

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

COMPARAÇÃO ENTRE IDFs GERADAS POR POSTOS PLUVIOMÉTRICOS E POR RADAR METEOROLÓGICO

André S.K.B. Sosnoski¹; Kleber L. Rocha²; Carlos A. Morales³ & Flavio Conde⁴

Abstract: This paper presents a comparative analysis of Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves derived from two distinct sources: traditional rain gauge stations and weather radar precipitation estimates. The study focuses on four critical urban catchments in São Paulo, Brazil: Aricancuva, Mandaqui, Jaguaré, and Pacaembu. The objective is to highlight the differences, advantages, and limitations of each data source for hydrological design and urban flood management. The methodology describes the generation of IDF curves from point-based historical rainfall series from rain gauges versus spatially distributed rainfall fields retrieval from polarimetric weather radar that required specific processing, including polarimetric adjustments and bias correction. The results indicate that radar-derived IDF curves show accumulated rainfall amounts that depend on the areas and durations used, with no specific patterns being identified. In contrast, the study suggests that with longer event durations, the effect of the spatial distribution, more faithfully described by radar, is mitigated, approaching the information provided by rain gauges. The discrepancies found have significant implications for the design of hydraulic structures and urban drainage systems, suggesting that the integration of radar data can lead to more resilient and safe infrastructure, better adapted to the spatial variability of extreme rainfall events in large metropolitan areas, specially in short duration events.

Resumo: Este artigo apresenta uma análise comparativa de curvas Intensidade-Duração-Freqüência (IDF) derivadas de duas fontes distintas: postos pluviométricos tradicionais e estimativas de precipitação por radar meteorológico. O estudo foca em quatro bacias hidrográficas urbanas críticas na cidade de São Paulo, Brasil: Aricanduva, Mandaqui, Jaguaré e Pacaembu. O objetivo é evidenciar as diferenças, vantagens e limitações de cada fonte de dados para o dimensionamento hidrológico e o gerenciamento de inundações urbanas. A metodologia descreve a geração das curvas IDF a partir de séries históricas de chuvas pontuais obtidas por postos pluviométricos versus campos de taxa de precipitação espacialmente distribuídos inferidos por um radar meteorológico de dupla polarização, que exigem processamento específico, incluindo ajustes com variáveis polarimétricas e correção de viés. Os resultados indicam que as curvas IDF derivadas do radar apresentam acumulados que dependem das áreas e durações utilizadas, sem padrões específicos sendo identificados. Em contrapartida, o estudo indica que com a maior duração dos eventos, o efeito da distribuição espacial descrita mais fielmente pelo radar é atenuado, se aproximando das informações fornecidas pelos pluviôme-

¹) Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, São Paulo, andre.sosnoski@fcth.br

²) Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, São Paulo, kleber@fcth.br

³) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - IAG USP, São Paulo, carlos.morales@iag.usp.br

⁴) Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, São Paulo, conde@fcth.br

tos. As discrepâncias encontradas têm implicações significativas para o projeto de obras hidráulicas e sistemas de drenagem urbana, sugerindo que a integração de dados de radar pode levar a uma infraestrutura mais resiliente e segura, mais bem adaptada à variabilidade espacial de eventos extremos de chuva em grandes metrópoles, principalmente as de curtas durações.

Palavras-Chave – Drenagem Urbana, Radar Meteorológico, Curvas I-D-F

1. Introdução

As curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) são ferramentas fundamentais na hidrologia, estabelecendo a relação entre a intensidade da precipitação, sua duração e a frequência com que um evento de determinada magnitude é esperado ocorrer, Chow et al. (1988). Em cidades e municípios densamente urbanizados como São Paulo, o dimensionamento da infraestrutura de drenagem depende da precisão dessas curvas para que o efeito desejado seja o mais próximo possível da realidade, reduzindo consequentemente os riscos de alagamentos e inundações Tucci (2012).

Tradicionalmente, as curvas IDF são geradas a partir de séries históricas de dados de postos pluviométricos. Embora confiáveis, esses instrumentos fornecem medições pontuais, que podem não capturar a variabilidade espacial da precipitação, especialmente em eventos de curta duração, que são os principais causadores das inundações repentinas em áreas urbanas Back, (2011).

