

## Avaliação da Técnica de Estimativa de Precipitação GPI Sobre a Área de Abrangência do Radar de Bauru, SP

Graziela Balda Scofield

IPD - UNIVAP- Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba - Av. Shishima Hifumi 2911  
12244-000 - São José dos Campos – SP, Brasil - cgscofield@uol.com.br

Íria Vendrame

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA - Praça Mal. Eduardo Gomes 50. Vila das Acácias  
12 228-900 - S. José dos Campos-SP, Brasil - biria@infra.ita.br

Received: 20/12/02 – revised: 28/04/03 – accepted: 12/11/03

---

### RESUMO

Este estudo avalia a técnica de estimativa de precipitação por satélite técnica Global Precipitation Index (GPI) e duas versões adaptadas,  $GPI_a$  e  $GPI_p$ , nas várias escalas temporais e espaciais sobre área continental. As escalas temporais analisadas variaram entre 3 h a um mês, enquanto que a escala espacial de 100 a 10000 Km<sup>2</sup>. A área de estudo foi o interior de São Paulo, utilizando-se imagens infravermelhas do satélite Geoestacionário Operational Environmental Satellite 8 (GOES-8) e dados CAPPI do radar meteorológico de Bauru. Os resultados da GPI e suas duas versões foram comparados com os dados de radar meteorológico de Bauru e calculou-se a tendência, o erro médio da raiz quadrada (RMSE) e a correlação, para várias combinações temporais e espaciais, para três formas de amostragem espaciais diferentes. Para a maioria das combinações, as taxas ótimas encontradas apresentaram valores menores que os encontrados para a GPI. Além disso, a técnica GPI superestima as taxas de precipitação em relação aos dados de radar, enquanto que a técnica  $GPI_p$  superestima levemente as taxas de precipitação em relação aos dados de radar. Conclui-se também que com pequenas adaptações de temperatura limiar de chuva e não chuva e de taxa de precipitação pode-se estimar a precipitação com menores tendências e RMSE médios para resoluções temporais de 3 h a mensal e áreas de 100 a 10000 Km<sup>2</sup>, para as três formas de amostragem espacial analisadas.

**Palavras-chave:** Precipitação, GPI, escalas temporais.

---

### INTRODUÇÃO

A precipitação é uma das variáveis mais importantes do ciclo hidrológico de nosso planeta. Ela tem uma grande variação tanto em espaço quanto em tempo (Barrett et al., 1994). Além de ser essencial para a sobrevivência de animais e plantas, ela é fundamental para aplicações em engenharia, beneficiando todos os segmentos produtivos de nossa sociedade.

Para monitorar a precipitação na superfície terrestre existem redes de pluviômetros e pluviógrafos e radares meteorológicos, sendo que a grande maioria destes dispositivos estão localizados nos continentes. A medida da precipitação depende dos hidrometeoros que estão caindo (medidos pelos radares) ou que caíram na superfície (medidos pelos pluviógrafos ou pluviômetros). As observações de precipitação feitas pelos pluviógrafos não são realmente representativas do acúmulo desta variável numa dada área (Barrett et al., 1994). Esta afirmação é verdadeira para sistemas convectivos que mostram variações da distribuição temporal e espacial da chuva (Woodley et al., 1975). Por outro lado, apesar das medidas

de radar serem quase contínuas no tempo e espaço, existem problemas associados a elas como o entendimento da relação entre a energia retroespelhada e o espectro do tamanho das gotas, atenuação do feixe pelas gotas e com a propagação anômala do sinal (Austin, 1987).

Nas últimas décadas, devido à preocupação com possíveis mudanças do clima de nosso planeta, houve um grande avanço no desenvolvimento de técnicas para monitoramento remoto da precipitação. Inicialmente, foram desenvolvidas diversas técnicas de estimativa de precipitação com dados dos canais visíveis e infravermelho, que tinham como objetivo identificar áreas prováveis de chuva e avaliar as taxas de precipitação (Scofield e Olivier, 1977; Arkin, 1979; Negri et al., 1984; Adler e Negri, 1988; Jobbard e Debois, 1994). A radiação infravermelho, na região de 10,6 a 12,6 μm, é o resultado da absorção da radiação solar pela superfície terrestre, nuvens e atmosfera. A sua subsequente reemissão para o espaço ocorre em forma de perda radioativa de ondas longas que está associada com temperatura. A premissa física é que a temperatura de topo da nuvem é função da altura destas. Desta forma, os topo de nuvens mais altos e

mais frios correspondem às nuvens mais espessas e normalmente são as que mais precipitam. Assim, a precipitação é indiretamente relacionada à chuva da superfície. Devido à alta resolução temporal (de meia em meia hora) e espacial dos satélites geoestacionários, as técnicas de estimativa de precipitação que utilizam dados do canal infravermelho possibilitam monitorar relativamente bem o ciclo de vida das tempestades.

Posteriormente, foram desenvolvidas técnicas que utilizam os dados de microondas passivo (Ferraro et al., 1994; Wilheit et al., 1991; Adler et al., 1994). Neste caso, o processo físico que possibilita a inferência de chuva utilizando-se dados de satélites está associado à energia reemitida para o espaço na faixa espectral de microondas, situada entre 0,5 a 3 cm (150 a 10 GHz). Os dados de microondas passivo fornecem evidências relacionadas à transferência de radiação dos hidrometeoros da nuvem, ou seja, evidências físicas mais diretas dos hidrometeoros. No caso de sensores de microondas, como tipicamente os satélites apresentam órbita polar e consequentemente uma resolução temporal limitada (uma ou duas passagens/dia), as estimativas de precipitação possibilitam uma visão parcial da chuva em uma dada região.

No final de 1997, foi lançado o satélite “Tropical Rainfall Measuring Mission” (TRMM) com o objetivo de medir quantitativamente a precipitação nos trópicos (Simpson et al, 1988). O conjunto de sensores do TRMM funciona como um medidor de chuva em órbita, e possui um imageador microondas, um escaneador visível e infravermelho e o primeiro radar de precipitação no espaço. Este radar tem como objetivo medir a intensidade do retroespelhamento que a precipitação causa no sinal transmitido pelo radar ao propagar-se através das nuvens. Algumas técnicas que utilizam dados de microondas ativo foram desenvolvidas por Kummerow et al. (1996) e Olson et al (1996).

As técnicas “GOES Precipitation Index” (GPI) (Arkin, 1979) e “Negri Adler Wetzel Technique” (NAW) (Negri et al., 1984), têm sido utilizadas e testadas em diversos países. Além disso, elas foram testadas em vários experimentos envolvendo intercomparações de algoritmos (Arkin e Xie, 1994; Smith et al., 1998). Vários pesquisadores realçaram a necessidade da instalação de ajustes regionais e sazonais a fim de explicar a variabilidade global dos regimes de chuva com relação à GPI (Morrisey e Greene, 1993; Arkin e Xie, 1994). Tais ajustes são necessários para todas as técnicas de estimativa de precipitação.

Várias questões de grande interesse prático e científico na área de sensoriamento remoto da precipitação ainda continuam em aberto. Por exemplo: como as variáveis estatísticas (tendência, RMSE médio e correlação) variam em função da resolução temporal? qual a diferença das variáveis estatísticas entre as diversas técnicas de

estimativa de precipitação? ainda há espaço para melhorar as estimativas de precipitação obtidas por essas técnicas?

O presente estudo aborda algumas destas questões, enfatizando o uso das técnicas de estimativa de precipitação, utilizando dados de satélite do canal infravermelho. O interesse deste estudo é a avaliação da técnica GPI para a área de abrangência do radar meteorológico de Bauru/SP. Desta forma, neste trabalho foi determinada a temperatura limiar de chuva e não chuva, através do uso de imagens de satélite meteorológico e dados de radar meteorológico e na seqüência, foram determinadas as taxas de precipitação ótimas em função da variação no espaço e no tempo, a fim de ajustar-se a técnica GPI para obter-se a técnica ajustada GPI<sub>d</sub>. Em uma segunda fase, também foi modificada a técnica original, utilizando-se a nova temperatura limiar, mas empregando-se a taxa de precipitação mensal ótima, propondo-se, neste caso, a técnica modificada GPI<sub>p</sub>. A fim de avaliar o desempenho das três técnicas, foram determinadas as variáveis estatísticas e comparados os resultados obtidos para a área de abrangência do radar de Bauru.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde o advento do satélite meteorológico, vários pesquisadores desenvolveram técnicas de estimativa de precipitação utilizando-se imagens dos sensores visíveis, infravermelho e microondas, para várias escalas temporais e espaciais. Os sensores visíveis e infravermelho estão localizados principalmente em satélites geoestacionários enquanto que os sensores microondas em satélites de órbita polar. Uma ampla discussão sobre as diversas técnicas de estimativa de precipitação via satélite é apresentada por Martin e Scherer (1973), Barrett e Martin (1981), Arkin e Ardanuy (1989) e D'Souza et al. (1990). Várias técnicas de estimativa de precipitação foram desenvolvidas para aplicações em meteorologia e hidrologia e foram aplicadas principalmente em alguns experimentos meteorológicos e oceanográficos que contavam com radares e/ou pluviôgrafos para eventuais validações. No que se refere ao uso de dados infravermelho de satélite geoestacionário, a GPI é uma das técnicas mais simples que vem sendo utilizada com sucesso há décadas. Esta técnica foi desenvolvida por Arkin (1979) e Richards e Arkin (1981) a partir da relação entre o acúmulo de 6 h de precipitação e a cobertura fracional de áreas de 2,5° por 2,5° durante o experimento “Global Atmospheric Research Program” (GARP) “Tropical Atlantic Experiment” (GATE). Essa técnica assume que há chuva para todos os pixels da imagem infravermelho de nuvens que apresentam temperaturas menores que 235 K. Neste caso é atribuída uma taxa constante de 3 mm/h, enquanto que para os demais pixels

da imagem esse valor é zero (Arkin e Meisner, 1987). Essa técnica já foi utilizada em vários projetos de intercomparação de algoritmos, apresentando bons resultados para a região tropical e subtropical entre 40°N-40°S principalmente para estimativas de precipitação mensais (King et al., 1995, Arkin e Xie, 1994). Outro ponto importante é que esse algoritmo infravermelho foi escolhido para ser testado durante o programa TRMM (Huffman et al., 1997; Simpson et al., 1988). Apesar de apresentar bons resultados estatísticos há uma necessidade da instalação de ajustes regionais e sazonais a fim de explicar a variabilidade global dos regimes de chuva (Morrisey e Greene, 1993; Arkin e Xie, 1994). Segundo Arkin et al. (1994), a taxa de precipitação de 3 mm/h utilizada pela GPI não é válida para todos os continentes e oceanos. Eles destacam que esse fator é um dos responsáveis pela superestimativa sistemática da precipitação obtida por essa técnica, quando comparada com dados observados, notadamente em áreas tropicais.

Negri et al. (1984) identificaram as variáveis dominantes, entre elas a área da nuvem e volume de chuva, no cálculo da estimativa de precipitação utilizando a técnica Griffith, Wetzel Technique (GWT). Foram feitas simplificações para tornar as estimativas de precipitação independentes da evolução temporal da nuvem. Os pixels da imagem com precipitação foram determinados através de um limiar de temperatura, inicialmente de 253 K (Negri et al., 1984). Esta técnica foi denominada NAW.

