio e Calheiros, 1985). Essa informação é de primeira importância na avaliação nas ocorrências de inundações.

Dentre 9 casos de grandes cheias verificadas no centro de São Carlos entre o período de janeiro/2004 e dezembro/2005, ocorridas entre os meses de novembro e março, período em que se registram a maioria dos eventos, foram selecionados 3 casos como modelo entre os eventos mais severos onde se dispunham de dados pluviométricos de uma estação da área, e dados do radar meteorológico de Bauru.

O objetivo do presente trabalho é avaliar a eficácia do radar no monitoramento quantificação da precipitação àquela distância de São Carlos, e também a validade da equação Z-R instalada e em uso no sistema de radar do IPMet.

As correlações entre os dados coletados pelos dois equipamentos, durante os períodos das chuvas que provocaram as cheias, levaram a uma relação Z-R específica para tais casos. Os

processamentos dos dados de refletividade de radar (Z) com a equação Z-R obtida dos eventos de cheias, determinaram valores de intensidade de precipitação (R) para cada varredura volumétrica efetuada. Com estas informações convertidas do radar, sobre a localização do pluviômetro, foi possível estabelecer o pluviograma de cada um dos casos de precipitação, e compará-los com os dados de superfície, com diminuição da dispersão.

Também, foi determinado o pluviograma resultante do uso da equação Z-R de Marshall-Palmer (1948), que subestimou a chuva comparada com o pluviômetro. Isso confirma a necessidade de se dispor de uma equação Z-R específica local ou para cada intervalo de distância (Calheiros e Zawadzki, 1986; Antonio, 1995), o que permite o uso do radar para o estabelecimento do campo espacial da precipitação. Tal campo, indicativo de chuva em áreas, poderia ser utilizado nos modelos de previsão de vazões em canais, córregos, ou rios, essencial para avaliações de casos de enchentes urbanas (Antonio, 2006) e para a implantação de programas de alerta de inundação (Mendonço, 2005).

2. Características da área de estudo

A bacia do Gregório está situada dentro do perímetro urbano da cidade de São Carlos/SP. O trecho da bacia utilizado para seleção dos casos de inundação, que vai até a região urbana central, tem cerca de 10 km². É junto ao Fórum Municipal, no exutório do trecho considerado da bacia, região com o córrego confinado em um canal aberto, onde se mantém instalada a estação pluvio-fluviométrica PCD01 que registra o nível da lâmina d'água no córrego e precipitação. Os níveis de alerta obtidos a partir de dados experimentais, indicam que para a região da bacia considerada, vazões superiores a 20 m³/s são caracterizadas como vazões altas (Mendonço, 2005). A ocupação do solo da bacia é de cerca de 40% com urbanização e 60% de área aberta, sem urbanização (Almeida Neto et al., 2004); a bacia tem um tempo de concentração da ordem de 45 minutos (Andrade, 2006).

O pluviômetro utilizado para coleta de dados, está instalado na estação climatológica PCD02 localizada na Faculdade de Direito de São Carlos – FADISC – (22°01'07"S; 47°51'40"W), a uma distância de 125,8 km do radar meteorológico banda-S Doppler de Bauru. Os dados do pluviômetro (R), aqui considerados como “verdade terrestre” e originalmente coletados a cada 10 minutos, foram acumulados a cada 30 minutos (Andrade, 2006).

O radar meteorológico banda-S Doppler de Bauru (22°21'29,8"S; 49°01'39,9"W), tem feixe de 2°, monitora o espaço dentro do alcance de 450 km no modo vigilância, com resolução temporal de 15 minutos. No modo de quantificação de precipitação, a informação é atualizada a cada 7,5 minutos, dentro do alcance de 250 km, e tem resolução espacial de 1 km².

Os dados de radar utilizados na quantificação foram selecionados na altitude 3,5 km, na forma denominada CAPPI (Indicador de Posição no Plano a Altitude Constante), obtidos de uma varredura volumétrica da antena, onde as elevações são crescentes a cada 360°.