Com o avanço do uso e precisão, os radares meteorológicos emergiram como uma fonte de dados complementar de grande valor. O radar oferece uma visão espacial e contínua da precipitação em alta resolução temporal e espacial, permitindo uma representação muito mais fiel da distribuição da chuva sobre as bacias hidrográficas. No entanto, a estimativa de precipitação por radar é indireta e suscetível a incertezas que exigem calibração e validação rigorosas com os dados coletados em solo, normalmente pluviômetros Joss & Waldvogel (1990).

Este artigo propõe uma análise comparativa entre as curvas IDF geradas por métodos tradicionais e aquelas derivadas de dados de radar para bacias urbanas representativas em São Paulo. O foco das comparações serão as bacias Aricanduva, Mandaqui, Jaguaré e Pacaembu, no entanto a análise se estenderá a 103 bacias do município de São Paulo. O objetivo é quantificar as diferenças e discutir as implicações práticas dessas duas abordagens para o planejamento e dimensionamento das estruturas de drenagem urbana.

2. Metodologia

A metodologia para a comparação das curvas IDF foi dividida em duas atividades principais. A primeira é a produção de IDFs para os postos pluviométricos dentro da área das quatro bacias hidrográficas de referência e para as demais bacias utiliza-se a curva extraída de fontes oficiais do DAEE-SP. A segunda atividade desenvolvida foi a produção das curvas IDF para os dados de precipitação estimados pelo radar meteorológico Doppler de Dupla Polarização da Agência de Águas do Estado de São Paulo (SPÁguas) antigo Departamento de Águas e Energia Elétrica

(DAEE). Para cada uma das bacias os valores foram estabelecidos a partir da média do somatório de todas as quadriculas do grid do radar meteorológico que intersectam as bacias.

2.1. Geração da curva IDF a partir de postos pluviométricos

Para a produção das curvas referentes aos dados pluviométricos, foram utilizados dados de séries históricas de postos pluviométricos operados pelo SPÁguas (antigo DAEE) e pelo Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas (CGE) da Prefeitura de São Paulo que fazem parte do Sistema de Alerta e Inundações do Estado de São Paulo (SAISP), Braga (1986) e Barros et.al. (1992). Neste estudo, foram utilizados 6 pluviômetros localizados dentro das 4 bacias para a medição de precipitação em superfície que estão localizados dentro ou no entorno imediato das bacias em estudo. Os pluviômetros são automáticos e dispõem de uma balança com resolução volumétrica de 0,2 mm de chuva e resolução temporal de 10 minutos. Para garantir a integridade dos dados selecionados e consistência, foi feita uma análise visual e manual.

A partir destas séries de dados consistidas, foram geradas séries de máximas anuais para precipitações de diferentes durações. Neste estudo, foram selecionadas as durações de 60 (1 hora) e 1440 minutos (1 dia). A seleção destas durações está relacionada com precipitações que mais frequentemente causam inundações (1 hora ou 60 min) e aquelas que estão associadas com eventos extremos de longa duração.

As séries de máximas anuais para cada duração foram ajustadas a uma distribuição de probabilidade de valores extremos, tipo distribuição de Gumbel, GEV e Gamma. Este ajuste permite estimar a intensidade da precipitação para diferentes períodos de retorno (Tr), como 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Sendo que a equação de ajuste IDF pode ser expressa em termos dos valores de intensidade (i) para cada duração (t) e período de retorno (Tr), e matematicamente pode ser descrita da seguinte forma:

$$i = k \cdot Tr^m /$$

onde k, m, b e n são parâmetros ajustados por meio de regressão não linear.

Para as demais bacias do estudo foi utilizado como referência a curva IDF gerada para a cidade de São Paulo, que baseia-se nas observações do posto pluviométrico da estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo [DAEE, 2018]. Da mesma forma que foi calculada para as 4 bacias, obtendo-se os valores acumulados para os mesmos TRs e durações ($10 \leq t \leq 1440$ min), sendo que valores obtidos são:

$$i_{t_d, T} = A(t_d + B)^C + D(t_d + E)^F \left\{ G + H \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right\}$$

A = 32,77; B = 20; C = -0,878; D = 16,1; E = 30; F = -0,9306; G = -0,4692; H = -0,8474; t_d , é a duração da chuva, em minutos; Tr, é o período de retorno da chuva, em anos; $i_{td, Tr}$, é a intensidade da chuva, em mm/min, para a duração t_d (min) e período de retorno Tr (anos).