No caso da NAW, na rotina de estimativa de precipitação, calculam-se duas novas temperaturas,  $T_{10\%}$  e  $T_{50\%}$ , que definem, respectivamente, os pixels de precipitação presentes nos 10 % e 50 % da porção mais fria da nuvem. As taxas de precipitação utilizadas foram de 8 mm/h, para os pixels com  $T > T_{10\%}$ , e 2 mm/h, para os pixels com  $T_{10\%} < T < T_{50\%}$ . Para os pixels com  $T > T_{50\%}$ , assume-se que não ocorre precipitação (Negri et al., 1984). A NAW foi modificada utilizando-se os dados da Primeira Intercomparação de Algoritmos de estimativa de precipitação ocorrida no período de junho a agosto de 1989 sobre o Japão e circunvizinhanças (Negri e Adler, 1993). As principais modificações foram o limiar que mudou de 253 K para 235 K para melhorar a correspondência com as regiões de espalhamento detectadas pelo SSM/I (Spatial Sensor Microwave/Imager) a 86 GHz, e o estabelecimento de uma equação discriminante empírica para eliminar cirrus.

Estas técnicas já foram testadas no Brasil. As técnicas GPI e NAW foram aplicadas sobre o nordeste de São Paulo e os resultados comparados com dados de pluviógrafos de nove estações da área de estudo (Moraes et al., 1989). Os autores notaram que as áreas de chuva eram bem definidas, mas as técnicas deveriam ser adaptadas quantitativamente para as condições meteorológicas regionais do país. As técnicas GPI e NAW foram testadas

por Martin et al. (1990) na Amazônia, utilizando dados do segundo experimento “Amazon Boundary Layer Experiment” (ABLE). Carvalho e Massambani (1992) separaram o conjunto de dados do sensor infravermelho com temperatura mínima de 233 K com o objetivo de avaliar a relação entre os pontos com temperatura mínima local nas imagens infravermelho e a precipitação medida por radar em eventos semi-estacionários ocorridos durante o verão de 1989 sobre o estado de São Paulo.

## DADOS E METODOLOGIA

O período de estudo estende-se de 1º de dezembro de 1999 a 28 de Fevereiro de 2000. Os dados de satélite coletados para este estudo se referem às imagens da janela infravermelho de onda longa (10,2 – 11,2 μm) do satélite de órbita geoestacionária Geostationary Operational Environmental Satellite-8 (GOES-8), situado a 35800 Km de altitude, sobre o Equador a 75° W, monitorando as Américas e parte dos oceanos vizinhos ([www.cimss.ssec.wisc.edu/goes/goesmain.html](http://www.cimss.ssec.wisc.edu/goes/goesmain.html)). O GOES circunda a Terra em uma órbita geosíncrona sobre o Equador, possibilitando o monitoramento quase contínuo de uma mesma região em intervalos de tempo relativamente curtos. Estes dados foram fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Clima (CPTEC/INPE). Para comparar com os resultados das técnicas de estimativas de precipitação via satélite foram também utilizados os dados Constant Altitude Plan Position (CAPPI), com altura de 3,5 Km do Radar Meteorológico de Bauru, localizado no Município de Bauru, no Estado de São Paulo. A banda de operação do radar de Bauru é a banda S. Os dados de radar foram fornecidos pelo Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMET) da Universidade do Estado de São Paulo (UNESP).

A Figura 1 mostra a área de abrangência do CAPPI do radar meteorológico de Bauru, mostrando que o raio de abrangência é de 240 Km, enquanto que a precipitação só é quantificada para 120 Km, devido principalmente ao efeito da distância. Os dados de precipitação associados ao CAPPI de 3,5 Km têm uma melhor correlação com as taxas de precipitação estimadas pelas técnicas que utilizam imagens de satélites meteorológicos (Oliveira, 1996).

Para comparar simultaneamente as taxas de precipitação obtidas por radar com as obtidas por satélite, os dados desses sensores devem ser convertidos para as mesmas resoluções espaciais e temporais. Como os dados do radar meteorológico de Bauru possuem a resolução espacial de 4 Km<sup>2</sup> e os de satélite GOES-8 de 16 Km<sup>2</sup>, foi necessário degradá-los para esta mesma resolução. Como as imagens desse radar disponibilizam informações sobre precipitação apenas em termos de níveis de cinza, foi necessário a conversão destes em refletividade (dBZ).

Posteriormente, foi calculada a média dos 4 pixels adjacentes, que foram transformados em taxas de precipitação (mm/h) através da equação de Mashall e Palmer (1948).

Foram selecionados 10000 conjuntos de imagens de radar e satélite meteorológico, levando-se em consideração a disponibilidade simultânea desses dados. Como os dados de radar foram obtidos a cada 10 minutos, e as imagens de satélite de meia em meia hora, utilizaram-se as imagens de satélite mais próximas de cada horário de radar.

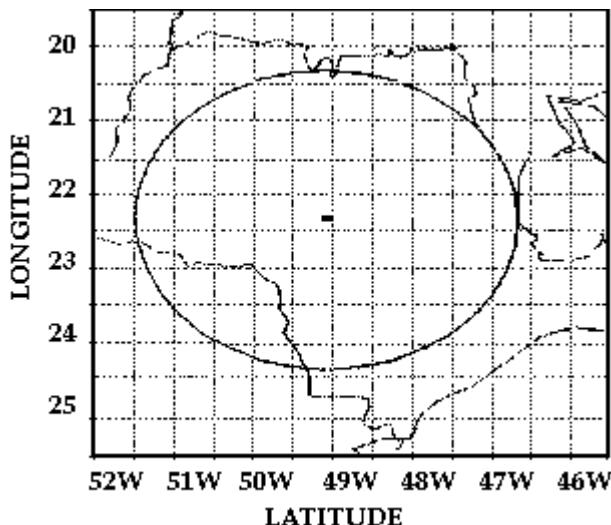


Figura 1 – Raio de abrangência (240 Km) do CAPPI do radar meteorológico de Bauru referente a altura de 3,5 Km. O ponto central da circunferência representa à localização do radar em 22° 21,5' S e 49° 1,6' W.

Utilizando-se os dados horários de radar e satélite, foi possível verificar todos os pontos de chuva do radar e determinar as correspondentes temperaturas nas imagens infravermelho. Desta forma, determinou-se a percentagem das temperaturas de topo de nuvens que correspondiam aos pontos de chuva no radar e posteriormente a temperatura limiar de chuva e não chuva para a área de Bauru.

Com o intuito de avaliar como a variabilidade espacial e temporal de uma série de imagens de radar e satélite modifica o comportamento da tendência das estimativas de precipitação simultaneamente obtidas, foram definidas três formas de amostragem espacial distintas, para cada conjunto de dados.

A primeira forma de amostragem espacial enfoca a área central das imagens analisadas, conforme mostrado na figura 2. A área central foi escolhida por minimizar o efeito de distância nos dados analisados, já que os dados de chuva mais distantes não foram utilizados no estudo.

Na segunda forma de amostragem espacial foram utilizadas janelas de 100 Km<sup>2</sup>, 400 Km<sup>2</sup>, 900 Km<sup>2</sup>, 1600

Km<sup>2</sup>, 2500 Km<sup>2</sup> e 10000 Km<sup>2</sup>, sem a ocorrência de sobreposição de linhas e/ou colunas. O valor da taxa de precipitação foi calculado pela média dos pixels presentes em cada janela. Para todos os tamanhos de janela estudados, algumas linhas e colunas das bordas não foram utilizadas já que o tamanho da imagem não é múltiplo dos valores das janelas, como mostrado na Figura 3.

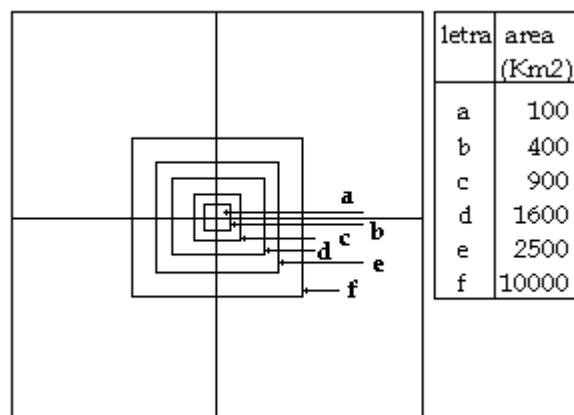


Figura 2 – Subdivisão da área de estudo referente a forma de amostragem espacial 1. A área de estudo foi subdividida em 6 quadrados cujos tamanhos estão apresentados na legenda acima

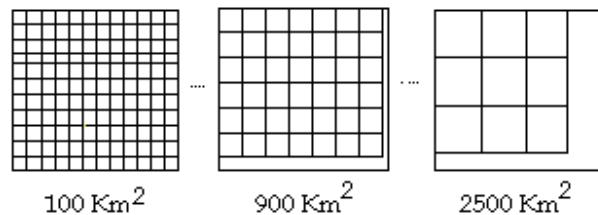


Figura 3 – Subdivisão da imagem de radar e satélite em janelas referente à forma de amostragem espacial 2. As subdivisões mostradas são para as janelas de 100 Km<sup>2</sup>, 900 Km<sup>2</sup> e 2500 Km<sup>2</sup>, notando-se que para as duas últimas ocorre a não utilização de todas as linhas e colunas das imagens.

Na terceira forma de amostragem espacial, as imagens foram subdivididas em janelas de 100 Km<sup>2</sup>, 400 Km<sup>2</sup>, 900 Km<sup>2</sup>, 1600 Km<sup>2</sup>, 2500 Km<sup>2</sup>, 10000 Km<sup>2</sup>, com a ocorrência de sobreposição de linhas e colunas, conforme mostrado na Figura 4, para a janela de 1600 Km<sup>2</sup>. Esta terceira forma de amostragem espacial foi selecionada para determinar se ocorre melhor desempenho das variáveis estatísticas em relação a segunda forma de amostragem espacial. Assim como na segunda forma de amostragem espacial, algumas linhas e colunas não foram utilizadas de acordo com a dimensão da janela utilizada.

Para este estudo foram feitas setenta e duas combinações envolvendo as estimativas de precipitação obtidas pela técnica GPI (36) e as taxas de precipitação derivadas de radar, para várias resoluções temporais e áreas de estudo/janelas.

Para cada resolução temporal e área de estudo/janelas e técnica escolhida, todos os pixels das imagens de radar e satélite foram colocados no mesmo arquivo de dados, em forma de colunas. Assim, todos os arquivos de dados radar e satélite possuíam mais de 3 milhões de linhas e duas colunas, com isso, não foi possível visualizar os gráficos do comportamento das estimativas de precipitação em relação aos dados de radar. Isto ocorreu porque havia várias taxas de precipitação de radar para um mesmo valor de taxa de precipitação obtida pela técnica de estimativa de precipitação via satélite. Assim, na confecção dos gráficos das taxas de precipitação obtidas pelo radar e pelas técnicas de estimativa de precipitação optou-se pelo cálculo da média das taxas de precipitação do radar para cada valor de taxa de precipitação das técnicas, para todas as combinações estudadas.