3. Eventos de precipitação com inundação

As estações da bacia do Gregório apresentaram os seguintes registros nos eventos citados:

Data	Nível (m)	PCD01 – vazão				PCD02 – precipitação			
		Q _{max} (m ³ /s)	Horário		P _{total} (mm)	Horário		Duração (h)	
			Q _{max}	Início	Fim		Início	Fim	
30/01/2004	2,770	57,14	17:10	16:20	18:20	45,6	16:30	17:30	01:00
19/12/2004	2,628	48,90	19:00	18:20	20:20	48,8	18:10	20:20	02:10
04/01/2005	2,056	23,70	17:00	16:30	19:20	43,3	15:50	20:10	04:20

No dia 30/01/2004, as observações do radar de Bauru mostravam a presença de células isoladas de precipitação distribuídas no estado de São Paulo, com deslocamento praticamente N-S. As análises sinóticas indicavam a presença do ramo quente de uma frente a Oeste de São Paulo, do Paraná ao Mato Grosso do Sul e Paraguai, que induzia a formação de convecção sobre São Paulo, em áreas de baixas pressões. A célula de precipitação que atingiu São Carlos se formou a partir das 15:30 h a cerca de 40-50 km na direção NNE da cidade. Sua expansão e deslocamento fez com que atingisse São Carlos a partir das 16:16 h, já com refletividade da ordem de 23 dBZ. A intensidade da refletividade foi aumentando, tendo atingido o máximo de 44,2 dBZ sobre a estação 2 (PCD02) às 16:31 h. Até a observação de 16:53 h, as refletividades sobre o posto foram superiores a 38 dBZ, quando passou a declinar, tendo a última indicação de refletividade sobre o posto às 17:23 h, com 20 dBZ. Nessa célula verificou-se refletividade superior a 50 dBZ, porém à distância de 10 km do centro de São Carlos, na direção NE. Depois de algum tempo, a célula de precipitação se dissipou ao Sul da cidade. Essa precipitação foi a que provocou a maior inundação no período 2004-2005. A Figura 1 apresenta a imagem do radar de Bauru com dados de refletividade para 16:23 h do dia 30, com alcance 240 km, e um detalhe da área de São Carlos, do horário de 16:16 h.

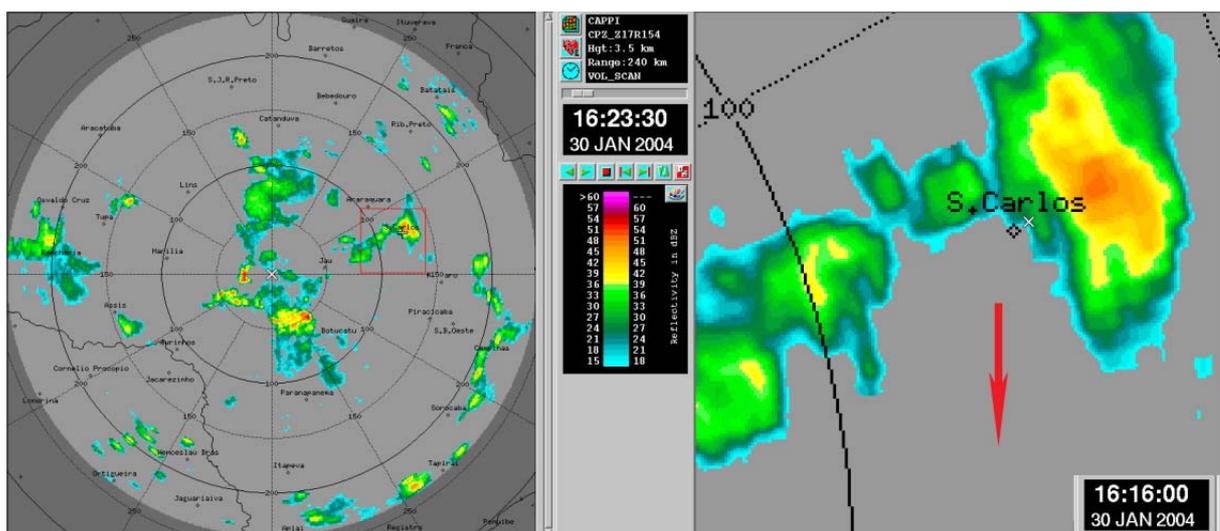


Figura 1. Imagens de refletividade do radar de Bauru na forma CAPPI de 3,5 km, obtidas em 30/01/2004; à esquerda, ecos de radar no alcance de 240 km, às 16:23 h; à direita: ampliação da área de São Carlos às 16:16 h, conforme destacado na imagem da esquerda. Anéis indicam distâncias de 50 km. A cruz identifica o posto PCD02 (estação 2). Precipitação convectiva – deslocamento aproximado N-S, conforme indicado pela seta.