2.2. Geração da Curva IDF a partir de Dados de Radar

O radar meteorológico de São Paulo do SPÁguas é do tipo banda S, Doppler e de dupla polarização que usa uma antena com ângulo de abertura de 1° e tem uma área de cobertura de 240 km, Figura 1a. As linhas pontilhadas representam as distâncias a cada 60 km a partir do radar, representado pela cruz azul. O destaque em vermelho é o município de São Paulo.

Este radar meteorológico está configurado para fazer varreduras volumétricas a cada 5 minutos com uma resolução espacial de gate (volume iluminado pelo radar) de 125 metros. A partir das variáveis polarimétricas (fator refletividade do radar - Z, refletividade diferencial – ZDR e diferença de fase específica – KDP) observadas em cada gate, foi utilizado o algoritmo DPSRI (Dual Polarization Surface Rainfall Intensity) para estimar a taxa de precipitação. Este algoritmo é baseado na metodologia proposta por Ryzhkov et al. (2005) para radares banda S de Dupla Polarização e é utilizado pela rede de radares meteorológicos NEXRAD dos EUA Ryzhkov et al. (2005). Por fim, o DPSRI foi configurado para estimar taxa de precipitação em grades regulares com resolução espacial de $1 \times 1 \text{ km}^2$.

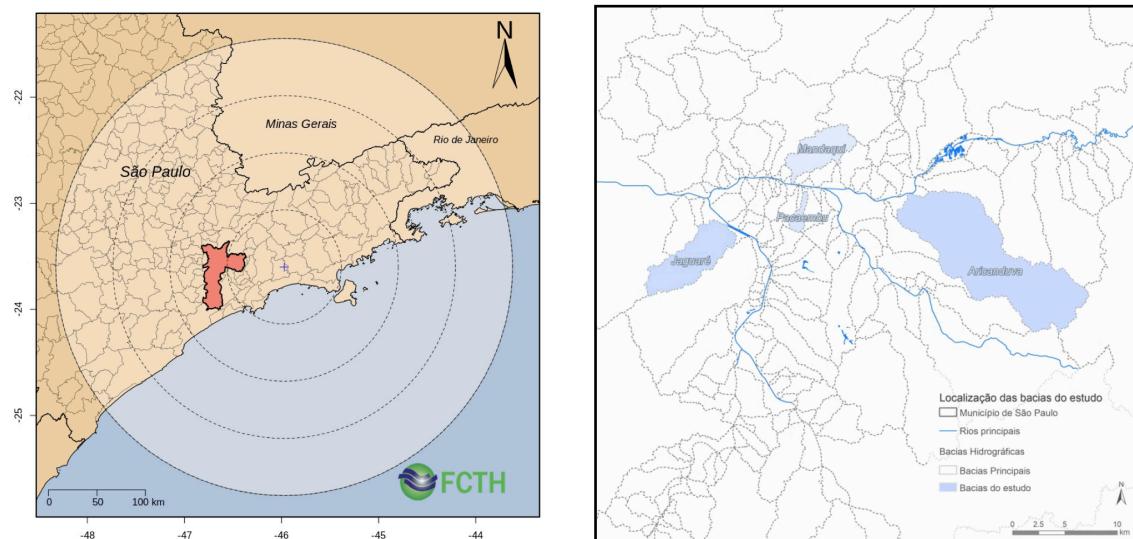


Figura 1: a) Área de cobertura do Radar Meteorológico de São Paulo. b) Bacias hidrográficas do estudo, em azul o foco nas 4 bacias isoladas e em cinza as 99 restantes.

A partir dos campos de taxa de precipitação, foram calculados os acumulados médios da precipitação estimada pelo radar, levando em conta todos os grids de $1 \times 1 \text{ km}^2$ que estão dentro da área da bacia hidrográfica definida no estudo.

A partir da série temporal de precipitação média sobre cada bacia, o processo de cálculo de IDF seguiu os mesmos procedimentos definidos para os postos pluviométricos (extração de máximas anuais, análise de frequência e ajuste da equação IDF).