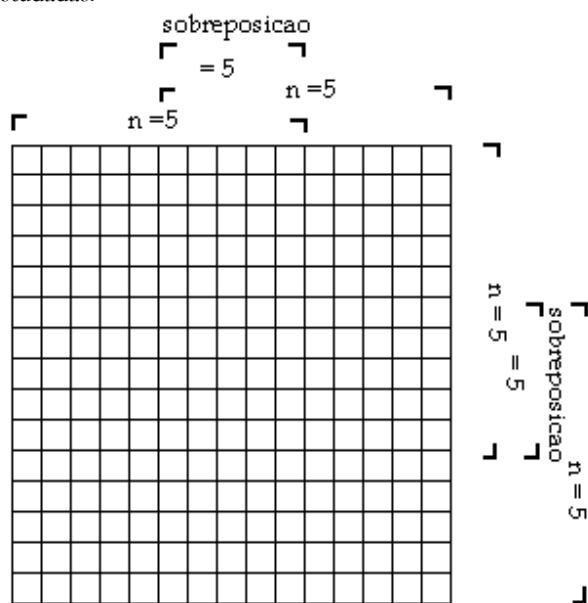


Figura 4 – Parte de uma imagem com janela de 1600 Km<sup>2</sup>, mostrando as colunas  $n = 1$  e  $2$ , e as linhas  $m = 1$  e  $2$ , apresentando uma sobreposição de 5 linhas e 5 colunas.

Após a confecção dos gráficos da média das taxas média de precipitação do radar para cada valor de taxa de precipitação da técnica GPI para cada combinação de resolução temporal e área de estudo, foi encontrada uma curva de ajuste com coeficiente angular igual a um e coeficiente linear igual a zero. Esta curva mostra o quanto as estimativas de precipitação das técnicas estudadas estão

sendo super ou subestimadas em relação aos dados dos radares meteorológicos. Com o intuito de otimizar a tendência, variou-se a taxa de precipitação das técnicas de satélite de forma a encontrar o valor ótimo para cada combinação de resolução temporal e área de estudo. Dentre todas as taxas de precipitação analisadas, considerou-se como o valor ótimo aquele que conduziu ao melhor ajuste apresentando o valor do coeficiente angular mais próximo de 1. Assim, foi calculada uma taxa ótima de precipitação para cada combinação de resolução temporal e área de estudo/janela, de acordo com cada técnica e experimento.

Primeiramente, as taxas de precipitação obtidas via GPI foram estimadas para cada imagem de satélite, utilizando-se como base a taxa de 3 mm/h e temperatura limiar de 235 K. Posteriormente, essas taxas foram acumuladas para todas as combinações de resolução temporal e área de estudo. Após a análise da linha de tendência de cada combinação, foram feitas várias simulações variando a taxa de precipitação da GPI entre 0,1 a 10 mm/h, em intervalos de 0,1 mm/h. A obtenção da taxa ótima foi feita a partir da escolha da melhor linha de tendência, ou seja, quando apresentou o menor valor de tendência.

A substituição da taxa de precipitação e temperatura limiar normalmente utilizada na GPI pelas taxas ótimas resultou na definição de uma técnica modificada denominada GPI<sub>d</sub>. Assim, as taxas de precipitação obtidas pelas técnicas GPI, GPI<sub>d</sub> foram comparadas com os dados de radar, obtendo-se os valores de tendências, RMSE médio e correlação.

Após a obtenção das taxas ótimas de precipitação para cada combinação de resolução temporal e área de estudo, a Técnica Padrão foi criada: GPI<sub>p</sub>, substituindo-se as taxas de precipitação da técnica GPI pelos valores mensais encontrados e a temperatura limiar para cada área/janela. Assim, as taxas de precipitação obtidas pela GPI<sub>p</sub> foram também comparadas com os dados de radar meteorológico, calculando-se novamente os valores de tendências, RMSE médio e correlação.

A análise do desempenho das técnicas GPI, GPI<sub>d</sub> e GPI<sub>p</sub> em relação aos dados de radar meteorológico para três formas de amostragem espacial e cada conjunto de dados, foi feita avaliando-se diversas variáveis estatísticas como a Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático médio (RMSE<sub>m</sub>) que é a razão entre o RMSE e a média dos dados de radar, a correlação entre as taxas de precipitação do radar meteorológico e as taxas de precipitação dos dados da GPI e GPI<sub>p</sub> e a tendência, definida como a diferença entre as médias dos dois conjuntos de dados radar e satélite.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados CAPPI do radar de Bauru e as imagens infravermelho do satélite GOES-8, determinou-se a temperatura limiar correspondente à ocorrência de chuva e não chuva da região de abrangência do radar de Bauru. A temperatura encontrada foi de 235 K e refere-se a 83 % dos casos estudados. Este novo limiar é igual ao utilizado para a GPI e NAW no Japão (Negri e Adler, 1993). Scofield (1994) determinou uma temperatura limiar de 229 K para São Paulo utilizando dados do radar de Ponte Nova e imagens infravermelho do Meteosat-3 para o período de novembro de 1993 a fevereiro de 1994. Por outro lado, Carvalho e Massambani (1992) encontraram um valor de 233 K com dados do radar de Bauru e imagens do satélite GOES-8 para o verão de 1989. As diferenças entre os 3 valores devem-se à utilização de diferentes períodos de estudo e radar e/ou satélite.

### Estimativas de precipitação obtidas pela GPI, $\text{GPI}_d$ e $\text{GPI}_p$

Para as várias combinações de áreas e resolução temporal, foram estimadas as taxas de precipitação utilizando-se as técnicas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$ , com a nova temperatura limiar. As variáveis estatísticas: tendência, RMSE médio e correlação foram calculados para avaliar o desempenho de cada combinação em relação aos dados de radar.

#### Primeira forma de amostragem espacial: área central da imagem

As estimativas de precipitação para a área central de cada um dos pares de dados do radar e das técnicas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  foram estudadas para cada combinação de área e resolução temporal. Para o estabelecimento da  $\text{GPI}_d$ , foram determinadas as taxas ótimas de precipitação de tal forma que a sua tendência fosse igual a zero. A Figura 5 apresenta a variação da taxa de precipitação com a diminuição da resolução temporal para várias áreas de estudo, para a primeira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru. Observa-se que as taxas de precipitação são quase constantes com a variação da resolução temporal e aumentam com o aumento da área de estudo. Os valores encontrados para as diversas combinações de áreas e resoluções temporais são inferiores aos da GPI (3 mm/h).

As taxas ótimas de precipitação mensal para cada área utilizadas na  $\text{GPI}_p$ , estão apresentadas na Tabela 1.

A Figura 6 apresenta as tendências das técnicas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  com a diminuição da resolução temporal para várias áreas de estudo, para a primeira forma de amostragem espacial referente ao caso do radar de

Bauru. Para a GPI, verifica-se que todas as tendências decrescem com a diminuição da resolução temporal, havendo uma superestimativa da GPI em relação aos dados de radar meteorológico. Nota-se também que as menores/maiores tendências ocorrem para 3 h/mensal. Observa-se que as tendências da GPI a partir das 24 h apresentam comportamento exponencial, com isso nota-se a necessidade da calibração da GPI, principalmente para estas resoluções temporais.

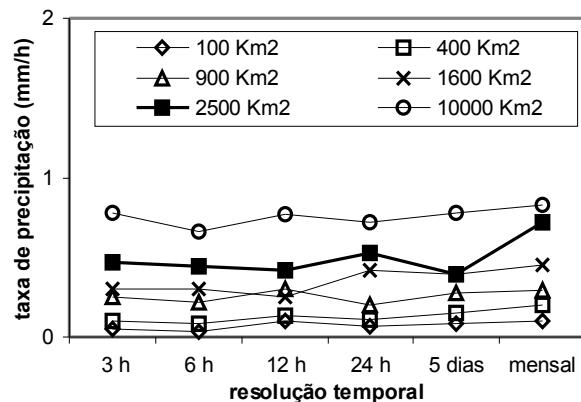


Figura 5 – Valores das taxas ótimas de precipitação correspondentes às equações de tendência obtidas modificando-se a taxa de precipitação original da GPI (3 mm/h), para cada resolução temporal e área de estudo, para a primeira forma de amostragem espacial, do caso do radar de Bauru.

Tabela 1 – Taxa ótima de precipitação mensal para as diversas áreas de estudo, para a primeira forma de amostragem espacial, do caso do radar de Bauru.

Área de Estudo ( $\text{km}^2$ )	Taxa ótima de precipitação mensal (mm/h)
100	0,10
400	0,20
900	0,29
1600	0,45
2500	0,72
10000	0,83

As tendências da  $\text{GPI}_d$  estão em torno de zero, uma vez que foram utilizadas as taxas ótima de precipitação das diversas combinações de área e resolução temporal (Figura 6b). Desta forma, foi comprovada a diminuição da tendência aplicando-se a calibração para a técnica GPI.

As tendências da  $\text{GPI}_p$  são negativas (Figura 6c), com isso ocorre uma leve superestimativa da  $\text{GPI}_p$  em relação aos dados do radar. Comparando-se as tendências

das GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$ , observa-se que os da  $\text{GPI}_p$  (-15 e 5 mm) são valores um pouco maiores do que os da  $\text{GPI}_d$  (-2 a 3 mm), mas são muito menor que os da GPI (-27 a -916 mm), principalmente para a resolução mensal.

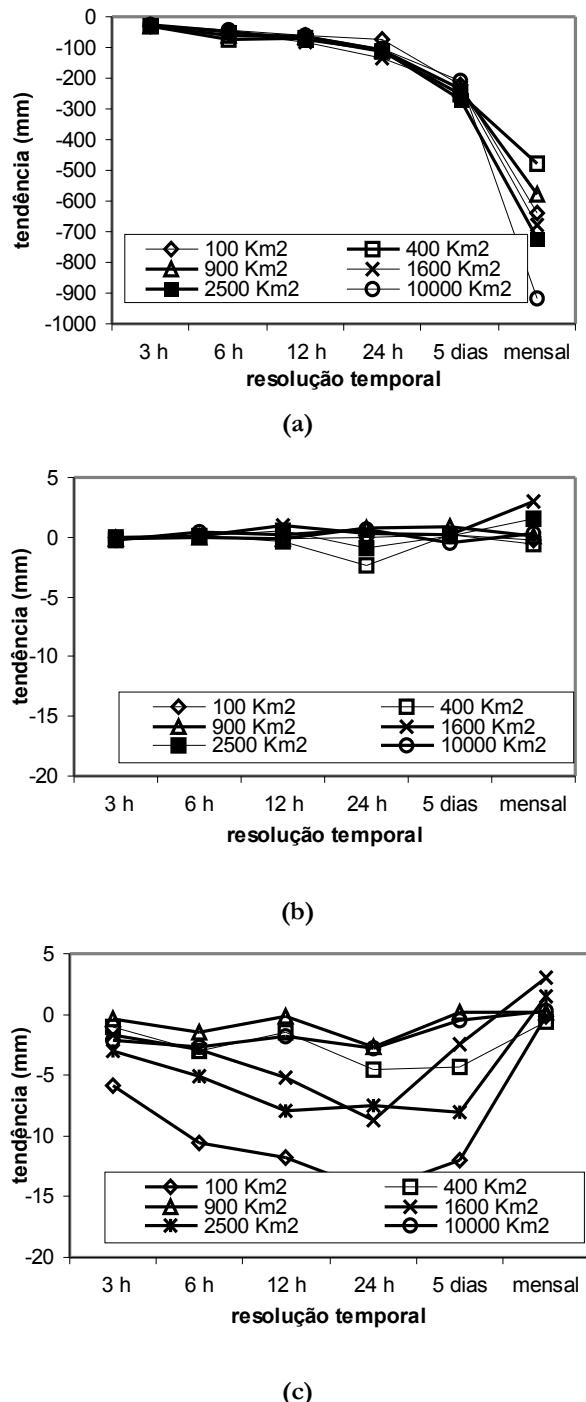


Figura 6 – Valores das tendências da (a) GPI, (b)  $\text{GPI}_d$  e (c)  $\text{GPI}_p$  em relação ao radar, para cada resolução temporal e área de estudo para a primeira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

A Figura 7 mostra os RMSE médios, em escala logarítmica, das técnicas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  com a diminuição da resolução temporal para várias áreas de estudo, da primeira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru. Com relação ao RMSE médio da GPI, nota-se que os valores mantêm-se quase constantes com a diminuição da resolução temporal, para todas as áreas de estudo. Verifica-se também que os valores do RMSE médios da GPI diminuem com o aumento da área estudada, de pelo menos 10 vezes entre a área de 100 Km<sup>2</sup> e 10000 Km<sup>2</sup>. Desta forma, pode-se afirmar que a GPI não pode ser aplicada para áreas menores que 900 Km<sup>2</sup> sem que haja a necessidade de sua calibração.