As observações do radar de Bauru no dia 19/12/2004, mostravam, desde o início da tarde, a presença de núcleos isolados de precipitação em todo o Estado de São Paulo, com características de atividade convectiva. As análises sinóticas não indicavam a presença de sistemas frontais atuando na região. A célula de chuva que atingiu a cidade de São Carlos originou-se ao Sul do município, às 17:30 h, e gradativamente foi se expandindo com um leve deslocamento para N. Os valores de refletividade de radar observados sobre a estação 2 (PCD02), na primeira hora de registro, estiveram entre 32 dBZ e 38 dBZ (às 18:46 h); no restante do período os valores de refletividade não superaram 26 dBZ (às 19:16 h). A partir das 20:23 h, a célula precipitante começou a deslocar-se para NE, diminuindo de intensidade, deixando a região de São Carlos, e imergindo numa estrutura precipitante maior que atuava

sobre a região de Ribeirão Preto, mais ao Norte. Os dados de radar foram coletados a cada 7,5 minutos. A Figura 2 apresenta imagem do radar de Bauru com refletividade no horário das 18:46 h, desse dia 19, no raio de 240 km, e um detalhe dos ecos ao redor de São Carlos.

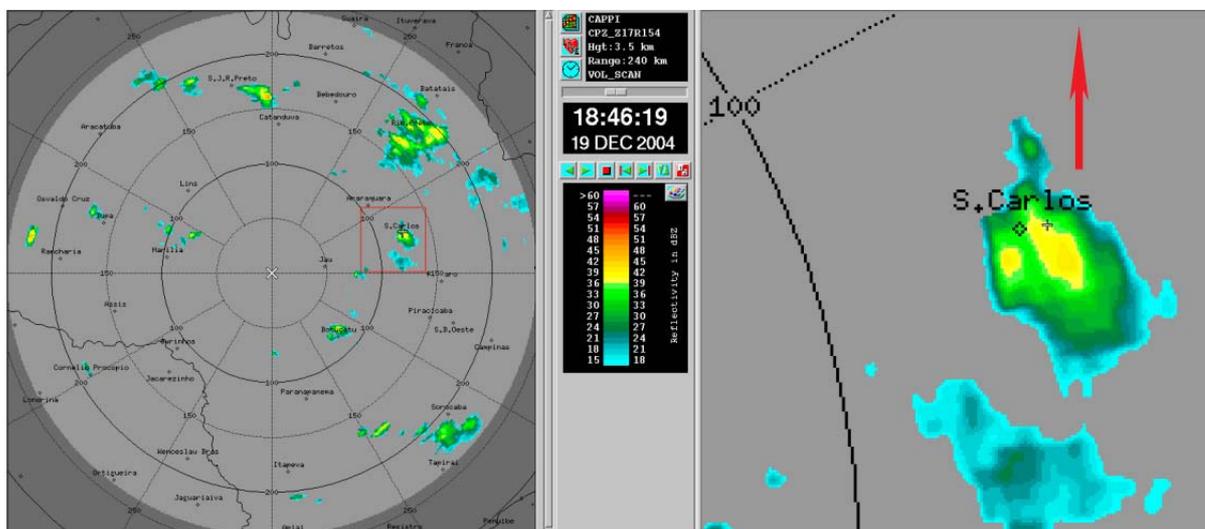


Figura 2. Imagens de refletividade do radar de Bauru na forma CAPPI de 3,5 km, obtidas em 19/12/2004; à esquerda: os ecos de radar no alcance de 240 km, às 18:46 h; à direita: ampliação da área ao redor de São Carlos, conforme destacado na imagem da esquerda. Anéis indicam distâncias de 50 km. A cruz identifica o posto PCD02 (estação 2). Precipitação convectiva – deslocamento aproximado S-N, conforme indicado pela seta.