3. Estudos de Caso: Bacias do município de São Paulo (103) e Bacias hidrográficas do Rio Aricanduva e Córregos Mandaqui, Jaguaré e Pacaembu

O estudo de caso se concentrou nas bacias hidrográficas do município de São Paulo, totalizando 103 bacias compreendidas dentro da área do município. As quatro bacias selecionadas representam diferentes cenários de urbanização e desafios hidrológicos considerados importantes para indicar algumas tendências (Figura 1b). Elas foram selecionadas por representarem diferentes grandezas em termos de área drenada, ocupação, localização e morfologia.

A bacia do Aricanduva é considerada a mais extensa compreendida dentro do município de São Paulo. Ela possui 100,4 km² e está localizada na zona leste do município em área densamente urbanizada. A bacia do Mandaqui por sua vez, é uma bacia com áreas de forte declividade na sua cabeceira (Serra da Cantareira) e um vale principal intensamente urbanizado e canalizado e está localizada na região norte, cobrindo 18,6 km².

Para as bacias do Jaguaré e Pacaembu, respectivamente na zona oeste e central do município, as áreas são de 28,1 km² e 3,3 km². São bacias densamente urbanizadas, porém com dimensões distintas. Situada na Zona Oeste, a bacia do Jaguaré é caracterizada por uma urbanização consolidada e um relevo ondulado. Os problemas de inundação estão frequentemente associados à insuficiência da rede de macrodrenagem e a influência do corpo hídrico receptor (Rio Pinheiros), na sua várzea.

A bacia do Pacaembu por sua vez é uma bacia na região central, quase que inteiramente canalizada e enterrada sob o sistema viário e representa o desafio da drenagem em áreas impermeabilizadas, onde a resposta hidrológica é quase instantânea.

4. Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta uma comparação entre as curvas IDF geradas pelas duas metodologias e revela tendências inconsistentes entre as quatro bacias estudadas. Observa-se que as curvas geradas com dados de radar para as 4 bacias apresentam comportamento diferente da curva IDF de referência denominada IDF-SP.

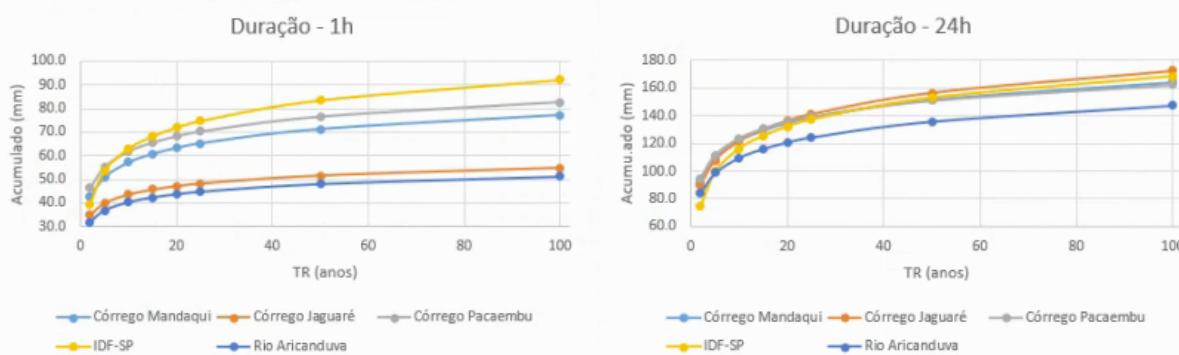


Figura 2: Comparação das curvas IDF geradas por dados de radar e IDF - SP, para as durações de 1 e 24 horas e para os TRs de 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos.

Para duração de 1 hora, as curvas de radar mostram acumulados mais baixos em todos os TRs para as bacias de maior área (Aricanduva e Jaguaré), enquanto para as bacias com áreas menores, os TRs

2 a 5 apresentam precipitações acumuladas maiores que a IDF-SP, invertendo esta tendência para TRs mais altos.

Para duração de 24 hora, as curvas de radar mostram acumulados consistentemente mais baixos para todos os TRs e bacias. Apenas a bacia do Jaguaré supera os acumulados da IDF-SP para TRs a partir de 20 anos.