Com a utilização das taxas ótimas para cada combinação de resolução temporal e área (Figura 7b), nota-se que em relação a GPI, os RMSE da  $\text{GPI}_d$  diminuem de 40 vezes para a área de 100 Km<sup>2</sup> e 10 vezes para a área de 10000 Km<sup>2</sup>, mostrando valores em torno de 120 % para as áreas de 100 e 400 Km<sup>2</sup> e 60 % para as áreas restantes. A área de 10000 Km<sup>2</sup> apresenta os menores valores de RMSE médio, principalmente para as resoluções de 5 dias e mensal (27 %).

Os valores do RMSE médio da  $\text{GPI}_p$  (Figura 7c) diminuíram muito em relação a GPI e são um pouco maiores que os da  $\text{GPI}_d$ , variando em torno de 160 % e 27 %. Os RMSE médios da  $\text{GPI}_p$  apresentam leve diminuição com a diminuição da resolução temporal, sendo que os menores valores, obviamente são relativos à área de 10000 Km<sup>2</sup> e resoluções de 5 dias e mensal (27 %).

As correlações das estimativas de precipitação obtidas pelas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  apresentam os mesmos valores para cada resolução temporal, como pode ser visto na Figura 8. Isto mostra que a correlação não varia com a calibração da GPI. Para resoluções temporais maiores que 12 h, a área de 10000 Km<sup>2</sup> é que apresenta as maiores correlações. A maior correlação ocorre para a resolução mensal e área de 10000 Km<sup>2</sup> (88 %) enquanto que a menor é para 24 h e área de 400 Km<sup>2</sup> (47 %).

Comparando-se os resultados das tendências e dos RMSE médios e das correlações das técnicas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$ , verifica-se que as técnicas  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  apresentam menores tendências, menores RMSE médios e as mesmas correlações que a GPI. Deste modo, os desempenhos das  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  são superiores ao da GPI. Apesar da  $\text{GPI}_d$  apresentar-se um pouco melhor que a  $\text{GPI}_p$ , principalmente em relação a tendência (em torno de zero), a  $\text{GPI}_p$  pode ser utilizada com sucesso, pois além de ter desempenho superior a GPI, ela é mais fácil e rápida de ser utilizada. Esta facilidade se deve ao fato de que só é necessária a determinação da taxa ótima de precipitação mensal de cada área de estudo, que é quase igual para cada resolução temporal, conforme mostrado na Figura 1.

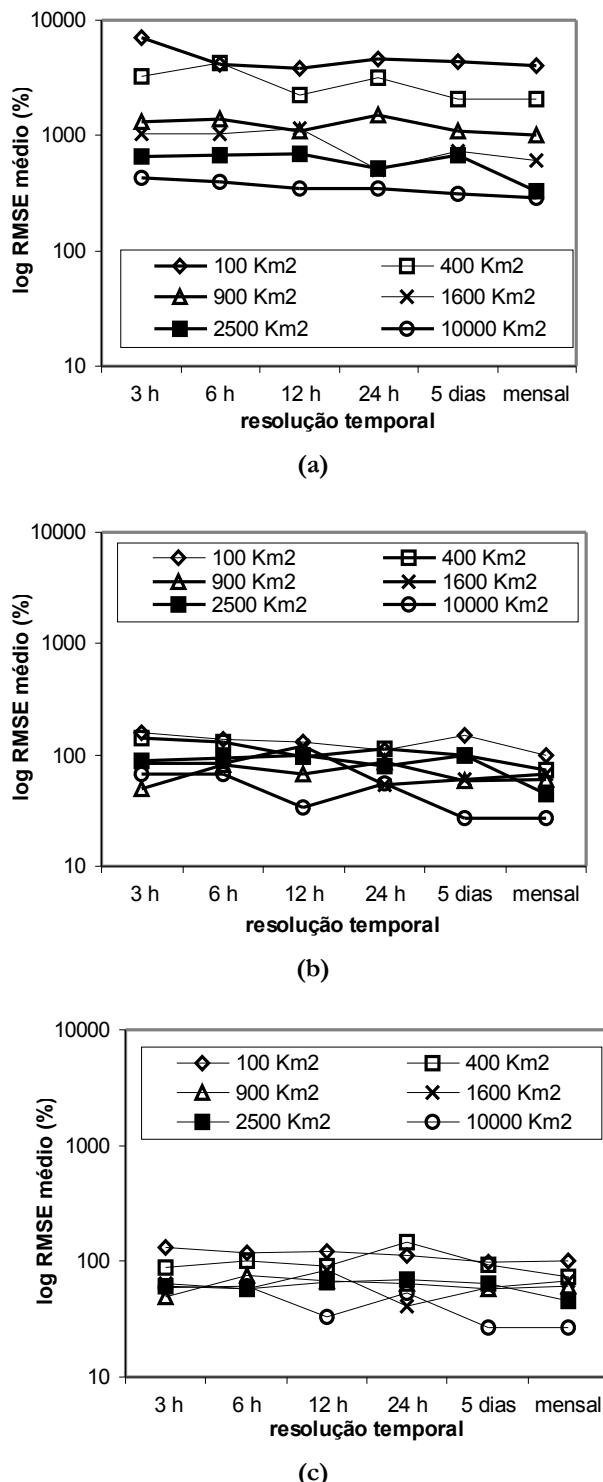


Figura 7 – Valores dos RMSE médio da (a) GPI, (b) GPI<sub>d</sub> e (c) GPI<sub>p</sub> em relação ao radar, para cada resolução temporal e área de estudo, para a primeira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

As técnicas GPI<sub>d</sub> e GPI<sub>p</sub> possuem melhor desempenho para a área de 10000 Km<sup>2</sup> e resolução mensal por apresentarem um menor afastamento dos valores ideais. Mesmo eliminando a tendência na GPI<sub>d</sub> ainda ocorre um RMSE médio variando de 113 % (para as menores resoluções temporais e áreas de estudo) a 27 % para resolução mensal e área de 10000 Km<sup>2</sup>, em relação aos dados de radar. A GPI<sub>p</sub> apresenta praticamente a mesma faixa de RMSE médio da GPI<sub>d</sub> entre 131 % para a área de 100 Km<sup>2</sup> e 27 % para resolução mensal e área de 10000 Km<sup>2</sup> em relação aos dados de radar. Os valores de RMSE médios das técnicas GPI<sub>d</sub> e GPI<sub>p</sub> ainda são 100 % maiores que a média das taxas de precipitação obtidas pelo radar, mesmo com a modificação da taxa e temperatura limiar.

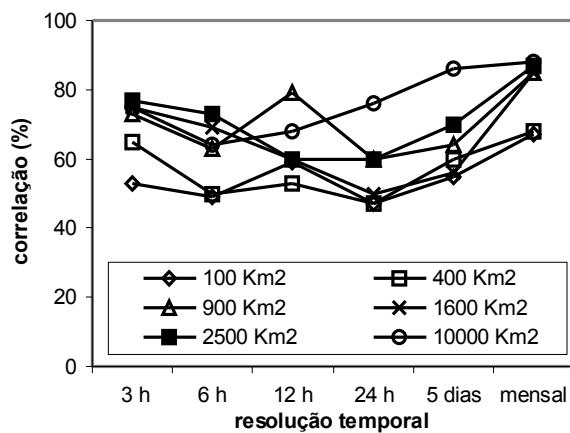


Figura 8 – Valores das correlações da GPI, GPI<sub>d</sub> e GPI<sub>p</sub> em relação ao radar, para cada resolução temporal e área de estudo, para a primeira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

### Segunda forma de amostragem espacial

As janelas de 100 a 10000 Km<sup>2</sup>, sem sobreposição de linhas e/ou colunas, foram analisadas para todos os pares de dados de radar meteorológico e as estimativas de precipitação obtidas pelas técnicas GPI, GPI<sub>d</sub> e GPI<sub>p</sub> para as várias combinações de resolução temporal e área de estudo.

A variação da taxa ótima de precipitação com a diminuição da resolução temporal para várias janelas, para a segunda forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru é apresentada na Figura 9. Observa-se que as taxas ótimas de precipitação são crescentes com a variação da resolução temporal e o intervalo entre as taxas ótimas de precipitação diminui com a diminuição da resolução temporal para todas as janelas. Além disso, nota-se que as taxas ótimas de precipitação são iguais em 12 h,

para as janelas entre 100 e 1600 Km<sup>2</sup>. Nota-se que todos os valores encontrados para todas as combinações de janelas e resoluções temporais são inferiores aos 3 mm/h da GPI, já que este valor foi calibrado para a Flórida, EUA.