Na tarde de 04/01/2005, as observações do radar de Bauru identificavam a ocorrência de uma banda precipitante no setor NE do Estado de São Paulo, associada com um sistema frontal na região, e que já havia anteriormente provocado alguma precipitação sobre a cidade de São Carlos. Os valores de refletividade de radar, no geral, eram da ordem de 20 dBZ a 28 dBZ, com alguns núcleos imersos com máximos de refletividade na faixa 40-45 dBZ. Sobre a estação pluviométrica PCD02 os valores de refletividade maiores que 30 dBZ foram observados às 16:46 h (38,2 dBZ – o máximo), 17:01 h (33 dBZ) e às 19:31 h (32 dBZ). O conjunto de células precipitantes da banda de precipitação tinha deslocamento NW-SE e atuou sobre a região de São Carlos entre 16:30 h e 20:00 h. Os dados de radar, entretanto, foram coletados com intervalo de 15 minutos. A Figura 3 apresenta a imagem do radar de Bauru para o horário das 17:01 h, desse dia 04, com dados de refletividade com alcance 240 km, e um detalhe da área de São Carlos, do horário de 16:31 h.

4. Correlação entre dados de radar e pluviômetro

Os pares de dados de refletividade de radar de Bauru e do pluviômetro PCD02 de São Carlos coletados dentro do intervalo de acumulação dos dados de chuva medidos no solo (30 minutos), considerados constantes nos intervalos, foram correlacionados, e o resultado obtido está apresentado na Fig. 4.a. O coeficiente R^2 obtido na correlação, 0,6484, indica um razoável ajuste entre os dados. A equação Z-R obtida do conjunto de dados é: $Z = 17 R^{1,54}$.

Com o uso dessa equação Z-R encontrada nesses casos de enchentes, os dados de refletividade do radar de Bauru, foram convertidos em intensidades de precipitação e processados sobre o período de duração das chuvas dos eventos estudados. Considerando-se os intervalos de tempo de coleta de dados do radar, os dados de intensidade foram

acumulados para o tempo de 30 minutos, coincidente com o tempo de integração dos dados de superfície. Daí, sobre o posto PCD02 (estação 2), foram estabelecidos pares de dados de precipitação acumulada pelo radar a partir da intensidade de precipitação, considerada constante no intervalo de tempo entre duas varreduras consecutivas, e os valores medidos no solo, sendo que os valores correlacionados apresentaram um coeficiente R^2 igual a 0,8995, indicando um bom ajuste entre os pontos, conforme a Fig. 4. b, com uma diminuição da dispersão dos pontos representativos dos pares de dados de chuva.