A expectativa ao iniciar os estudos foi a de que as curvas IDF derivadas do radar apresentassem, consistentemente, acumulados de chuva mais altos para durações curtas (abaixo de 60 minutos), pois o radar meteorológico tem a capacidade de capturar o núcleo de tempestades convectivas intensas geralmente da ordem de 7 km² (Sosnoski, 2017) e localizadas, que podem passar entre os postos pluviométricos ou ter sua intensidade média subestimada por um único medidor pontual.

O comportamento apresentado pode ser justificado pelo fato das curvas geradas com dados de radar terem sido fruto da média das precipitações sobre a área das bacias. Esta metodologia estaria homogeneizando e atenuando os picos de precipitação dentro desta área e consequentemente reduzindo os acumulados utilizados para gerar as curvas por radar.

O fato das curvas para durações de 24 horas se aproximarem mais das estabelecidas pelas IDF-SP, se deve ao fato de que esta redução está sendo compensada pela longa duração dos registros. Para durações mais longas, os acumulados estimados por ambas as fontes de dados tendem a convergir.

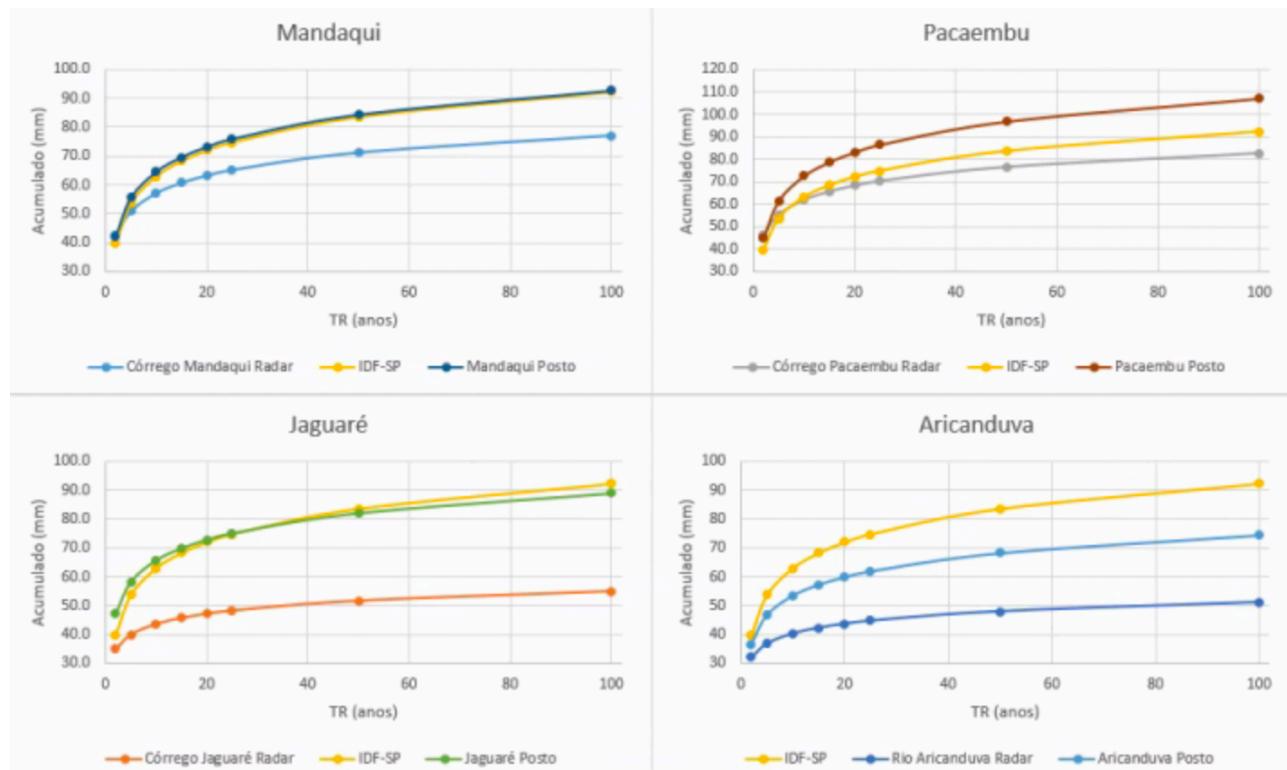


Figura 3 – Comparaçao das curvas IDF de Radar e de posto pluviométrico na bacia com duração de 1 hora