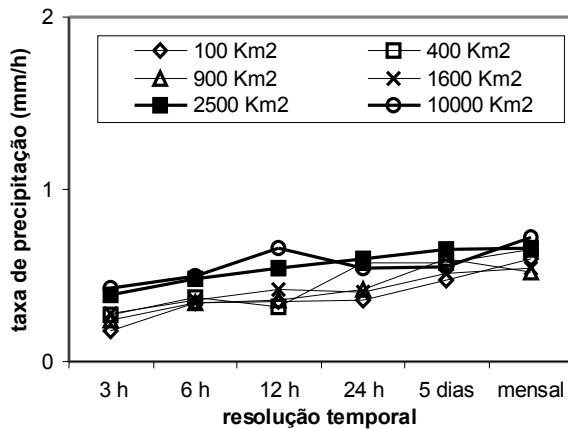


Figura 9 – Valores das taxas ótimas de precipitação correspondentes às equações de tendência ótima encontradas, modificando-se a taxa de precipitação original da GPI (3 mm/h), para cada resolução temporal e janela, para a segunda forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

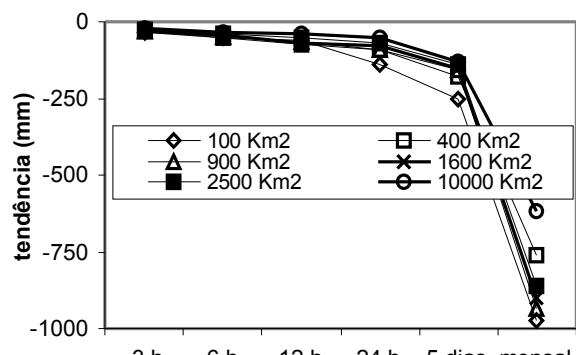
As taxas ótimas de precipitação mensal de cada janela utilizadas pela GPI<sub>p</sub>, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Taxa óptima de precipitação mensal da GPI para várias janelas, para a segunda forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

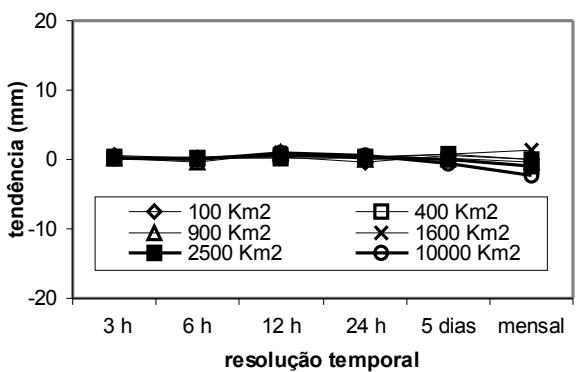
Área de Estudo (km <sup>2</sup> )	Taxa óptima de precipitação mensal (mm/h)
100	0,65
400	0,65
900	0,52
1600	0,54
2500	0,66
10000	0,72

A variação das tendências das técnicas GPI, GPI<sub>d</sub> e GPI<sub>p</sub> com a diminuição da resolução temporal para várias janelas, da segunda forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru são apresentadas na Figura 10. Verifica-se que todas as tendências da GPI decrescem com a diminuição da resolução temporal, havendo uma superestimativa em relação ao radar. Nota-se também que as maiores variações das tendências em relação a tendência ótima, ocorrem para a resolução mensal e janela de 100 Km<sup>2</sup> e as menores para 3 h e janela de 10000 Km<sup>2</sup>. Além disso, a diferença entre as tendências da GPI para as janelas cresce com aumento da resolução temporal, principalmente para a mensal. Após a resolução

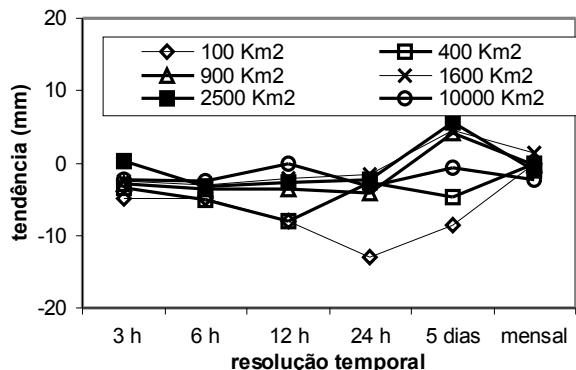
de 24 h, verifica-se que as tendências apresentam um comportamento exponencial, para todas as janelas, sendo necessário a adequação da GPI.



(a)

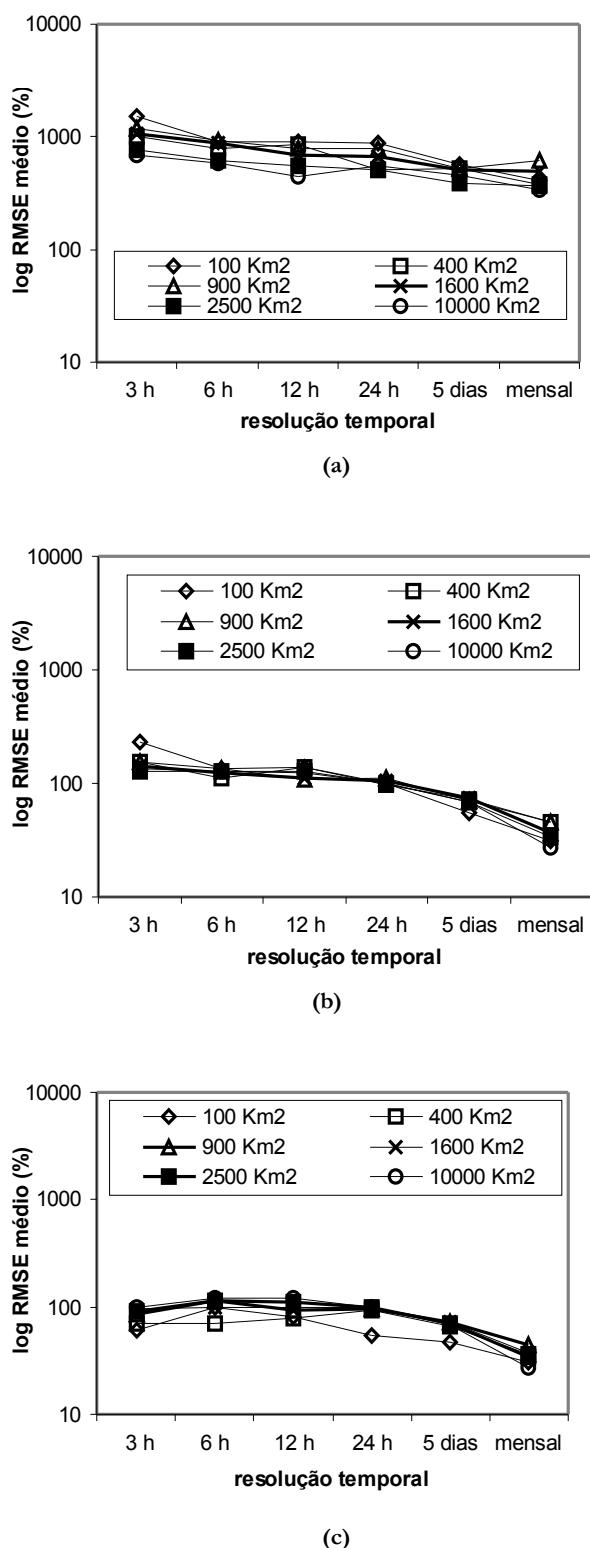


(b)



(c)

Figura 10 – Valores de tendências da (a) GPI, (b) GPI<sub>d</sub> e (c) GPI<sub>p</sub> em relação ao radar, para cada resolução temporal e janela, para a segunda forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.



**Figura 11 – Valores dos RMSE médio da (a)GPI, (b) GPI<sub>d</sub> e (c) GPI<sub>p</sub> em relação ao radar, para cada resolução temporal e janela, para a segunda forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.**

Como foram utilizadas as taxas ótimas de precipitação de cada combinação de janela e resolução temporal na GPI<sub>d</sub> (Figura 10b), todas as tendências encontradas são próximas de zero. Nota-se que os maiores diferenças entre as tendências ocorreram para a resolução mensal. Como esperado, a GPI<sub>d</sub> apresenta menores tendências que a GPI.

A leve superestimativa das taxas de precipitação obtidas pela GPI<sub>p</sub> ocorre para a maioria das combinações de janelas e resolução temporal (Figura 10c). Observa-se que as diferenças das tendências da GPI<sub>p</sub> em relação a ótima são menores para as resoluções de 3 h e mensal e janelas de 900 Km<sup>2</sup> e 10000 Km<sup>2</sup> e a maior para 24 h e área de estudo de 100 Km<sup>2</sup>. As tendências da GPI<sub>p</sub> são um pouco maiores do que as da GPI<sub>d</sub> mas são muito menores que as da GPI. Esta observação se aplica principalmente para as resoluções temporais maiores que 24 h.

A Figura 11 mostra os RMSE médios das técnicas GPI, GPI<sub>d</sub> e GPI<sub>p</sub>, em escala logarítmica, para várias janelas, da segunda forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru. Nota-se que os valores do RMSE médio da GPI são ligeiramente decrescentes com a diminuição da resolução temporal. Além disso, os valores do RMSE médio diminuem com o aumento da janela, mas esses tendem para um mesmo valor para as resoluções de 5 dias e mensal, não havendo a influência da janela. Outro ponto importante é que os valores do RMSE médio da GPI são maiores que 337 % (mensal e 10000 Km<sup>2</sup>) em relação ao valor da média dos dados de radar.

Devido à utilização das taxas de precipitação apropriadas para cada combinação de janela e resolução temporal, os RMSE médios da GPI<sub>d</sub> apresentam uma diminuição com a diminuição da resolução temporal, com valores em torno de 35 a 100 % (Figura 11b). Nota-se que um mesmo valor de RMSE médio da GPI<sub>d</sub> para a resolução mensal para todas as janelas estão em torno de 35 %. Entre 24 h e 5 dias, exceto 100 Km<sup>2</sup>, todos os valores de RMSE médios da GPI<sub>d</sub> são iguais. Comparando-se os intervalos dos RMSE médios da GPI e da GPI<sub>d</sub> nota-se uma substancial diminuição do erro da GPI<sub>d</sub> em relação a GPI.

Com a utilização da taxa mensal ótima (Figura 11c), verifica-se que os valores do RMSE médio da GPI<sub>p</sub> se mantêm no mesmo intervalo de valores que os valores da GPI<sub>d</sub>, apresentando maior aproximação entre as janelas para as resoluções de 6 a 24 h. Todos os valores de RMSE da GPI<sub>p</sub> estão em torno de 100 % entre 3 e 12 h, 80 % para 24 h, 65 % para 5 dias e 35 % para a resolução mensal.

As correlações das técnicas GPI, GPI<sub>d</sub> e GPI<sub>p</sub> em relação aos dados de radar, para a segunda forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru

são mostradas na Figura 12. Deve-se ressaltar que as correlações das estimativas obtidas pelas técnicas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$ , em relação aos dados de radar, apresentam os mesmos valores em cada resolução temporal. Assim, a correlação é independente da regionalização da GPI. Nota-se também que as maiores correlações encontradas ocorrem na resolução mensal, principalmente para a janela de 10000 Km<sup>2</sup> (77 %) e as menores ocorrem nas resoluções de 12 h (35 %) e 24 h (37 %). Destaca-se que não existe uma janela particular que envolve somente as maiores ou as menores correlações.