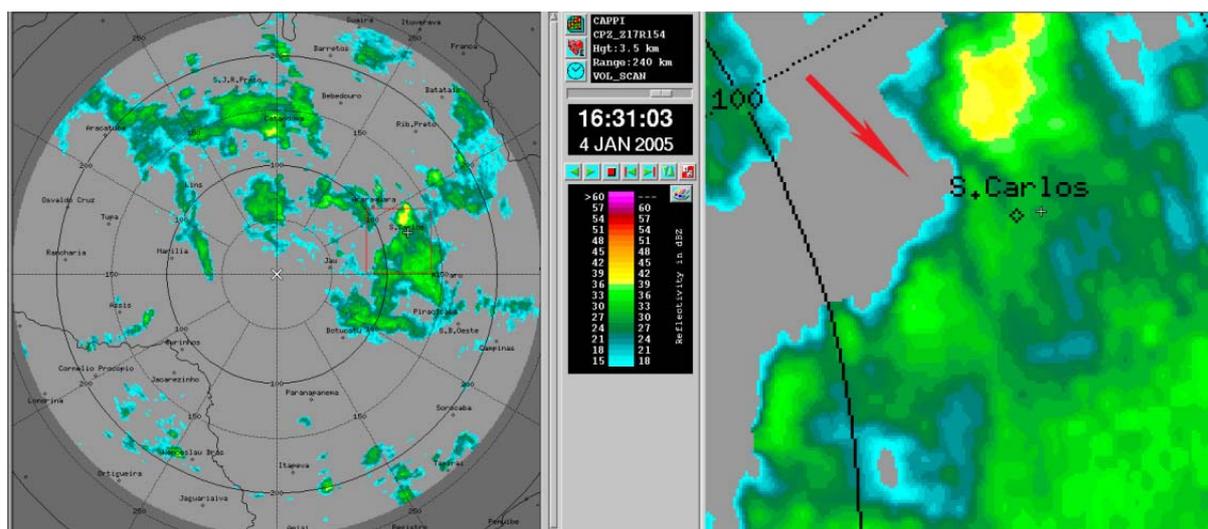


Figura 3. Imagens de refletividade do radar de Bauru na forma CAPPI de 3,5 km, obtidas em 04/01/2005; à esquerda: ecos de radar no alcance de 240 km, às 16:31 h; à direita: ampliação da área ao redor de São Carlos, conforme destacado na imagem da esquerda. Anéis indicam distâncias de 50 km. A cruz identifica o posto PCD02 (estação 2). Banda precipitante – deslocamento aproximado NW-SE, conforme indicado pela seta.

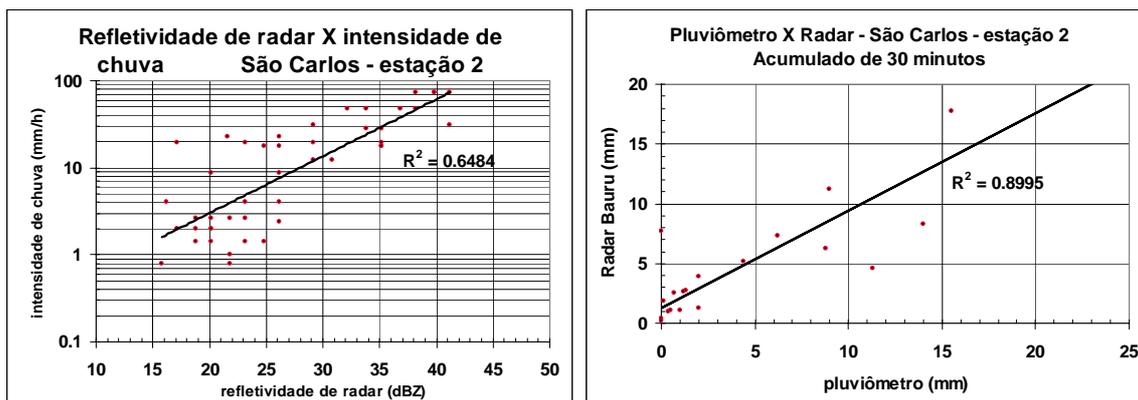


Figura 4. Correlações entre os valores de precipitação obtidos com o radar de Bauru e o pluviômetro PCD02 de São Carlos, nas inundações de 30/01/2004, 19/12/2004 e 04/01/2005. Fig. 4.a – (esquerda) Valores de refletividade versus intensidade de chuva. Equação Z-R resultante: $Z = 17 R^{1.54}$; Fig. 4.b – (direita) chuva acumulada de 30 minutos: pluviômetro versus radar.

A partir desses mesmos pares de dados de chuva sobre a estação 2 (posto PCD02) os pluviogramas correspondentes às precipitações dos três dias de grandes cheias, do

pluviômetro e do radar foram, então, determinados. As Fig. 5.a, 5.b e 5.c mostram os resultados obtidos.

Pode-se verificar nessas Figs. 5.a, 5.b e 5.c, entretanto, que os dados derivados do radar, ao final, superestimaram o montante de chuva medido em superfície, em dois dos casos. As diferenças entre as medidas da chuva total acumulada, com relação aos dados de superfície, podem ser verificadas na Tabela 1. Pelas curvas traçadas, vê-se que os pluviogramas do radar e do pluviômetro, nos casos avaliados, apresentam o mesmo comportamento, o que significa que ambos equipamentos mediram as variações das intensidades da chuva da mesma forma. As diferenças temporais observadas nas curvas decorrem dos diferentes intervalos de tempo entre as leituras com os dois equipamentos. No entanto, o radar também representou bem o início e o fim das precipitações e o comportamento geral da chuva.