O comportamento apresentado pelas curvas IDF geradas pelos postos pluviométricos instalados dentro da área das bacias foi similar ao identificado pela IDF-SP. Quando comparadas as curvas para eventos de duração 1 hora, apenas na bacia do Pacaembu, a de menor área, foi verificada uma diferença consistente de superestimação dos acumulados pela IDF do posto, enquanto a IDF do radar subestimou inclusive as curvas IDF-SP (Figura 3).

Este comportamento possivelmente têm relação com a área das bacias, além do fato dos acumulados de precipitações por radar terem sido calculados pela média sobre as áreas, tendo em vista que este procedimento atenua os acumulados, afetando principalmente bacias de maiores dimensões, como é o caso das bacias do Mandaqui, Jaguaré e Aricanduva.

Para a duração de 24 horas, o comportamento indica uma consistente subestimação dos acumulados para todos os casos das IDFs geradas pelos postos pluviométricos das bacias estudadas, como apresentado na Figura 4 a seguir. As IDFs geradas por radar superaram consistentemente inclusive a IDF-SP, porém com uma exceção aos períodos de retorno maiores, de 50 e 100 anos, nas bacias do Mandaqui e Pacaembu.

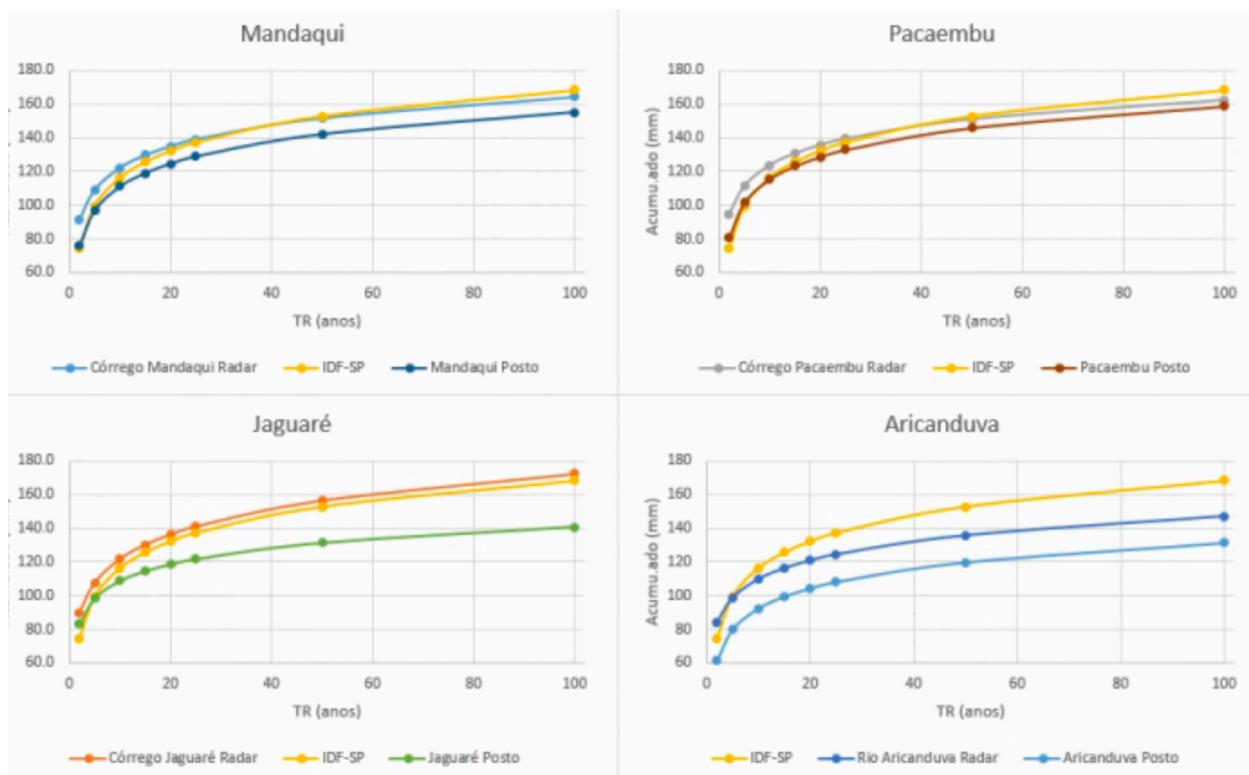


Figura 4 – Comparação das curvas IDF de Radar e de posto pluviométrico na bacia com duração de 24 horas