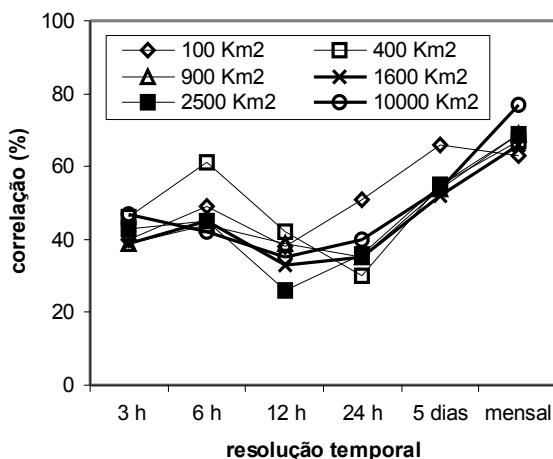


Figura 12 – Valores das correlações da GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  em relação ao radar, para cada resolução temporal e área de estudo, para a segunda forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

As técnicas  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  apresentam menores tendências, RMSE médios e a mesmas correlações que a GPI. Uma comparação entre a  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  revela que as tendências da primeira (técnica otimizada) são mais próximas de zero que as da segunda e que os RMSE médios das duas técnicas são similares. Assim, conclui-se que a  $\text{GPI}_p$  possibilita a obtenção de estimativas de precipitação com qualidade relativamente boa, uma vez que sua utilização demanda menor tempo de processamento pois determina-se apenas a taxa ótima de precipitação mensal para cada janela. Mesmo eliminando a tendência ainda existe um RMSE médio variando de 27 %, para a resolução mensal e área de 10000 Km<sup>2</sup> a 90 %, para as menores resoluções temporais e áreas de estudo, em relação aos dados de radar para a  $\text{GPI}_d$ , enquanto que para a  $\text{GPI}_p$ , a variação é de 27 % a 150 %.

### Terceira forma de amostragem espacial

A Figura 13 mostra as taxas de precipitação ótimas com a diminuição da resolução temporal para várias

janelas, para a terceira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

Observa-se que as taxas ótimas de precipitação são crescentes com a variação da resolução temporal e o intervalo entre as taxas de precipitação das várias janelas decresce com a diminuição da resolução temporal, apresentando as maiores taxas ótimas para a janela de 10000 Km<sup>2</sup>. Para as resoluções de 24 h e mensal, a influência da janela é quase nula, já que os valores são quase coincidentes para todas as janelas. Todos os valores encontrados para todas as combinações de janelas e resoluções temporais são inferiores a 3 mm/h para a GPI. As taxas ótimas de precipitação mensal das áreas, utilizadas pela  $\text{GPI}_p$ , estão apresentadas na Tabela 3.

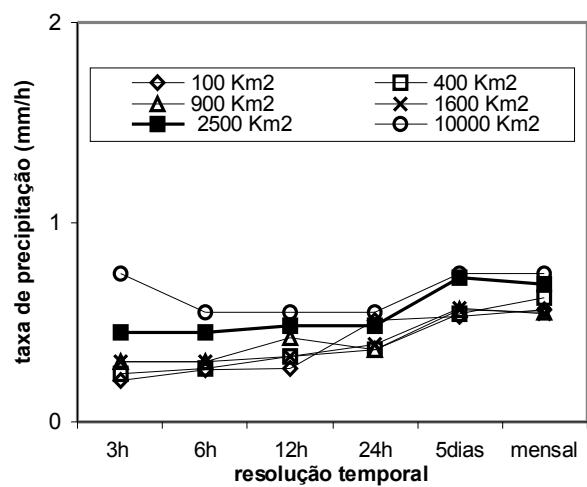


Figura 13 – Valores das taxas ótimas de precipitação correspondentes às equações de tendência ótima obtidas, modificando-se a taxa de precipitação original da GPI (3 mm/h), para cada resolução temporal e janela, para a terceira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

Tabela 3 – Taxa ótima de precipitação mensal para várias janelas, para a terceira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

Área de Estudo (km <sup>2</sup> )	Taxa ótima de precipitação mensal (mm/h)
100	0,56
400	0,62
900	0,55
1600	0,54
2500	0,69
10000	0,74

A Figura 14 apresenta as tendências das técnicas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  com a diminuição da resolução temporal para várias janelas, para a terceira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru. Observa-se que as tendências da GPI decrescem negativamente com a diminuição da resolução temporal, havendo uma superestimativa da GPI em relação aos dados de radar. As maiores variações das tendências em relação à ótima são verificadas para a resolução mensal e para a janela de 100 Km<sup>2</sup>, enquanto que as menores para 3 h e para a janela de 10000 Km<sup>2</sup>. As tendências da GPI apresentam comportamento exponencial após a resolução de 24 h, mostrando a necessidade da GPI ser calibrada para todas as janelas. A dispersão dos valores para a resolução mensal diminui entre a forma de amostragem espacial 2 (Figura 10a) e 3 (Figura 14a), devido à compensação dos erros de amostragem de precipitação com a utilização da sobreposição de linhas e colunas. Como foram utilizadas as taxas ótima de precipitação para cada combinação de janela e resolução temporal, todas as tendências encontradas na  $\text{GPI}_d$  são próximas de zero (Figura 14 b).

Como a maioria das tendências são negativas, há uma leve superestimativa da  $\text{GPI}_p$  em relação aos dados de radar (Figura 5.14c). Observa-se também que as diferenças das tendências da  $\text{GPI}_p$  em relação à ótima são menores para as resoluções de 3 h e mensal e a maior para 24 h. Os afastamentos das tendências da  $\text{GPI}_p$  em relação à ótima são maiores do que os da  $\text{GPI}_d$ . Porém, estes valores, que estão na faixa de -13 a 3 mm, são muito menores do que os da GPI, que apresentam variação de - 26 e - 950 mm. Nota-se que as tendências para 3 h e mensal são iguais para todas as janelas, mostrando que para essas resoluções não ocorre a influência da janela.

A Figura 15 mostra os valores dos RMSE médios, em escala logarítmica, das GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  com a diminuição da resolução temporal para várias janelas, para a terceira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru. Os RMSE médios da GPI são decrescentes com a diminuição da resolução temporal. Outro ponto importante é que os valores do RMSE médio da GPI são pelo menos 320 % maiores do que o da média dos dados de radar.

Com o emprego das taxas de precipitação apropriadas para cada combinação de janela e resolução temporal (Figura 15 b), os RMSE médios da  $\text{GPI}_d$  diminuíram significantemente em comparação com a GPI. Esses valores diminuem levemente com a diminuição da resolução temporal. Nota-se também que os valores da  $\text{GPI}_d$  se encontram entre 28 e 100 % em relação à média do radar. Verifica-se que esses valores tendem a 28 % para a resolução mensal, para todas as janelas, não ocorrendo influência do tamanho da janela.

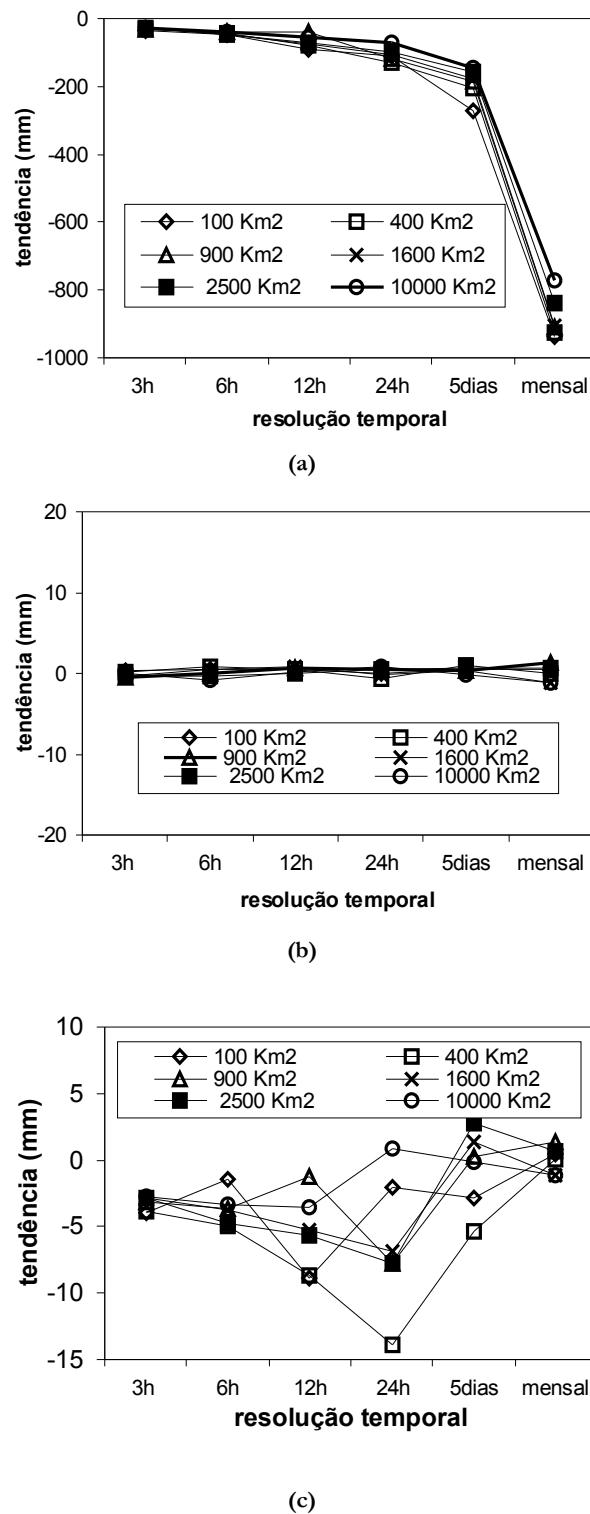


Figura 14 – Valores das tendências da (a) GPI, (b)  $\text{GPI}_d$  e (c)  $\text{GPI}_p$  em relação ao radar, para cada resolução temporal e janela, para a terceira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

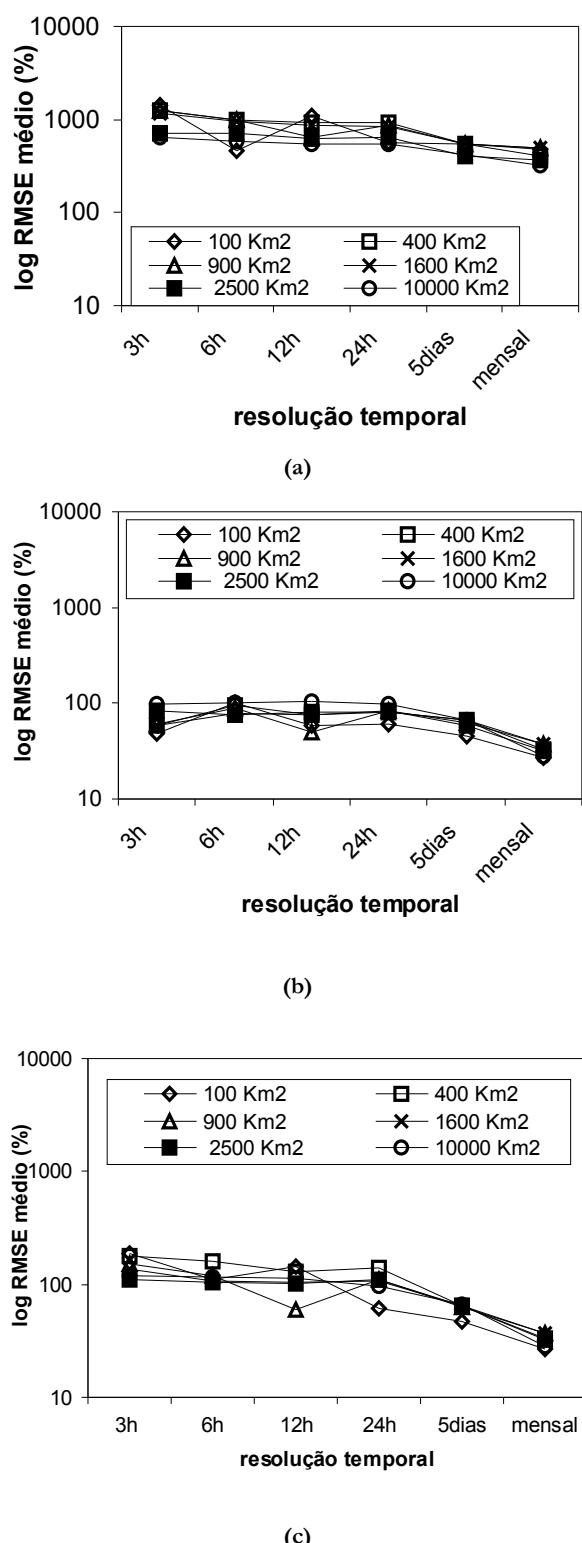


Figura 15 – Valores de RMSE médio da (a) GPI, (b)  $\text{GPI}_d$  e (c)  $\text{GPI}_p$  em relação ao radar, para cada resolução temporal e janela, para a terceira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

Com a utilização da taxa mensal ótima, verifica-se que os valores dos RMSE médios da  $\text{GPI}_p$  se mantêm no mesmo intervalo que os valores da  $\text{GPI}_d$ , havendo também uma diminuição dos valores com a diminuição da resolução temporal. Além disso, nota-se que os RMSE médios da  $\text{GPI}_p$  apresentam os menores valores para a resolução mensal (32 %). O intervalo dos RMSE médios da  $\text{GPI}_p$  é de 32 a 190 % em relação à média dos valores dos dados de radar.

Comparando-se os RMSE médios das três técnicas, nota-se uma diminuição dos valores da  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  em relação à GPI. Comparando-se os resultados das tendências e dos RMSE médios das técnicas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$ , verifica-se que as técnicas  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  apresentam um desempenho melhor em relação à GPI. As tendências da  $\text{GPI}_d$  são mais próximas de zero do que as da  $\text{GPI}_p$  e os RMSE médios das duas técnicas são bastante próximos.

As correlações das técnicas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  com a diminuição da resolução temporal para as várias janelas utilizadas, são mostradas na Figura 16.

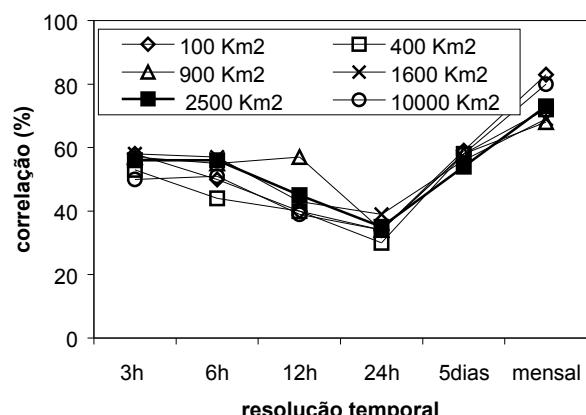


Figura 16 – Valores das correlações da GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  em relação ao radar, para cada resolução temporal e área de estudo, para a terceira forma de amostragem espacial, referente ao caso do radar de Bauru.

As correlações das estimativas de precipitação das técnicas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  em relação aos dados de radar apresentam os mesmos valores para cada resolução temporal. Isto mostra que o desempenho das técnicas regionalizadas em relação à GPI não é influenciado pela correlação. Nota-se que as maiores correlações encontradas são para a resolução mensal (77 %) e os menores para a resolução de 24 h (34 %). O intervalo entre as correlações das várias janelas é pequeno, principalmente para as resoluções de 24 h e 5 dias. As correlações decrescem entre 3 e 24 h, e posteriormente crescem para as resoluções de 5 dias e mensal.

As tendências e os RMSE médios da  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  diminuíram com a modificação da GPI, apesar da correlação não variar. Assim, a  $\text{GPI}_p$  foi escolhida por possuir menor tempo de processamento pois só é necessário calcular a taxa ótima de precipitação mensal. Observa-se que, mesmo com as tendências da  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  otimizadas, ainda existe RMSE médio que varia de 89 % para 6 h a 32 % para resolução mensal; e de 150 % para 3 h a 32 % para resolução mensal, respectivamente. A Figura 17 apresenta as estimativas mensais de precipitação da  $\text{GPI}_p$  e do radar para a janela de 10000 Km<sup>2</sup>. Verifica-se que as taxas de precipitação da técnica GPI e do radar apresentam a mesma faixa de valores entre 0 e 450 mm.

A Figura 17a apresenta uma faixa de taxa de precipitação igual a zero acima de 21,1° S, devido a falta de dados de satélite nesta região. Nota-se, também, que a GPI apresenta duas áreas com taxa de precipitação entre 300 e 350 mm entre 22,3 e 23,4° S e 49,7 e 50,6 ° W, e 23,1 e 24° S e 47,7 a 47° W. Entretanto, a Figura 17b apresenta as maiores taxas de precipitação do radar (acima de 300 mm) na região que abrange o leste ao sul da imagem, sendo que os núcleos mais precipitantes estão em torno de 22,5° S e 46,8° W e 23,8° S e 47,5° W. Comparando-se as duas imagens, pode-se verificar que ambas apresentam apenas um dos núcleo mais precipitantes na mesma posição (23,8° S e 47,5° W). As regiões menos precipitantes ficam de 20,75 a 21,9° S para todas as longitudes estudadas.

## CONCLUSÕES

Inicialmente, determinou-se a temperatura limiar de chuva e não chuva, através do uso de imagens de satélite meteorológico e dados de radar meteorológico. A temperatura limiar entre chuva e não chuva para Bauru foi de 235 K. Neste caso, não foi necessária a modificação da temperatura limiar nas técnicas adaptadas, já que a temperatura limiar da GPI também é de 235 K.

A taxa ótima de precipitação para a GPI foi encontrada de tal forma que a tendência fosse próxima de zero em função da variação espacial e temporal. Assim, também foram modificadas as taxas de precipitação da GPI, criando-se as técnicas  $\text{GPI}_d$ . Analisando-se todos os valores encontrados de taxas de precipitação, notou-se que todos são menores que da GPI (3 mm/h) no caso de Bauru.

A técnica  $\text{GPI}_p$ , criada a partir da substituição da taxa de precipitação ótima mensal para todas as outras resoluções temporais e para cada área/janela também foi analisada. Assim, os desempenhos estatísticos das técnicas originais e adaptadas em relação aos dados de radar foram estudados para três formas de amostragem espacial e duas áreas de estudo. As três formas de amostragem espacial analisadas foram a variação da área central da imagem;

divisão da imagem em janelas de vários tamanhos sem sobreposição de linhas e colunas; e divisão da imagem em janelas de vários tamanhos mas com sobreposição de linhas e colunas.

A superestimativa da GPI em relação aos dados de radar ocorreu para todas as combinações espaciais e temporais testadas. Normalmente, as menores variações de tendência em relação à ótima são encontradas para a maior área/janela de estudo (10000 Km<sup>2</sup>) e menor resolução temporal (3 h), enquanto que o afastamento da tendência zero é máximo para a menor área/janela (100 Km<sup>2</sup>) e maior resolução temporal (mensal). Com esses resultados, nota-se a necessidade de adaptação das técnicas GPI, principalmente para a resolução mensal. Como esperado, as tendências da técnica adaptada com as taxas ótimas de cada combinação temporal e espacial,  $\text{GPI}_d$ , se encontram muito próximas de zero. Já com a utilização das taxas ótimas de precipitação mensal,  $\text{GPI}_p$ , as tendências se afastam um pouco de zero, havendo uma suave superestimativa em relação aos dados de radar. Entretanto, os valores das tendências de  $\text{GPI}_p$  são na maioria dos casos muito mais próximos das tendências das  $\text{GPI}_d$  do que das GPI.

Os RMSE médios da GPI do radar de Bauru são quase constantes com o aumento da resolução temporal e diminuem com o aumento da área de estudo para a forma de amostragem espacial 1. Por outro lado, eles são ligeiramente decrescentes com o aumento da resolução temporal e diminuem com o aumento da janela para as formas de amostragem espacial 2 e 3. Os valores dos RMSE médios da  $\text{GPI}_d$  estão próximos de 100 %, havendo, em relação aos RMSE médios da GPI para a forma de amostragem espacial 1, uma diminuição de 40 vezes para as áreas de 100 Km<sup>2</sup> e 10 vezes para a área de 10000 Km<sup>2</sup>. Para as formas de amostragem espacial 2 e 3, ocorre uma diminuição do RMSE médio da  $\text{GPI}_d$  (entre 30 a 100 %) com o aumento da resolução temporal, sendo que todas as janelas tendem a apresentar um mesmo valor na resolução mensal. Assim como para a  $\text{GPI}_d$ , os RMSE médios da  $\text{GPI}_p$  são próximos ou iguais a 100 %, sendo que os menores valores referem-se a resolução mensal, para as três formas de amostragem espacial.

Conclui-se também que, apesar da técnica  $\text{GPI}_d$  apresentar tendências próximas de zero, os RMSE médios ainda estavam em torno de 40 % para mensal e 100 % para as outras resoluções temporais, para todas as combinações temporais e espaciais, para as três formas de amostragem espacial estudadas.

Todas as correlações das técnicas GPI,  $\text{GPI}_d$  e  $\text{GPI}_p$  são iguais para cada resolução temporal, em todas as formas de amostragem espacial estudadas. Assim, este comportamento mostra que a correlação, neste estudo, não foi uma variável determinante para a escolha da melhor técnica de estimativa de precipitação, pois não há variação

dos valores entre as técnicas originais e as adaptadas com a regionalização das técnicas.

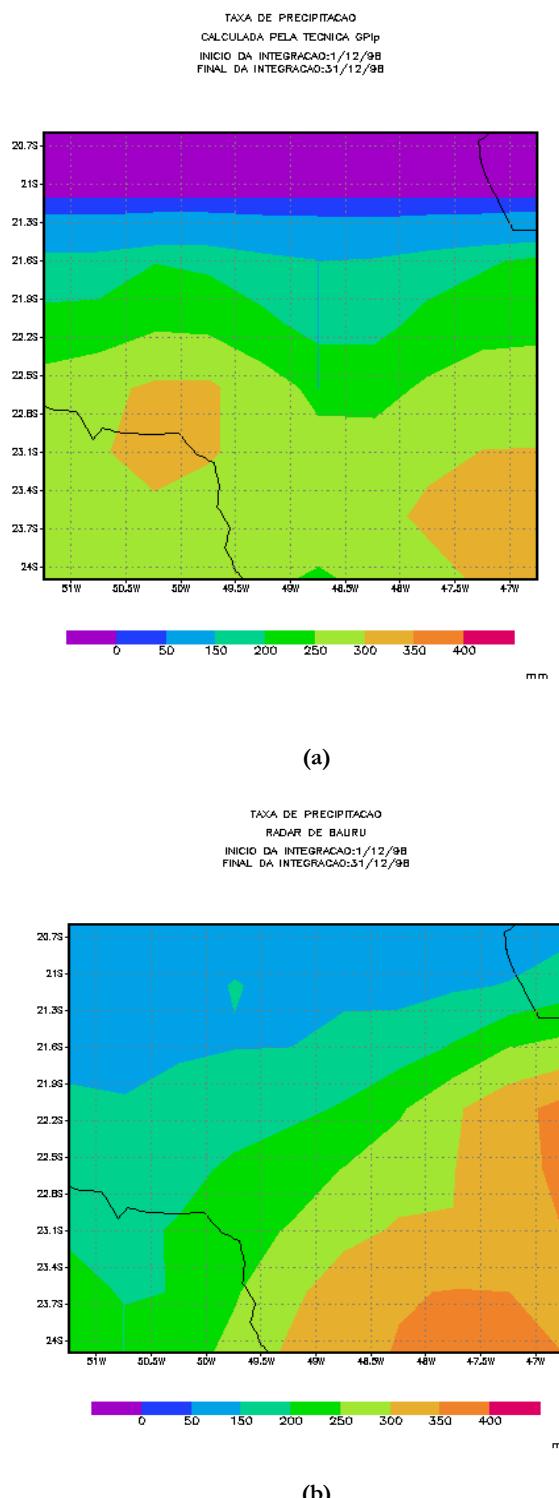


Figura 17 – Estimativas mensais de precipitação, para a janela de 10000 Km<sup>2</sup>: (a) GPI<sub>p</sub> e (b) radar de Bauru.

Apesar das correlações não sofrerem modificações, os RMSE médios e as tendências diminuíram para as técnicas GPI<sub>d</sub> e GPI<sub>p</sub> em relação aos resultados da GPI, para todas as formas de amostragem espacial estudadas e para ambas as áreas de estudo.

Mesmo a GPI<sub>d</sub> apresentando um desempenho um pouco superior ao da GPI<sub>p</sub>, esta técnica estima a precipitação de forma mais simples e com qualidade relativamente boa, uma vez que sua utilização demanda menor tempo de processamento, pois utiliza somente a taxa ótima mensal para cada janela. Desta forma, recomenda-se a utilização da GPI<sub>p</sub> para estimar a taxa de precipitação.

A forma de amostragem espacial 1 (área central) apresenta valores muito grandes de tendência e RMSE médio principalmente para pequenas áreas/janela. Para as formas de amostragem espacial 2 (deslocada) e 3 (deslocada com sobreposição), nota-se este mesmo comportamento, mas não tão acentuado como para a forma de amostragem 1. Com relação às três formas de amostragem espacial estudadas, pode-se notar que a forma de amostragem espacial 3 é a que apresenta menor afastamento entre as curvas das diversas áreas/janelas pois a influência da diferença da amostragem de dados de radar e satélite decresce, dando melhor continuidade dos campos.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio financeiro e auxílio técnico da FAPESP, com o fornecimento dos dados de satélite meteorológico pelo CPTEC/INPE, e dos dados de radar meteorológico pelo IPMET/UNESP.

## REFERÊNCIAS

- ADLER, R.F.; HUFFMAN, G.F. KEEHN, P.R., “Global tropical rain estimates from microwave-adjusted geosynchronous IR data.” *Remote Sensing Reviewa*, Vol. 11, No.1-4, 1994, pp. 208-296.
- ADLER, R.F., NEGRI, A.J. “A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall.” *Journal of Climate Applied Meteorology*, Vol. 27, No. 1, 1988, pp. 30-51.
- ARKIN, P.A., “The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over the B-scale array”, *Monthly Weather Review*, Vol. 107, No.10, 1979, pp.1382-1387.
- ARKIN, P.A., Ardanuy, P.E. “Estimating climatic-scale precipitation from space: a review.” *Journal of Climate*, Vol. 2, No. 11, 1989, pp.1229-1238.
- ARKIN P.A.; MEISNER B.N., “The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over Western

- Hemisphere during 1982-84”, *Monthly Weather Review*, Vol. 98, No. 10, 1987, pp.51-57.
- ARKIN, P.A.; XIE, P. “The global precipitation climatology project: first algorithm intercomparasion project.” *Bulletin American Meteorology Society*, Vol. 75, 1994, pp.401-419.
- AUSTIN, P.M. “Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall.” *Monthly Weather Review*, Vol. 115, 1987, pp.1053-1070.
- BARRETT, E.C.; BEAUMONT, M.J. “The estimation of global monthly mean rainfall using infrared satellite data: the GOES Precipitation Index (GPI)” *Remote Sensing Reviews*, Vol.11, 1994, pp.107-124.
- BARRETT, E.C.; MARTIN, D.W. “The use of satellite data in rainfall monitoring.” Academic Press, 340 pp, 1981.
- CARVALHO, L.M.V.C; MASSAMBANI, O. “A temperatura mínima local em imagens IV e a precipitação via radar em eventos semi-estacionários.” In: Congresso Brasileiro de Meterorologia, 6., Manaus, 1992. *Anais. Sociedade Brasileira de Meteorologia*, 1992, v.2, p.743-747.
- D'SOUZA, G.; BARRETT, E.C.; POWER, C.H. “Satellite rainfall estimation techniques using visible and infrared imagery.” *Remote Sensing Reviews*, Vol.4, No. 2, 1990, pp.379-414.
- FERRARO, R.R.; GRODY, N.C.; MARKS, G.F. “Effects of surface conditions on rain identification using SSM/I.” *Remote Sensing Reviews*, Vol. 11, No. 1-4, pp. 195-209, 1994.
- HUFFMAN, G.J.; ADLER, R.F.; ARKIN, P.; CHANG, A., FERRARO, R.; GRUBER, A., JANOWIAK, J.; MCBAH, A.; RUDOLF, B.; SCHNEIDER, U. “The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset.” *Bulletin American Meteorology Society*, Vol. 78, 1997, pp.5-20.
- JOBBARD, I.; DEBOIS, M. “Satellite estimation of the tropical precipitation using the METEOSAT and SSM/I data.” *Atmospheric Research*, Vol. 34, 1994, pp. 285-298.
- KING, P.W.S.; HOGG, W.D.; ARKIN, P.A. The role of visible data in improving satellite rain-rate estimates. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, No. 8, 1995, pp.1608-1621.
- KUMMEROW, C.; OLSON, W.S.; GIGLIO, L. “A Simplified scheme for obtaining precipitation and vertical hydrometeor profiles from passive microwave sensors”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 35, No. 5, 1996, pp. 1213-1232.
- MARSHALL, T.S.; PALMER, W.McK., “The distribution of raindrops with size.” *Monthly Weather Review*, Vol.5, No. 1, 1948, pp.165-166.
- MARTIN, D.W.; GOODMAN, B.; SCHMIT, T.J. “Estimates of daily rainfall over the Amazon Basin.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No.D10, 1990, pp. 17043-17050.
- MARTIN, D.W.; SCHERER, W.D. “Review of satellite rainfall estimation methods.” *Bulletin American Meteorology Society*, Vol.54, No. 6, 1973, pp. 661-674.
- MORAES, J.C.; FERREIRA, M.E.; CONFORTI, J.C. “Estimativa de precipitação por meio de satélite: uma avaliação das técnicas CST, NAW e ARKIN. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 8., Foz de Iguaçu, 1989. *Anais. Foz de Iguaçu*, 1989, v.1, p.389-395.
- MORRISEY, M.L.; GREENE, J.S. “Comparison of two satellite-based rainfall algoritms using Pacific atoll raingage data.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32 , No.2, 1993, pp.411-425.
- NEGRI, A. J., ADLER, R.F., e WETZEL, P.J. “Rain estimation of the Griffith Woodley Tecnique”, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 23, No.1 ,1984, pp.102-116.
- NEGRI, A. J., ADLER, R.F. “An intercomparison of three satellite infrared rainfall techniques over Japan and surroundings waters”. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 32, No.2, 1993, pp.357-373.
- OLIVEIRA, J.L.; *Comparações entre as medidas de precipitação estimadas através do sensor SSM/I e a correspondente estrutura tridimensional inferida via radar meteorológico*. São José dos Campos, 100p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.
- OLSON, W.S.; KUMMEROW, C.D.; HEYMESFIELD, G.M.; GIGLIO, L. “A method for combined passive-active microwave retrievals of cloud and precipitation profiles.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 35, No. 2 ,1996, pp. 1763-1789.
- RICHARDS, F.; ARKIN, P. A., “On the relationship between satellite observed cloud cover and precipitation”, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 104, 1981, pp.1081-1093.
- SCOFIELD, G. B. “Estimativa de precipitação sobre a região de São Paulo utilizando a Técnica Convectiva Estratiforme.” Tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto, INPE, São José dos Campos, 1994, INPE-5667-TDI/560.
- SCOFIELD, R. A.; OLIVER, V.J. “A scheme for estimating convective rainfall from satellite imagery.” Washington, D.C. NOAA-NESS, 47 p., 1977. (NOAA Technical Memorandum NESS 86).
- SIMPSON, J. ADLER, R.F.; NORTH, G.R. “A proposed tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite.” *Bulletin American Meteorology Society*, Vo. 69, No. 3, 1988, pp. 278-295.
- SMITH, E.; LAMM, J.; ADLER, R.; ALISHOUSE, J.; AONASHI, K; BARRETT, E.; BAUER, P.; BERG, W.; CHANG, A.; FERRARO, R.; FERIDAY, J.; GOODMAN, S.; GRODY, N.; KIDD, C.; KUMMEROW, C.; LIU, G.; MARZANO, F.; MUGNAI, A.; WILHEIT, T. “Results of WetNet PIP-

- 2 Project.” *Journal Atmospheric Ocean Technology*, Vol. 55, 1998, pp.1483-1536.
- WILHEIT, T.; CHANG, A.; CHIU, L. “Retrieval of monthly rainfall indices from microwave radiometric measurements using probability distribution function.” *Journal Atmospheric Ocean Technology*, Vol. 8, 1991, pp.118-136.
- WOODLEY, W.L.; OLSEN, A.,R.; HERDON, A.; WIGGERT, V. “Comparison of gauge and radar methods of convective rain measurements.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 14, No. 8, 1975, pp.909-928.

**Evaluation of the Estimation of the Precipitation Index, GPI, in the Radar-Covered Area In Bauru, SP**

**ABSTRACT**

This study evaluates the satellite technique used to estimate precipitation by GPI (Global Precipitation Index) and two adapted versions, GPI<sub>d</sub> and GPI<sub>p</sub>, on the various temporal and spatial scales over the continental area. The temporal scales analyzed varied from 3 h to one month, while the spatial scale ranged from 100 to 10000 square km. The study area was the interior of the state of São Paulo, using infrared images from the Geostationary Operational Environmental Satellite 8 (GOES-8) and CAPPI data of the meteorological radar in Bauru. The GPI results and its two versions were compared to the meteorological radar data from Bauru, and the tendency, root mean square error (RMSE) and correlation for several temporal and spatial combinations for three different forms of spatial sampling. For most combinations, the optimum rates found presented smaller values than those found for the GPI. Moreover, the GPI technique overestimates the precipitation rates as compared with the radar data, while the GPI<sub>p</sub> technique slightly overestimates the precipitation rates as compared to the radar data. It was also concluded that, with small adaptations of the threshold temperature of rain and non-rain, and the precipitation rate, it is possible to estimate the precipitation with lower tendencies and mean RMSE for temporal resolutions from 3 h to monthly and areas of 100 to 10000 squ.km. for the three forms of spatial sampling analyzed.

Key words: Precipitation, GPI, spatial scales.