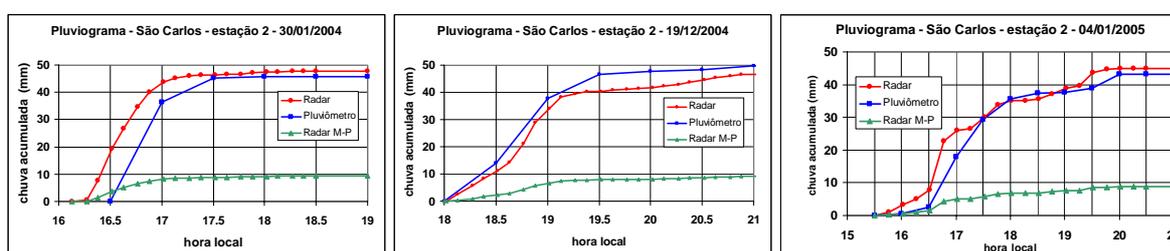


Figura 5. Pluviogramas representativos das chuvas que provocaram inundação em São Carlos/SP, obtidos do posto pluviométrico PCD02 (estação 2) e estimados pelo radar meteorológico de Bauru, conforme legenda. Fig. 5.a – (esquerda) Dia 30/01/2004; Fig. 5.b – (centro) Dia 19/12/2004; Fig. 5.c – (direita) Dia 04/01/2005.

Para um efeito de comparação, o procedimento de quantificação pelo radar foi também efetuado com a utilização da equação de Marshall-Palmer (1948), $Z = 200 R^{1,6}$, instalada no *software* residente do sistema de processamento do radar de Bauru, para tratamento automático dos dados. Os valores obtidos (Radar M-P) foram também inseridos nos pluviogramas das Figs. 5.a, 5.b e 5.c. As diferenças encontradas, quando comparadas com os resultados totalizados do pluviômetro foram sempre a menor, e podem também ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1. Valores acumulados de precipitação nos dias de inundação em São Carlos, SP. Dados de pluviômetro (estação 2 – PCD02), e estimativas do radar de Bauru derivadas das equações Radar ($Z=17 R^{1,54}$) e Radar M-P ($Z=200 R^{1,6}$), e respectivas diferenças com relação ao pluviômetro.

Data da Inundação	pluviômetro (mm)	Radar (mm)	diferença (%)	Radar M-P (mm)	diferença (%)
30/01/2004	45,6	47,6	4,4	9,4	79,4
19/12/2004	48,8	46,9	3,9	9,1	81,4
04/01/2005	43,3	45,0	3,9	8,8	79,7

5. Comentários e conclusões

As inundações que ocorreram na bacia do córrego do Gregório, em São Carlos, estão diretamente associadas à urbanização da área e à conseqüente retificação de seu curso e ocupação de suas várzeas com ruas e construções. Tais fatores aumentam o escoamento e

diminuem o tempo de concentração da bacia. O crescimento natural da cidade, portanto, torna mais frequentes a ocorrência desses eventos nos períodos chuvosos.

Os três episódios de grandes cheias avaliados ocorreram em situações meteorológicas distintas. Enquanto dois deles, em 30/01/2004 e 19/12/2004, foram decorrentes de sistemas convectivos que se iniciaram, desenvolveram-se e praticamente se dissiparam na região, o terceiro, em 04/01/2005, estava associado a uma banda precipitante que atuava em todo setor NE do Estado de São Paulo, em toda tarde daquela data. A quantidade total de chuva precipitada foi da mesma ordem de grandeza nos três episódios, e também a envergadura das inundações decorrentes, sendo maior a de 30/01/2004. A Figura 6 mostra aspecto da enchente desse dia 30 na região central da cidade de São Carlos.



Figura 6. Aspecto da inundação de 30/01/2004 na região central da cidade de São Carlos, SP. O gradil, à esquerda, delimita o canal do Córrego do Gregório; o prédio à direita, é do Mercado Municipal.