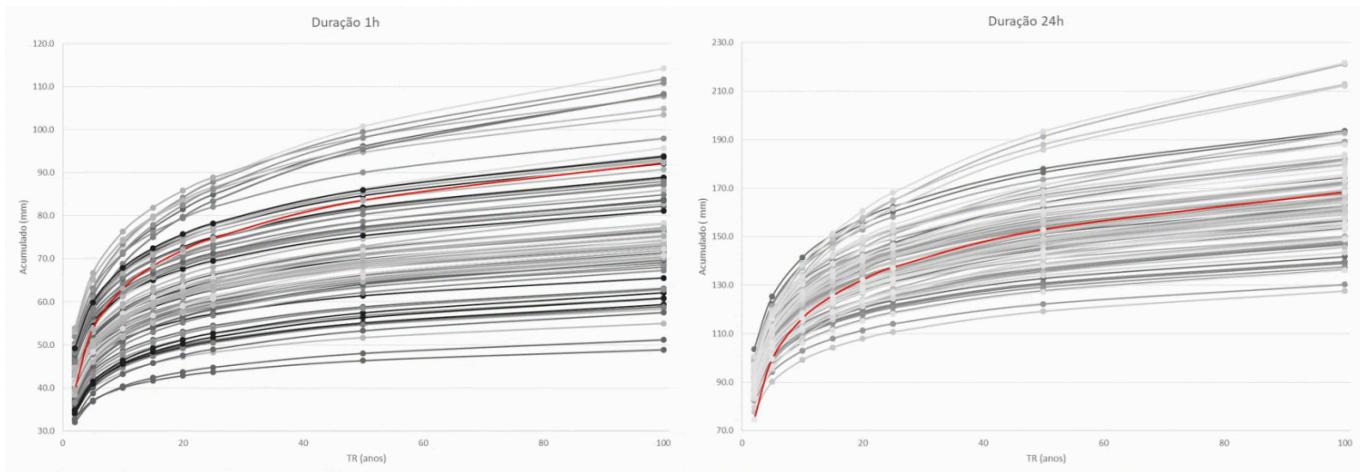


Figura 5: Comparação das curvas IDF geradas por dados de radar para as 103 bacias e a IDF – SP (vermelho), para as durações de 1 e 24 horas e para os TRs de 2, 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos.

Frente a esta constatação, foram avaliadas as curvas geradas para as 99 bacias restantes e que são apresentadas na Figura 5. Baseado nestes resultados da Figura 5, é possível constatar uma grande variação, ou seja, curvas subestimando e super estimando em relação à IDF-SP. No caso de separar os resultados pelas áreas das bacias hidrográficas, selecionando janelas de área nas quais os efeitos seriam mais frequentes, constatou-se que elas interferem diretamente na posição que as curvas IDF geradas por radar têm em comparação com a IDF-SP. Para durações curtas, os acumulados são consistentemente subestimados, no entanto, para bacias com área de cobertura maior que 30 km² este efeito é praticamente nulo, sendo encontrado apenas para TR 2 anos em 14% das bacias destas dimensões. Na maior parte das curvas, este comportamento é homogêneo, ou seja, o formato da curva têm o mesmo formato da curva IDF-SP. Este comportamento se mostrou consistente com o avaliado para as 4 bacias em foco neste estudo.

Das 103 bacias consta a seguinte distribuição em relação ás áreas. São 12 bacias de 0 a 2 km², 36 de 2 a 5 km², 23 de 5 a 10 km², 25 de 10 a 30 km² e 7 com áreas maiores que 30 km².