O cruzamento dos dados de radar sobre a estação 2 com os valores verificados na superfície, levou ao estabelecimento de uma relação Z-R determinada, que bem representou a precipitação acumulada nas três situações, quando comparados com os valores medidos na estação pluviométrica, onde as diferenças foram menores que 5%. O uso de uma relação Z-R clássica para quantificação por radar levou a uma sub-estimativa significativa dos totais precipitados, com diferenças atingindo mais de 81%. Isso reafirma a necessidade de se dispor de equações Z-R específicas, que incorporam o efeito da distância ao radar, e outras características, como a estação do ano ou o período do dia, entre outras, para a adequada representação do campo de chuva por radar.

As diferenças temporais observadas nos pluviogramas, onde as curvas derivadas do radar indicavam que a chuva “iniciou” antes do pluviômetro, são resultantes das diferenças de amostragem existente entre os dois equipamentos utilizados. Isto é, são decorrentes do fato da medida do radar ser realizada ainda na fase aérea da precipitação, aqui admitida como

sendo tomada na altitude de 3,5 km, quando a precipitação ainda não havia tocado o solo em seu início. Essa antecipação, normalmente, é apreciada no início do evento, quando o pluviômetro ainda não registra precipitação e o radar já mostra ecos de chuva sobre ele, sendo de mais difícil verificação durante a ocorrência da chuva sobre o ponto identificado. Esta situação de antecipação ficou bem evidenciada nos dias 30/01/2005 e 04/01/2005, quando a diferença temporal entre os pluviogramas do radar e pluviômetro foi superior àquela equivalente a uma varredura volumétrica do radar, isto é, 7,5 minutos.

Há, seguramente, que se apreciar com cuidado resultados comparativos de valores de radar em que se usam poucos pluviômetros de superfície, e, no caso, foi usado somente um.

O monitoramento contínuo por radar das precipitações que se deslocam para a área sujeita a inundação e que dispõe de modelo de previsão de vazão, permite antecipar a ocorrência dos eventos de cheia, com a emissão de alertas antecipados para precauções e providências de mitigação de seus efeitos.

O estudo deverá prosseguir com seleção de outros episódios de inundações significativas da cidade de São Carlos, a fim de se estabelecer a equação Z-R específica para a quantificação de precipitação por radar sobre a região, em eventos de grandes cheias.

Agradecimentos

Os autores Hermes A. G. França pelo processamento dos dados de radar, e Carlos A. A. Antonio pela organização das figuras, ambos do IPMet/UNESP.

Referências

- Almeida Neto, P., Esteves, R.L., Borges, A. C., Mendiondo, E. M. Análise dos componentes do balanço hídrico em uma bacia urbana experimental. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, 3, 2004, Goiânia. **Anais...**São Paulo: ABRH, 2004, CD-ROM.
- Andrade, J. P. M. **Previsão hidrometeorológica visando sistemas de alerta antecipado de cheias em bacias urbanas**. 2006. 99 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.
- Antonio, M. A. Z-R relationship range dependence. In: International Symposium on Hydrological Application of Weather Radars, 1995, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ABRH, 1995, p. 45-51.
- Antonio, M. A. Avaliação da chuva e inundação em Bauru em 25 de fevereiro de 2005. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 14, 2006, Florianópolis. (Submetido).
- Antonio, M. A., Calheiros, R. V. Método estatístico para obtenção de relações Z-R hidrológicas: uma verificação. **Revista Brasileira de Engenharia: Caderno de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3, p. 17-28, 1985.
- Calheiros, R.V., Zawadzki, I.I. Reflectivity Rain Rate Relationships for Radar Hydrology in Brazil. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 20, n.1, p. 118-132, 1987.
- Marshall, S., Palmer, McK. The distribution of raindrops with size. **J. Meteorology**, v.5, p. 165-166, 1948.
- Mendes, H.C. **Urbanização e Impactos Ambientais: Histórico das Inundações e Alagamentos na Bacia do Gregório, São Carlos – SP**. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.
- Mendondo, E. M. An overview on urban flood risk management. **Revista Minerva**, v. 2, n.2, p. 131-144. 2005.