Para os eventos de longa duração, o comportamento é parcialmente deslocado para uma tendência de superestimação para as IDF geradas por radar em relação a IDF-SP. Quando avaliada a área das bacias que tem este comportamento, encontrou-se que 35% das bacias de até 5 km² subestimam a IDF-SP, enquanto que todas as bacias com áreas superiores a 5 km² apresentam superestimação em relação a IDF-SP.

A diferença na forma da curva também indica que para TRs mais baixos, na ordem de 2 e 5 anos, praticamente todas as IDF geradas por radar resultaram em acumulados superiores aos apresentados pela IDF-SP.

5. Conclusões

A análise comparativa das curvas IDF geradas por postos pluviométricos e por radar meteorológico para as bacias do Aricanduva, Mandaqui, Jaguaré e Pacaembu demonstra que a dependência exclusiva de dados pontuais pode levar a uma superestimação consistente dos acumulados para eventos de 1 hora de duração, enquanto para eventos de 24 horas, ocorre uma subestimação

significativa dos acumulados de chuvas críticas. Ao expandir o estudo para a totalidade das bacias do município de São Paulo, este comportamento demonstrou-se mais volátil. Em alguns casos este comportamento é invertido, indicando que os acumulados necessitariam ser majorados ou minorados para que se estabeleça uma IDF única, como é o caso da IDF-SP.

O radar meteorológico prova ser uma ferramenta essencial para a avaliação da hidrologia urbana moderna, fornecendo uma caracterização mais realista dos eventos extremos que governam o risco de inundação em grandes cidades, porém a metodologia aqui aplicada indica que o caminho a ser tomado quando desenvolvendo ferramentas que utilizam os dados de radar devem levar em conta valores críticos e não as médias sobre as áreas de estudo.

A adoção de curvas IDF baseadas em radar ou, idealmente, em uma combinação de radar e postos, representa um passo crucial para o desenvolvimento de uma infraestrutura de drenagem mais resiliente em São Paulo, capaz de enfrentar os desafios impostos por um clima em mudança e uma urbanização contínua. Futuros trabalhos devem se concentrar na criação de metodologia que utiliza os eventos críticos sobre as áreas e não as médias, assim como uma avaliação do uso por área. Desta forma, a sua aplicação para a reavaliação da infraestrutura de drenagem existente nas metrópoles poderá ser mais valiosa.

Para um projetista, isso significa que uma estrutura de drenagem dimensionada pelo dado do posto pode ser subdimensionada ou superestimada a depender das características da bacia e principalmente do padrão de chuva especial que precipita sobre a bacia hidrográfica.

Como conclusão final, considera-se que os dados de radar não substituem os postos pluviométricos. Os postos possuem séries históricas mais longas e são registros fidedignos da precipitação em solo, sendo indispensável para o dimensionamento das estruturas. No entanto, a inclusão da espacialização das precipitações com o uso de dados de radares pode auxiliar significativamente na identificação de eventos mais específicos para cada área de estudo.

REFERÊNCIAS

Back, Á. J. (2011). Hidrologia e Recursos Hídricos. Florianópolis: Editora da UFSC.

Barros, M.T.L.; Marcellini, L.; Souza, T.E.F.; Tiveron, F.C.; Braga JR. B.P.F.; Sistema de Alerta a Inundações na Cidade de São Paulo: Uma medida não estrutural eficiente. In II Seminário Metrópole Latino-Americanas, 1992, São Paulo.

Braga, B.P.F.; Rede telemétrica de alerta ás inundações no Estado de São Paulo. Universidade de São Paulo; 1986. 42p.

Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill.

DAEE (2018). Precipitações Intensas do Estado de São Paulo. Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo –SP p.270.

Joss, J.; Waldvogel, A. (1990). Precipitation measurement and hydrology. In: Radar in Meteorology. Boston: American Meteorological Society, pp. 577-606.

Ryzhkov, A.; S.E. Giangrande; T.J. Schuur (2005). “Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D”. Journal of Applied Meteorology, 44 , pp 502-515.

Sosnoski, A. S. K. B.; Rocha Filho, K.; Conde, F.; Barros, M. T. L. ; Efeitos da Distribuição Espacial de Precipitações no Dimensionamento de Sistemas de Drenagem, Anais do XXIV SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

Tucci, C. E. M. (2012). Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH.