

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**GEOESTATÍSTICA APLICADA À ACUMULAÇÃO DA
PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA COM RADAR
METEOROLÓGICO**

CARLOS ALBERTO DE AGOSTINHO ANTONIO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP
Agosto – 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**GEOESTATÍSTICA APLICADA À ACUMULAÇÃO DA
PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA COM RADAR
METEOROLÓGICO**

CARLOS ALBERTO DE AGOSTINHO ANTONIO

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Célia Regina Lopes Zimback

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP
Agosto – 2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: "GEOESTATÍSTICA APLICADA À ACUMULAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO
PLUVIOMÉTRICA COM RADAR METEOROLÓGICO"**

ALUNO: CARLOS ALBERTO DE AGOSTINHO ANTONIO

ORIENTADORA: PROFA. DRA. CELIA REGINA LOPES ZIMBACK

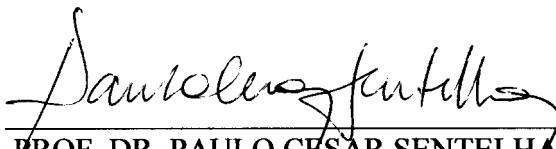
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROFA. DRA. CELIA REGINA LOPES ZIMBACK



PROF. DR. CARLOS ALBERTO OLIVEIRA DE MATOS



PROF. DR. PAULO CÉSAR SENTELHAS

Data da Realização: 24 de agosto de 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

A635g Antonio, Carlos Alberto de Agostinho, 1960-
Geoestatística aplicada à acumulação da precipitação pluviométrica com radar meteorológico / Carlos Alberto de Agostinho Antonio. - Botucatu : [s.n.], 2007.
ix, 84 f. : il. color., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2007
Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
Inclui bibliografia

1. Meteorologia agrícola. 2. Chuvas. 3. Pluviômetros. 4. Radar meteorológico. 5. Estatística. I. Zimback, Célia Regina Lopes. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

OFERECIMENTO

A Alice, esposa e companheira.

As filhas e amigas Ligia e Andrea.

Ao meu parceiro e sobrinho Dudu (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Aos colegas de IPMet que contribuíram na confecção deste trabalho:

- Técnicos Hermes Augusto de G. França e Geórgia J. Pellegrina, pela manipulação dos dados de radar e auxílio no software IRIS;
- Técnicos Vanderlei Galhardi e Tadashi Makida pelo suporte de informática;
- Analista Paulo S. Borges pelas discussões técnicas;
- Meteorologista Dr. José C. Figueiredo pelas orientações meteorológicas;

Em especial ao Pesquisador Dr. Mauricio de A. Antonio pelas sugestões de pesquisas e pela orientação no equacionamento de ZRs.

A Diretoria e Coordenadoria de Informática do IPMet pelos afastamentos cedidos para a realização dos créditos.

As amigas Prof^a. Msc. Claudia M. de Oliveira e Liliane G. O'Brien pela revisão e traduções.

A Prof^a. Dr^a. Célia Regina L. Zimback, cuja orientação e incentivo tornaram possível à conclusão deste trabalho.

“Um pouco de ciência nos afasta
de Deus. Muito, nos aproxima”.

- Louis Pasteur

SUMÁRIO

	Páginas
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
RESUMO	1
SUMMARY	3
1 INTRODUÇÃO	5
2 REVISÃO DE LITERADURA	8
2.1 Chuva	8
2.2 Pluviômetro	10
2.3 Radar	13
2.4 Relação ZR	18
2.5 Geoestatística	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 Dados Pluviométricos	24
3.2 Dados do Radar Meteorológico	28
3.3 Relação ZR	33
3.4 Geoestatística	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 Relação ZR	40
4.2 Geoestatística	47
4.3 Considerações Finais	53
5 CONCLUSÕES	56
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
APÊNCICE 1 – Características do radar meteorológico da UNESP em Bauru/SP	64
APÊNDICE 2 – Campos de precipitação diária de janeiro de 2000	66

LISTA DE TABELAS

	Páginas
1 – Classificação de radares, identificados pelas bandas	14
2 – Coordenadas geográficas dos limites da área de experimentação	26
3 – Identificação e localização dos postos pluviométricos	27
4 – Previsão de máximas alturas de chuvas para a estação Iacri	27
5 – Parâmetros da exponencial ajustada a cada posto	43
6 – Totais de chuva diária observada por pluviômetros e radar	46
7 – Resultados das análises variográficas dos totais anuais de precipitação	48
8 – Coeficientes de determinação (R^2) do modelo esférico	51

LISTA DE FIGURAS

	Páginas
1 – Correlação (adimensional) entre todos os pluviômetros	11
2 – Representação dos comprimentos de ondas do espectro eletromagnético	13
3 – Representação pictórica da área escolhida para experimentação	26
4 – Representação esquemática da faixa de amostragem do radar	30
5 – Representação dos elementos da matriz de dados do radar	31
6 – Representação da área delimitada sobre os elementos da matriz do radar	32
7 – Saída gráfica semi-automática gerada pelo sistema IRIS	37
8 – Hidrografia, altimetria e posicionamento dos postos pluviométricos	39
9 – Probabilidade de ocorrência de chuva diária por pluviômetros	41
10 – Probabilidade de ocorrência de total de precipitação diária	42
11 – Probabilidade de ocorrência de total de dBZ	42
12 – Curvas de probabilidade entre as freqüência de ocorrência de total diário	44
13 – Probabilidades das freqüências de ocorrência diária de chuva	45
14 – Curva de massa dos pluviômetros em Tupã/SP	47
15 – Isoietas do total médio quinquenal na área delimitada para estudos	49
16 – Campos de precipitação diária de 31 de janeiro de 2000	55

RESUMO

As medidas diárias de chuva acumulada são informações de suma importância para a agricultura como, por exemplo, na aplicação de insumos, na estimativa da irrigação ou em cálculos de balanços hídricos. As informações atualmente disponíveis sobre chuvas diárias são, no geral, provenientes de pluviômetros convencionais de operação manual. A eficiência de pluviômetros em mensurar a precipitação em uma área está diretamente relacionada à distância entre os equipamentos. A maior rede de pluviômetros em operação no Estado de São Paulo, que está sob responsabilidade do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica), disponibiliza os totais diários com vários meses de defasagem, impossibilitando a utilização imediata dessas informações. A utilização de radares meteorológicos para a quantificação de chuva está associada à eficiência de equações de conversão do sinal eletrônico do radar (Z) em chuva (R), denominada relação ZR. Utilizando dados pluviométricos diários, entre 1995 e 1999, de sete estações dispostas numa área de 1.500 km^2 , e comparando com dados de radar no mesmo período, foi possível estabelecer uma relação ZR probabilística visando à acumulação diária da precipitação, representativa a área delimitada. A aplicação da relação ZR ajustada à área delimitada resultou em acumulações

diárias mais próximas dos resultados observados pelos dados dos pluviômetros, quando comparadas aos resultados da relação ZR atualmente em uso, nos radares da UNESP. Nas acumulações de chuva, obtidas por radar, foram aplicadas interpolações geoestatísticas, resultando na melhoria da distribuição espacial dessas acumulações.

Objetivando a complementação espacial e temporal das informações de chuva acumulada atualmente disponíveis, este estudo demonstra uma metodologia apropriada para determinação de relações ZRs regionalizadas, baseadas em dados pluviométricos, e a aplicação de interpolação geoestatística na distribuição espacial da chuva, possibilitando a utilização de radares meteorológicos na quantificação da chuva diária com o uso simultâneo de várias ZRs distintas, ajustadas regionalmente, resultando em acumulações específicas para áreas limitadas, como as propriedades rurais.

GEOSTATISTIC APPLIED TO THE ACCUMULATION OF RAINFALL GAUGE WITH METEOROLOGICAL RADAR

Botucatu, 2007

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: CARLOS ALBERTO DE AGOSTINHO ANTONIO

Adviser: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

SUMMARY

The daily measures of accumulated rain are very important information for agriculture, for example, in the fertilizer applications, the estimate of the irrigation or calculation of water balance. Currently, the information available of daily rain is, generally, provenient from conventional rain gauges manually operated. The efficiency of rain gauges in measuring the precipitation in an area is directly related to the distance between equipment. The biggest rain gauges net operating in the State of São Paulo is under responsibility of DAEE (Department of Water and Electric Energy) which provides daily information with several months of delay, impeding the information to be used immediately. The use of meteorological radars for the quantification of rain is associated to the efficiency of conversion equations of the radar electronic sign (Z) in rain (R), known as relationship ZR. Using daily rain data between 1995 and 1999, from seven stations located in an area of 1,500 km² and comparing with data from the radar in the same period, it was possible to establish a ZR probabilistic relation aiming at the daily amount of precipitation, which represents the delimited area. The application of the ZR relationship adjusted to the delimited area resulted in daily accumulation closer to the results observed by the rain gauges data when compared to

the results of the ZR relationship currently in use in radar operated by UNESP. In the accumulation of rain, taken by the radar, geostatistic interpolations were applied, and the results were a better spatial distribution of these accumulations.

Objectifying the space and temporal complementation of currently available the accumulated rain information, this research demonstrates an appropriate methodology to determinate regional ZR relationship, based on data from rain gauges, and the application of geoestaistic interpolation in the spatial distribution of rain, enabling the use of meteorological radars in the simultaneous use different ZR, adjusted regionally, resulting in specific accumulation for limited areas such as the country properties.

Key words: accumulated rain, rain gauges, ZR relationship.

1 INTRODUÇÃO

Atividades e sistemas agrícolas são fortemente influenciados pela quantidade de água precipitada. Essa informação, quando de boa qualidade e resolução compatível, permite aos agricultores o planejamento adequado de suas atividades e melhor aproveitamento de um recurso natural indispensável à vida, a água. A disponibilidade desse tipo de informação é escassa e normalmente pertence a órgãos públicos, associações, empresas particulares, agricultores, etc., o que é um grande dificultador na obtenção dos dados. As limitações das informações de chuva acumulada influenciam diretamente as atividades agrícolas, nas pequenas, médias ou grandes propriedades rurais e até mesmo no planejamento urbano dos municípios.

Em nosso Estado, essa informação é proveniente de estações meteorológicas de superfície ou, mais especificamente, de pluviômetros e pluviógrafos. A maior rede de pluviômetros em operação no Estado de São Paulo, de responsabilidade do DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica, fornece ao público em geral informações da quantificação da precipitação diária com defasagem de muitos meses. Outro agravante

refere-se à qualidade e à resolução espacial das informações que, por se tratarem de medidas pontuais caracterizadas pelas limitações dos equipamentos coletores de dados, apresentam grande variabilidade espacial influenciada também pela baixa densidade da rede de estações meteorológicas.

Um aspecto importante na medida de chuva é a sua variabilidade, principalmente nas chuvas de verão em regiões de clima subtropical, como a do Estado de São Paulo. Devido a essa variabilidade, foi sugerido (Reichardt, 1987) a colocação de instrumentos de quantificação de chuva, pluviômetros, em áreas de 1 a 5 km². A rede pluviométrica existente no Estado de São Paulo, mesmo nas áreas particulares, não atende a esses critérios de distanciamento mínimo devido a custos e/ou dificuldades operacionais, privando setores agrícolas de informações eficientes sobre a quantificação da chuva.

Os radares meteorológicos são equipamentos que podem efetuar uma medida remota na quantificação de chuva. A rede de radares meteorológicos da UNESP, operada pelo Instituto de Pesquisas Meteorológicas em Bauru pode quantificar as precipitações ocorridas numa área de 240 km de raio a partir das cidades (sites) de Bauru e de Presidente Prudente (onde estão instalados os radares), cobrindo dessa forma grande parte do Estado de São Paulo, além de áreas de outros Estados adjacentes. A resolução espacial da quantificação efetuada pelos radares chega a ser de 1 km² o que poderia, em tese, suprir a deficiência de uma rede densa de pluviômetros. As comparações entre as acumulações medidas por pluviógrafos e por radares apresentam discrepâncias que decorrem, principalmente, do modo de coleta dos dados, característica de cada equipamento, e também da característica da precipitação medida como em chuvas de convecção.

Técnicas para a obtenção de mapas mais precisos podem ser implementadas com o uso da geoestatística, que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, permitindo o desenvolvimento de um modelo de distribuição da acumulação obtida por radar e possibilitando a diminuição das discrepâncias em relação aos pluviômetros, resultando numa melhor medição da acumulação da precipitação pelo radar.

Considerando-se a distribuição espacial das chuvas com a utilização da geoestatística, a operação automatizada do radar e as acumulações diárias em áreas de alguns km², a aplicação dessas informações em técnicas da Agricultura de Precisão (AP) permitiria a

distribuição de insumos somente nas áreas onde houvesse condições para uma aplicação adequada, implicando diretamente em uma maneira mais segura e ambientalmente mais correta, ao contrário da maneira como é aplicado hoje nas maiorias das propriedades (aplicação uniforme). Se isto for feito corretamente, a maior eficiência de aplicação conduzirá a uma redução no impacto ambiental potencial (que é um dividendo sócio-político) e, conseqüentemente, a aumento dos lucros das propriedades. Trabalhos rotineiros como balanços hídricos, mapas de estágios da cultura, programação de aplicações de pesticidas, etc., poderão ser beneficiados com o uso das informações adequadas da chuva acumulada passada, resultando em economia de gastos e, posteriormente, aumentos nos lucros obtidos pelas atividades agrícolas.

Visando a utilização mais abrangente de equipamentos e tecnologias atualmente em uso, o objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia para acumular a chuva diária com radares meteorológicos, espacializar essa acumulação por meio de técnica de geoestatística produzindo mapas em alta resolução na área de cobertura dos radares meteorológicos da UNESP e, com isso, possibilitar a disseminação de uma importante informação agrícola, a chuva acumulada diária.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Chuva

A água é um recurso natural limitado, sendo renovada no meio ambiente por seu ciclo hidrológico. Elemento fundamental à vida, a importância da água está presente em toda atividade humana, seja agrícola, industrial ou comercial. Especificamente na agricultura, o uso da água tem se mostrado inadequado. A utilização dos recursos hídricos tem sido excessiva, sem que haja tempo hábil para sua renovação natural. Um exemplo alarmante é o desastre ambiental e social ocorrido no Mar do Aral, situado entre o Uzbequistão e o Cazaquistão. Projetos de irrigação executados pelo Governo da então União Soviética para a cultura algodoeira desviaram as águas dos rios Sir Daria e Amu Daria. Responsáveis pelo abastecimento e renovação das águas do Mar do Aral, essa irrigação consumiu 90% de seu abastecimento, resultando na perda de 60% do volume d'água. Além do desaparecimento, pela duplicação da salinidade da água, da maioria das espécies de peixes e da redução significativa da fauna ciliar, esse desastre resultou na redução de sessenta mil empregos diretos da indústria pesqueira local.

A ONU (Organizações das Nações Unidas), em texto intitulado “Desafios para Águas Internacionais: Avaliação regional em uma Perspectiva Global”, de março de 2006, sugere a venda de água a preços mais altos, como forma de reduzir a demanda por água. Segundo a Organização para Agricultura e Alimentação – FAO, da ONU, o crescimento das áreas irrigadas em países em desenvolvimento deve aumentar significativamente. Nos Estados Unidos da América, em regiões de baixa qualidade das águas superficiais (alta salinidade), a busca por águas subterrâneas para irrigação está levando ao rebaixamento de aquíferos da ordem de um a três metros ao ano. “Todas as fontes de água – chuva, canais de irrigação, águas subterrâneas e águas servidas – são importantes. Todas podem ser desenvolvidas em condições adequadas. A melhor combinação do uso do solo tipo de cultivo e fonte de água deve responder às características de cada ecossistema”, diz o documento da FAO.

O crescimento da utilização de água na agricultura está diretamente relacionado à crescente demanda de alimentos necessários ao consumo humano. A EMBRAPA/CNPTIA sugere que a aplicação de “barraginhas (que retém a água que escorre na superfície) que aumentam substancialmente a infiltração das águas provenientes das chuvas que normalmente se perdem”. Afirma ainda que o uso destas tecnologias “associadas a práticas conservacionistas de solo e de vegetação (matas de topo, matas ciliares) tornam o espaço rural a principal fonte de recarga dos cursos d’água”.

As chuvas, designadas como hidrometeóros ou conjunto de partículas de constituição hídrica, no estado líquido ou sólido, em suspensão ou queda livre (precipitação) na atmosfera (VAREJÃO-SILVA, 2001), são um importante componente do ciclo hidrológico, permitem a renovação dinâmica da água encontrada no meio ambiente. As chuvas têm influência direta nas atividades humanas, seja no abastecimento de reservatórios, para geração de energia ou consumo urbano, ou na agricultura. O regime das chuvas ou precipitações é diferenciado pelas peculiaridades da região (clima, relevo, hidrografia, etc.) e sua medição é de grande importância no contexto agrícola, seja pela sua falta, excesso ou distribuição espacial e temporal. Produtividade agrícola das culturas, manejo dos recursos hídricos, avaliação ambiental, erosão hídrica estão ligados à medição das chuvas, como também a relevância no planejamento agrícola, segundo Carvalho e Assad (2002).

2.2 Pluviômetro

Segundo Varejão-Silva (2001), dá-se o nome de pluviometria a quantificação das precipitações, que é a representação da camada d'água que se formaria sobre uma superfície horizontal, plana e impermeável, com 1m^2 de área, expressa em milímetros (mm), ou seja, 1 mm de precipitação representa 1 litro de água por metro quadrado na superfície.

Para a medição das chuvas são utilizados, basicamente, dois aparelhos similares, o pluviômetro e o pluviógrafo. A diferença básica entre esses equipamentos é a capacidade de registro temporal do pluviógrafo, enquanto no pluviômetro é lido o total de água precipitada em um período fixo, anotado manualmente por um operador. No Estado de São Paulo, o pluviômetro é amplamente utilizado pelo seu baixo custo e simplicidade de operação, ficando a qualidade de suas informações sob responsabilidade dos operadores que, em tese, devem executar a leitura do equipamento diariamente, num mesmo horário padrão.

Um pluviômetro padrão é constituído por um cilindro coletor graduado. A área de coleta ou captação (abertura do cilindro), varia entre 15 cm^2 e 500 cm^2 . A forma cilíndrica do coletor é recomendada por oferecer idênticas condições de exposição ao vento, qualquer que seja sua direção (Varejão-Silva, 2001). Os coletores dos pluviógrafos seguem as mesmas características dos pluviômetros, e seu registro temporal permite intensificar as precipitações em milímetros por hora (mmh^{-1}).

De acordo com Limeira et al. (2004), a área de captação pode influenciar na quantificação da precipitação. Esses autores compararam medidas diárias em dois equipamentos distintos, distanciados em apenas 2 metros, sendo um com área de 15 cm^2 (pluviômetro de baixo custo, modelo Cunha) e outro com 400 cm^2 (pluviômetro padrão, modelo Ville de Paris). Numa análise de dois meses esses autores observaram que o erro médio cometido nos valores estimados pelo pluviômetro tipo Cunha em relação ao pluviômetro Ville de Paris, para toda a série de dados utilizada na pesquisa, foi de 52,3%. O erro relativo ao total precipitado nos dois meses foi de 21,1%.

Reichardt (1987) estimou a representatividade desses equipamentos, em quantificar as precipitações, em áreas de 1 a 5 km². Fisch et al. (2005), utilizaram dados de 38 pluviômetros básculo, entre 23/12/1998 e 28/02/1999, distribuídos em quatro grupos, dispostos em diversas localidades do Estado de Rondônia, com o objetivo de caracterizar a distribuição espacial (variabilidade) da chuva convectiva, através da correlação entre a chuva ocorrida entre dois pluviômetros associada com a distância que os separa. Os resultados desse estudo apresentaram uma correlação, entre os valores médios dos pluviômetros, inferior a 0,5 entre equipamentos distanciados a mais de 5 km, conforme Figura 1.

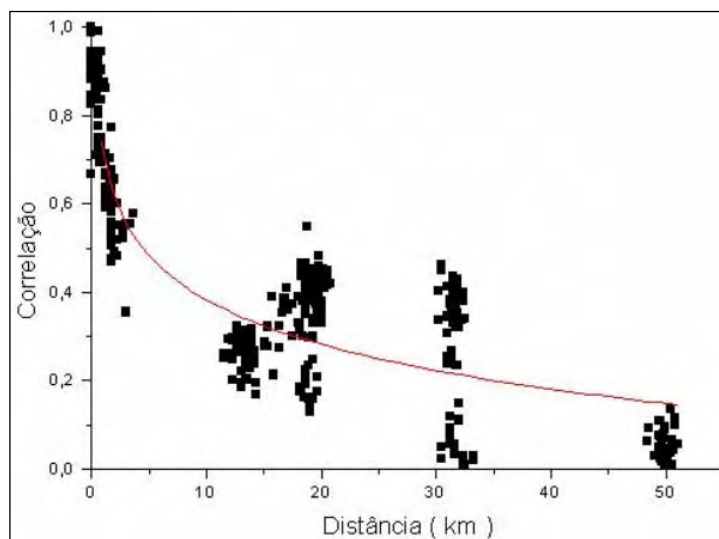


Figura 1. Correlação (adimensional) entre todos os pluviômetros dos vários networks (1 a 4) durante o experimento LBA/TRMM 1999 (extraído de Fisch et al., 2005).

Outra característica importante das chuvas é sua intensidade. Intensidade de chuva é a quantificação da precipitação por unidade de tempo. A frequência de ocorrência e o período de duração de uma determinada intensidade de chuva numa região são constituídos pela análise de dados pluviográficos de vários anos. Essa análise leva em consideração o relacionamento entre intensidade, frequência e duração, sendo elaborada uma equação que represente a intensidade de chuva da região. Essas equações empíricas têm como elementos básicos o tempo de duração da chuva em minutos e o tempo de recorrência em anos, podendo ser representadas como (MARTINEZ; MAGNI, 1999):

$$\begin{aligned}
 i &= a / (t + b) \\
 i &= c / t^m \\
 i &= a.T^n / (t + b)^r
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

em que:

i : intensidade média em milímetros por minutos ou por hora;

t : tempo de duração da chuva em minutos;

T : tempo de recorrência em anos;

a, b, c, m, n, r : parâmetros definidos a partir das observações básicas.

Em estudo realizado com 98 postos do então Serviço Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura, atualmente INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, Pfafstetter (1982) foi pioneiro na elaboração de equações de chuvas intensas no Brasil. Para o Estado de São Paulo, o estudo resultou na elaboração de equações de chuvas intensas para 11 municípios, baseando-se em 14 postos pluviográficos sendo que para algumas das equações a base de dados foi pouco representativa, em função do número de anos das observações. A fórmula empírica que define as máximas precipitações, em função de sua duração e período de recorrência, é dada por:

$$h_{t,T} = T^{\alpha + \frac{\beta}{T^\gamma}} [a.t + b.\log(1 + c.t)] \tag{2}$$

em que:

$h_{t,T}$: altura pluviométrica máxima em milímetros, correspondente à duração t e período de retorto T;

T : período de retorno em anos;

t : duração da chuva em horas;

α : coeficiente dependente da duração da precipitação;

β : coeficiente do posto considerado e da duração da precipitação;

γ : coeficiente de 0,25 para o Brasil;

a, b, c : constantes para cada posto de coleta.

A determinação dos parâmetros de chuvas intensas em locais desprovidos de série de dados pluviométricos é viabilizada com a utilização da metodologia geoestatística, conforme apresentado por Mello et al. (2003), em estudo realizado com 140 estações meteorológicas no Estado de São Paulo.

2.3 Radar

Originado da sigla em inglês Radio Detection and Ranging, RADAR designa o sistema de identificação e determinação da distância de um alvo, utilizando ondas eletromagnéticas. Seu funcionamento consiste na emissão de um pulso eletromagnético, por uma antena, que se propaga até ser obstruído por um alvo. A obstrução do pulso eletromagnético causa a reflexão (espelhamento), de parte da energia do pulso original emitido, de volta para a antena emissora. Em outras palavras, é um sensor ativo (fonte própria de energia) que forma imagem a partir do registro da radiação eletromagnética emitida por esta fonte e refletida pelos objetos (RINEHART, 2004).

Os radares são classificados em função do comprimento da onda eletromagnética em que operam e são identificados por letras (herança de sua utilização bélica). Radares meteorológicos têm como alvo gotas de chuvas (hidrometeóros). A faixa de microondas e a classificação dos radares são apresentadas na Figura 2 e Tabela 1, respectivamente.

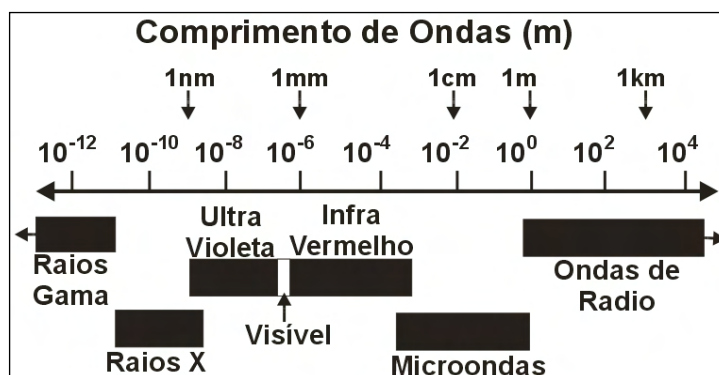


Figura 2. Representação dos comprimentos de ondas do espectro da radiação eletromagnética (adaptado de http://wave.prohosting.com/geodatos/html/cap_07-3.htm).

Tabela 1. Classificação de radares, identificados pelas bandas, em função da faixa do comprimento de ondas (λ , em centímetros) e da faixa de frequência (F, em gigahertz). Adaptado de Rinehart (2004).

banda	Ka	K	Ku	X	C	S	L	UHF	VHF	HF
λ	1,2/0,75	1,7/1,2	2,5/1,7	4/2,5	8/4	15/8	30/15	100/30	100/1.000	1.000/10.000
(GHz)	27/40	18/27	12/18	8/12	4/8	2/4	1/2	0,3/1	0,3/0,03	0,03/0,003

A identificação de chuvas foi inicialmente em virtude da sua interferência nas aplicações bélicas dos radares, na década de 40 do Século XX. No final daquela década surgiram os primeiros trabalhos de identificação de chuvas por radar, destacando-se o estudo de Marshall e Palmer (1948) que determinaram a primeira equação de transformação do sinal eletrônico do radar em intensidade de precipitação, denominada relação ZR.

A medição da intensidade das chuvas por radares meteorológicos é baseada na quantidade de energia refletida pelos hidrometeoros, para tanto, o equipamento emite um pulso de microondas (radiação eletromagnética), temporizado em milésimos de segundos, através de uma antena. Ao ser bloqueado, por hidrometeóros, parte da microonda emitida é refletida de volta à antena emissora. A energia recebida é aplicada à relação ZR para a quantificação da precipitação. O tempo decorrido entre a transmissão e recepção do eco de microonda determina a distância do alvo e o posicionamento da antena a direção e altura dos ecos de chuvas. Dessa forma, a medida de chuva efetuada pelo radar meteorológico é indireta, por meio de uma equação empírica que estima a quantidade de chuva, baseada na porção energética espelhada por um volume de gotas de chuva. Rinehart (2004) descreveu o equacionamento físico/matemático da detecção de hidrometeoros, por eletromagnetismo irradiado, conforme desenvolvimento conceitual descrito a seguir.

Radiação eletromagnética tem como principais características sua frequência e seu comprimento de onda, exemplificada pela equação:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (3)$$

em que:

c : velocidade da luz em metros por segundo (m/s);

λ : comprimento da onda em metros (m);

f : frequência em ciclo por segundo (hertz).

A relação de espalhamento de uma onda plana por uma esfera, denominada Teoria de Rayleigh, foi elaborada por John William Strutt e apresentada no livro “A Teoria do Som”, segundo volume, em 1878. Essa relação explica que a quantidade de energia que retorna após atingir uma partícula é dada por:

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} \quad (4)$$

em que:

λ : comprimento de onda eletromagnética irradiada;

D : diâmetro da partícula atingida, válido para coeficientes α menores que 0,13;

α : quantidade de energia que retorna à antena.

Quando uma esfera é grande comparada ao comprimento de onda do radar, a área de seção transversal do retroespalhamento do alvo é igual à área geométrica, ou seja:

$$\sigma = \pi r^2 \quad (5)$$

em que:

r : raio da esfera;

σ : seção transversal de retroespalhamento.

Parte da radiação emitida pelo radar é absorvida pela gota na forma de calor e parte é espelhada como energia eletromagnética (essa absorção restringe a capacidade

de detecção em radares com menores comprimentos de onda). A quantidade teórica proporcional à energia retornada é dada por:

$$\sigma_i = \frac{\pi^5 |K|^2 D_i^6}{\lambda^4} \quad (6)$$

em que:

σ_i : energia retornada;

λ : comprimento de onda eletromagnética irradiada;

D_i : diâmetro da partícula atingida (esfera);

$|K|^2$: índice de refração do material.

O parâmetro definido para denominar a refletividade de radar é dado pelo símbolo η , sendo definido como:

$$\eta = \sum_{\text{unidade_de_volume}} \sigma_i \quad (7)$$

A equação adequada para cálculo da energia recebida (refletida) necessita do conhecimento do diâmetro de todas as gotas do volume amostrado. Esse problema é contornado definindo-se o parâmetro denominado fator de refletividade do radar (z), nos termos de D^6 , que é dado por:

$$z = \sum_{\text{vol}} D^6 \quad (8)$$

Considerando toda a região abrangida pelo feixe do radar, a reflexão média das partículas iluminadas pelo feixe é dada por:

$$\overline{\text{Pr}} = \frac{C \cdot z}{r^2} \quad (9)$$

em que:

C : constante (fator numérico que especifica parâmetros e características do radar);

r : distância do alvo.

Sendo o fator (z) proporcional à $\overline{Pr}$ (energia média refletida), reordenando a equação em função do fator de refletividade (z) e da constante do radar (C), teremos:

$$z = C P_r r^2 \quad (10)$$

em que:

a unidade da constante do radar (C) é dada em milímetros elevados à sexta potência por metro cúbico (mm^6/m^3), quando o comprimento de onda (λ) e o diâmetro das gotas (D) são expressos em centímetros (cm).

A representação desses valores é simplificada expressando-se o valor de (z) em decibéis (dez vezes o logaritmo na base 10). Assim, teremos:

$$Z = 10 \log_{10} \left(\frac{z}{1 \text{mm}^6 / \text{m}^3} \right) \quad (11)$$

em que, por definição teremos: $Z = 10 \log z$ e

$$\text{dBZ} = 10 \log Z. \quad (12)$$

Dessa forma, a relação entre intensidade de chuva (R) e refletividade por radar (Z) é expressa pela equação denominada ZR, dada por:

$$Z = AR^b \quad (13)$$

em que:

A e b: constantes empíricas ajustadas às características da precipitação observada;

R : intensidade de chuva.

Para a determinação dos parâmetros “A” e “b” são utilizados ajustes estatísticos pelas comparações entre informações de pluviógrafos e radar ou medição do diâmetro das gotas e sua refletância perante o radar. Esses parâmetros variam significativamente em função dessas comparações.

Antonio et al. (1995) e Sokol (2003) utilizaram a mesma ZR ($Z=200.R^{1,6}$) em seus estudos, apesar de possuírem objetivos distintos. Antonio et al. (1995)

enfatazaram a praticidade na geração de campos de chuva acumulada por radar para fins hidrológicos, alertando sobre a necessidade da utilização de relações ZR características das áreas de observação.

Sokol (2003) avaliou metodologias para estimar precipitação em área, sobre bacias hidrográficas, pela precipitação derivada de radar estimada na máxima coluna de refletividade e pela interpolação de uma rede de 653 pluviômetros, separados por uma distância média de 8 km. Ambos destacaram a utilização de radares para a estimativa de precipitação, enfatizando o ajuste de relações ZR adequado às características locais. No estudo de Sokol (2003), a estimativa efetuada pela interpolação dos pluviômetros foi mais eficiente, concordando com o descrito por Reichardt (1987), que sugere a colocação de pluviômetros em áreas de 1 a 5 km² para quantificação diária.

Steiner et al. (2003) verificaram a variação dos parâmetros “A” e “b”, pela análise da interpretação microfísica da parametrização em dezenas de relações ZRs, e destacaram a importância da precisão nas medidas de chuva para ajuste correto.

A determinação de uma relação ZR que efetue adequadamente a quantificação da precipitação, em intensidade e/ou acumulação, é fundamental para a utilização e aplicação de radares meteorológicos.

2.4 Relação ZR

A determinação de uma relação ZR é elaborada pela comparação de informações pluviográficas com as refletividades observadas por radar sobre a posição dos pluviógrafos, sendo necessária uma base de dados de vários anos. Uma técnica alternativa para a determinação estatística de relação ZR foi apresentada no Brasil por Calheiros (1982). Utilizando dados de radar banda C, localizado em Bauru, e de pluviógrafos posicionados em distâncias distintas do radar, em dois períodos chuvosos (outubro a março, 1981/82 e 1984/85), Calheiros e Zawadzki (1987) utilizaram a soma das probabilidades para determinar relações ZRs para aplicação em anéis, de distância variada, concêntricos ao radar. Nesse estudo, o tempo de integração entre os dados de radar e pluviógrafos foi de 10 minutos, em função das características eletrônicas do radar e das características ambientais locais.

Outra técnica para determinação de ZRs variáveis foi apresentada por Antonio (1998) que, utilizando dados de disdrômetros (sensores eletrônicos que quantificam a chuva e medem o diâmetro das gotas) posicionados em distâncias distintas, propôs uma técnica de ajuste às medidas efetuadas por radar (ajuste da ZR) em tempo real, cuja aplicação operacional necessitaria da informação “on line” das medidas de chuva dos postos de superfície.

A utilização de uma relação ZR que represente da melhor forma possível a chuva efetiva em superfície é fundamental para aplicações agrícolas. Com o objetivo de melhorar as informações dos totais de chuvas diárias disponíveis aos agricultores, foi elaborada neste estudo uma variação na metodologia utilizada por Calheiros e Zawadzki (1987), na determinação de relações ZR regionais, para totalização diária da chuva.

2.5 Geoestatística

Krigagem é um método de interpolação que trata de variáveis com comportamento espacial dependente. Formulado e implementado primeiramente pelo Eng^o de Minas Sul-Africano Daniel G. Krige, para aplicação em prospecção de minerais, essa forma de interpolação, formulada matematicamente por Matheron (1965), vem sendo utilizada em diversas áreas do conhecimento. Nas últimas décadas, as aplicações geoestatísticas foram encontradas em diversas áreas, como por exemplo, geológicas, cartográficas, epidemiológicas, hidrológicas, climatológicas, etc., aumentando significativamente a utilização dessa metodologia.

Segundo Landim (1988), a geoestatística é um tópico da estatística que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, aquelas que têm comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e as totalmente determinísticas. Estas variáveis, conforme Guerra (1988), têm em comum uma dupla característica: são aleatórias, já que os valores numéricos observados podem variar consideravelmente de um ponto a outro no espaço e são espaciais, pois apesar de serem muito variáveis no espaço, os valores numéricos observados não são inteiramente independentes. A dependência espacial dos dados é analisada pela expressão (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989):

$$\hat{\gamma} = \frac{1}{2N_{(h)}} \sum [Z_{(x_i)} - Z_{(x_i+h)}]^2 \quad (14)$$

em que:

$\hat{\gamma}(h)$: é a semivariância estimada;

$N(h)$ representa o número de pares de valores medidos $[Z(x_i) - Z(x_i + h)]$ separados por um vetor h .

Na denominação geoestatística, $Z(x_i)$ é denominada de variável regionalizada (CLARK, 1979). O semivariograma depende da distância h entre x e $x+h$. Se $\hat{\gamma}(h)$ depende somente da distância e não da orientação, o semivariograma é denominado isotrópico. Uma outra hipótese da teoria geoestatística é que o semivariograma não depende da posição x , mas sim da natureza e da forma da relação de uma variável regionalizada, entre um ponto e outro qualquer, que depende da distância entre estes dois pontos, e não onde os pares de pontos estão localizados dentro da área. A dependência espacial manifesta-se como uma correlação entre as amostras que diminui à medida que a distância entre os pontos amostrais aumenta, e desaparece completamente quando as distâncias entre os pontos amostrais é suficientemente grande, os quais, neste caso, são considerados estatisticamente independentes, conforme Vieira (2000).

O variograma ou semivariograma é um método estimador geoestatístico da autocorrelação espacial utilizado como ferramenta de continuidade espacial, que investiga a magnitude da correlação entre as amostras, com a distância. Na confecção do semivariograma, todos os dados são pareados em todas as combinações possíveis e agrupados dentro de classes (Lags) de distâncias e direções aproximadamente iguais, sendo neles verificada a possibilidade das variáveis estudadas não possuírem homogeneidade direcional (anisotropia) das distribuições das variâncias em ângulos diferentes no espaço (ENGLUND; SPARKS, 1988). Vários modelos teóricos de variograma são disponíveis para melhor ajuste à curva de representação da magnitude, alcance e intensidade da variabilidade espacial.

O uso da metodologia geoestatística e seus componentes em análises climatológico-hidrológicas vem se popularizando entre os estudiosos das áreas. Análises e conclusões de importantes estudos tem se beneficiado com a utilização dessa ferramenta.

Holawe e Dutter (1999) demonstraram a importância da geoestatística como ferramenta no estudo da variabilidade da precipitação na Áustria, analisando uma série temporal de 20 anos em uma rede de 456 estações de precipitação. A partir da derivação dos parâmetros de variograma: alcance, efeito pepita e patamar, utilizados para análise no padrão espacial de séries temporais, a estrutura espacial de seqüências seca/úmida, na Áustria, foi identificada, ficando evidenciado a utilização de variogramas como instrumento investigativo em séries temporais.

Goovaerts (1999) apresentou três algoritmos geoestatísticos multivariados para a incorporação da elevação digital num modelo espacial de predição de pluviosidade. Nesse estudo, foram utilizados krigagem simples com variação da média local, krigagem com derivação externa e cokrigagem. Foram analisando dados mensais e anuais de 36 estações climatológicas distribuídas em 5.000 km² na região Sul de Portugal. Para comparar o desempenho da predição dos três algoritmos de interpolação geoestatística foi utilizada a validação cruzada com regressão linear reversa da pluviosidade contra a elevação e três técnicas univariadas: polígonos de Thiessen, inverso do quadrado da distância e krigagem ordinária. As correlações, na incorporação das elevações aos modelos de predição pluviométrica, foram significativas, próximas a 0,75.

A utilização da geoestatística na análise da influência da orografia em bandas de precipitação foi apresentada por Miniscloux et al. (2001). Baseando-se em medidas de radar meteorológico, foram identificadas bandas de precipitação paralelas à direção do vento, persistindo por várias horas sobre região montanhosa no Mediterrâneo. A análise geoestatística mostrou uma maior atividade das bandas de precipitação sobre a região montanhosa, em relação a regiões de baixos vales.

Na distribuição espacial da precipitação no Estado de São Paulo, Carvalho e Assad (2002) destacam o desempenho dos métodos geoestatísticos utilizados para análise em 40 anos de dados anuais de precipitação sobre o território paulista, recomendando sua utilização em estudos semelhantes. Nesse estudo a utilização do variograma, para avaliar a dependência espacial das variáveis foram aplicados em séries anuais que, em função da variabilidade temporal apresentam uma relativa homogeneidade permitindo o ajuste do modelo esférico aos variogramas analisados.

Estudos para estimativa da precipitação baseada em dados de radares meteorológicos, com aplicação geoestatística, indicam a necessidade da construção de variogramas específicos para cada tipo de chuva (estratiforme, convectiva, frontal, orográfica, etc.), e para os períodos (variabilidade temporal) analisados, os quais normalmente coincidem com a variabilidade temporal de dados pluviométricos (utilizados como calibrador das medidas por radar). Alguns trabalhos realizados no Brasil seguiram essa diretriz, como os de Barbosa et al. (1998), Barbosa et al. (2000) e Lou (2004) que desenvolveram estudos geoestatísticos com dados de radar meteorológicos associados a dados pluviométricos. Nesses estudos foram utilizados dois eventos chuvosos distintos, sendo o evento de 01/01/1995 a passagem de uma frente fria e o evento de 05/01/1995 um sistema convectivo local, observados na Região Metropolitana da capital paulista, pelo radar meteorológico posicionado em Ponte Nova (Salesópolis/SP). A relação ZR utilizada foi de $Z=200.R^{1,6}$ (MARSHAL; PALMER, 1948). As análises variográficas realizadas abordaram a precipitação observada pelo radar, em intervalos de 10 minutos (intervalo de amostragem do CAPPI), intervalos horários e chuva média do evento (frontal e convectivo). Os dois eventos apresentaram a presença de correlação espacial dos dados (isotropia), sendo que o evento ocasionado pelo sistema frontal apresentou uma estrutura de correlação mais pronunciada em relação ao evento formado por convecção local, com ajuste do modelo esférico.

Antonio (2004) apresentou estudo geoestatístico entre acumulações de precipitação, totalizadas semanalmente, registradas pelo radar meteorológico de Bauru e em uma rede de pluviômetros particular em área delimitada para testes, durante o mês de janeiro de 1995. Nesse estudo foi utilizada a relação ZR elaborada por Marshal e Palmer (1948), e uma área de 1.200 km² com 17 pluviômetros. Os dados de radar utilizados foram resultantes de CAPPIs de 3.5 km de altura, sendo aplicado o método da krigagem. Nesse estudo, a aplicação da interpolação geoestatística na distribuição das precipitações acumuladas por radar, em períodos semanais, apresentam valores superiores aos registrados pelos pluviômetros.

Para a obtenção da equação de chuva intensa em locais desprovidos de postos pluviométricos, Mello et al. (2003) utilizaram procedimentos estatísticos para a interpolação dos parâmetros, com base em estações vizinhas ao local. No estudo, foram

comparadas interpolações efetuadas com inverso do quadrado da distância e com a krigagem (como interpolador geoestatístico). Conforme os autores, ambos os métodos apresentaram boa precisão, mas a krigagem produziu menores erros médios, sendo sugerida a krigagem como mais adequada para a interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas.

Lou (2004), aplicando uma modelagem geoestatística na integração entre dados de pluviômetros e de radar meteorológico, comparou desempenho entre modelos geoestatísticos e da relação ZR. Foram analisados dois eventos de precipitações distintas (precipitação frontal e convectiva) observados por radar meteorológico e pela rede telemétrica, sobre a bacia do Alto-Tietê, em modelos geoestatísticos krigagem bayesiana e simulação condicionada por indicadores seqüenciais (krigagem indicatriz, que usa a posição e os valores dos dados para produzir uma distribuição local em vez de uma distribuição global das propriedades analisadas). O estudo mostrou que esses modelos revelaram desempenhos superiores quando comparados à performance da relação ZR utilizada. O estudo destaca ainda a importância da correlação espacial na estimativa pluviométrica e da integração dos dados de radar com dados pluviométricos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Dados Pluviométricos

Os dados pluviométricos utilizados foram obtidos via Internet. A principal base utilizada foram os dados disponibilizados pelo SIGRH – Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. Criado em consonância com a Lei Estadual nº 9.034-94, o SIGRH é um grande banco de dados hidrometeorológicos de acesso livre onde estão armazenados dados, relatórios e textos técnicos dos colegiados que compõe o sistema. Especificamente em relação aos dados pluviométricos, existe uma defasagem de vários anos na disponibilização dos dados diários dos postos de coleta.

Inicialmente foram selecionados 716 postos pluviométricos no Estado de São Paulo e outros 10 postos no Estado do Paraná, inseridos na cobertura do radar meteorológico em Bauru. Dada à disponibilidade geral de dados até o 1º semestre de 2006, foram isolados os postos com dados diários entre 1995 e 1999. Posteriormente, verificou-se aglomerações de postos pluviométricos na perspectiva de identificar uma densidade regionalizada que fosse próxima da indicada por Reichardt (1987). Como os postos

pluviométricos disponíveis no Sistema SIGRH foram instalados ao longo dos principais rios do Estado com o objetivo de monitorar as principais bacias hidrográficas desses rios, não existe uma densidade pluviométrica dentro dos padrões desejados, mesmo quando considerados alguns poucos pluviômetros.

Como parte dos objetivos desse trabalho é a determinação de equação ZR regionalizada, de modo a possibilitar uma distribuição geoestatística da precipitação acumulada por radar, foram delimitadas áreas retangulares de 1.500 km² com pluviometria e relevo semelhante, que contivessem um número significativo de postos pluviométricos para a realização de experimento. Essa parametrização é resultante de testes iniciais da comparação entre chuva acumulada por pluviômetros e por radar em área limitada e, com distribuição geoestatística, realizados por (ANTONIO, 2002). A partir dessas premissas, foi escolhida uma área à Oeste do radar, a cerca de 180 km de distância, contendo sete postos pluviométricos com distribuição de precipitações, mensais e anuais, semelhantes. A Figura 3 apresenta a disposição da área escolhida juntamente com a área de cobertura quantitativa do radar meteorológico do IPMet/UNESP em Bauru, em relação ao mapa do Estado de São Paulo. A Tabela 2 apresenta as coordenadas geográficas dos limites da área de testes e na Tabela 3 estão as identificações, localizações geográficas e precipitações anuais médias dos postos pluviométricos contidos na área escolhida, conforme informações disponíveis no SIGRH. Em relação à precipitação anual média dos postos selecionados, os valores encontrados foram bem homogêneos, sendo o desvio padrão, entre as médias anuais, de 13,4 mm em relação à média das médias que apresentou o valor de 1.233 mm ao ano.

Na área delimitada se encontra o município de Iacri, onde está instalado um pluviógrafo (C7-054R), permitindo o desenvolvimento da relação de intensidade – duração – período de retorno, para este posto, conforme apresentado na Tabela 4. Segundo informações disponíveis no SIGRH, considerando dados de 1990 a 1991 e de 1993 a 1998 (8 anos) a equação da relação intensidade é dada por (MARTINEZ; MAGNI, 1999):

$$i_{t,T} = 33,3984(t + 20)^{-0,8486} + 2,2482(t + 5)^{-0,6276} \cdot [-0,5009 - 1,0344 \ln \ln(T / T - 1)] \quad (14)$$

para $10 \leq t \leq 1440$, em que:

i : intensidade da chuva, correspondente à duração t e período de retorno T (mm/min);

t : duração da chuva em minutos;

T : período de retorno em anos.

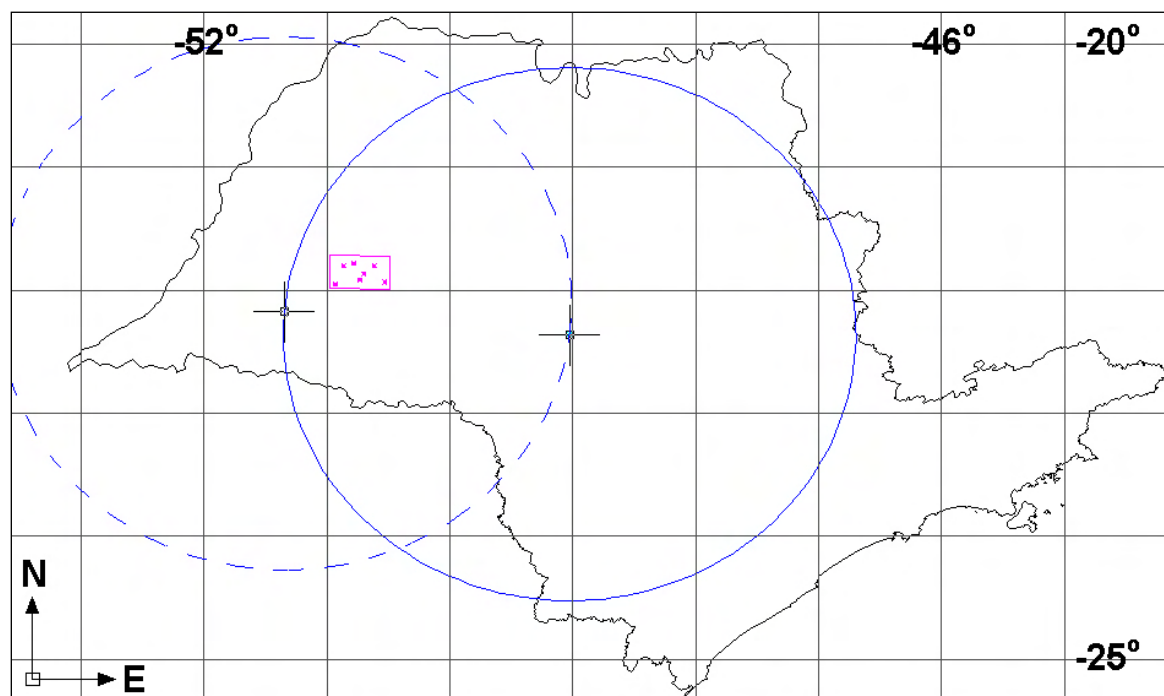


Figura 3. Localização da área escolhida para experimentação, representada pelo retângulo em rosa (marcas internas representam os pluviômetros), em relação à área de cobertura dos radares meteorológicos (240 km de raio, Bauru representado pela linha azul contínua e Presidente Prudente pela tracejada), identificados pelas cruzes, em relação ao Estado de São Paulo.

Tabela 2. Coordenadas geográficas dos limites da área de experimentação escolhida.

Limites	Latitude S	Longitude W
NW	21° 43' 00,48"	50° 58' 23,16"
SW	21° 59' 54,00"	50° 58' 36,48"
NE	21° 43' 18,48"	50° 29' 21,12"
SE	21° 59' 29,76"	50° 29' 30,84"

Tabela 3. Identificação, localização, altitude, distância ao radar, dos postos pluviométricos contidos na área de experimentação e, precipitação média anual, segundo SIGH.

Prefixo	LAT S	LON W	ALT (m)	DIST (km)	M.A. (mm)
C7-001	21° 57'	50° 56'	320	201	1240
C7-036	21° 47'	50° 47'	490	191	1219
C7-043	21° 56'	50° 32'	510	161	1251
C7-046	21° 48'	50° 37'	440	175	1224
C7-054	21° 52'	50° 42'	510	181	1236
C7-062	21° 55'	50° 44'	440	182	1244
C7-067	21° 48'	50° 52'	460	199	1215

Tabela 4. Máximas alturas de chuvas (mm) para um determinado período de retorno na estação Iacri – C7-054R.
(<http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/basecon/ecisp/PlugDAEE.pdf>)

Duração t (minutos)	Período de retorno T (anos)								
	2	5	10	15	20	25	50	100	200
10	18,1	23,0	26,1	27,9	29,2	30,2	33,2	3,1	39,1
20	28,5	35,5	40,1	42,7	44,5	45,9	50,3	54,6	58,9
30	35,4	43,8	49,5	52,6	54,9	56,6	61,8	67,1	72,3
60	47,4	59,0	66,6	70,9	73,9	76,2	83,4	90,5	97,5
120	58,9	74,2	84,3	90,0	94,0	97,1	106,6	116,0	125,4
180	65,2	83,1	95,0	101,7	106,4	110,0	121,1	132,1	143,1
360	75,4	98,8	114,2	123,0	129,1	133,8	148,3	162,8	177,1
720	85,2	115,6	135,8	147,1	155,1	161,2	180,1	198,8	217,5
1080	91,0	126,4	149,9	163,1	172,4	179,5	201,5	223,3	245,1
1440	95,2	134,7	160,8	175,5	185,8	193,8	218,3	242,6	266,8

Definidos os postos a serem utilizados na experimentação, os dados pluviométricos diários foram comparados aos dados de radar, independentemente dos valores observados, ou seja, observou-se a ocorrência ou ausência de precipitação diária em 2.039 dias, em cada posto, com os dados de radar do mesmo dia, sobre a área de cada posto. Essa comparação, em relação aos dados de radar, levou à redução na base de dados pluviométrica em 43%, perfazendo um total 1.166 dias utilizados com os dados de radar. As análises que levaram a optar por essa redução serão explanadas com a metodologia utilizada nos dados de radar.

3.2 Dados do Radar Meteorológico

A identificação e quantificação das chuvas efetuadas pelo radar, se baseiam em ecos de pulsos eletrônicos por ele transmitido, sendo uma medida indireta. Pela energia refletida (eco) estima-se a intensidade da chuva. A quantidade de energia refletida (Z) é convertida em intensidade de chuva (R), pela equação de transformação $Z=AR^b$, denominada relação ZR por Marshal e Palmer (1948). Dessa forma, a eficiência do radar em identificar a intensidade da chuva está diretamente relacionada aos parâmetros da equação ZR, dadas pela constante A e pelo expoente b .

Equações ZR são ajustadas em função da regionalização e variabilidade das chuvas, existindo variações desta equação sendo utilizadas em radares em todo o mundo. A metodologia básica para a determinação dos parâmetros A e b da ZR baseia-se na comparação entre a medida de chuva na superfície efetuada por pluviógrafo, dada como verdade terrestre, e a refletividade registrada pelo radar sobre a área do pluviógrafo, sendo necessária uma base de dados confiáveis de vários anos. Calheiros e Zawadzki (1987), utilizaram uma metodologia de determinação de relação ZR probabilística, comparando dados de três pluviógrafos com distribuição temporal de dez minutos, e dados de radar com o mesmo intervalo de tempo. Com essa metodologia foram determinadas três variações de relações ZRs a serem aplicadas a distâncias concêntricas do radar (anéis) distintas.

Adaptando-se a metodologia utilizada por Calheiros e Zawadzki (1987) e utilizando-se dados pluviométricos de acumulação diária e informações oriundas do radar meteorológico banda S-Doppler, localizado em Bauru, foi possível a determinação de uma relação ZR para acumulação diária, possibilitando a quantificação da precipitação em área regionalizada. A essa área regionalizada, com informação de chuva acumulada em resolução espacial de 1 km^2 ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) efetuou-se interpolação geoestatística.

O Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Universidade Estadual Paulista – IPMet/UNESP, em Bauru – SP, mantém a operação contínua de dois radares meteorológicos banda S – Doppler localizados em Bauru, no Centro do Estado, e em Presidente Prudente, no Oeste paulista. As informações resultantes das observações dos

radares são obtidas após processamento pelo programa proprietário, fornecido pela empresa SIGMET, denominado IRIS. Esse sistema permite a armazenagem dos dados básicos obtidos pelo radar e de diversos produtos. Um desses produtos é a quantificação horária da precipitação

O processo de quantificação inicia-se pela amostragem contínua da atmosfera, que é realizada em ciclos de varreduras de 360° graus executados pela antena do radar. A cada varredura, a antena do radar sofre uma elevação em seu ângulo de inclinação, até completar um ciclo de amostragem, composto por 11 elevações ($0,3^{\circ}$ a $34,9^{\circ}$). A cada ciclo, com duração de 7,5 minutos, toda porção da atmosfera no raio de alcance do radar é amostrada, gerando uma representação gráfica plana (mapa) das áreas com precipitações e suas respectivas intensidades estimadas. O mapa das áreas de precipitação representa a média das precipitações num plano com altura constante acima da superfície, que nos modos de operação dos radares da UNESP podem ser de 1,5 km ou 3,5 km. A denominação dada a esses mapas é a sigla CAPPI, do inglês, Indicador de Posição no Plano a Altitude Constante. A resolução espacial do CAPPI de ambos os radares é de 1 km^2 ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$).

O resultado dessas amostragens é uma matriz de 480×480 elementos contendo as refletividades médias, em dBZ, planificadas a uma altura constante da superfície terrestre, que em nosso estudo foi de 3,5 km, que podem ser apresentadas de forma gráfica ou em formato digital binário. A opção da utilização de CAPPI de 3,5 km é fruto de estudos de precipitação acumulada por radares, mensuradas em área limitada, igualmente equidistante dos radares meteorológicos de Bauru e de Presidente Prudente, ambos operados e mantidos pelo IPMet/UNESP (ANTONIO; ANTONIO, 2005a e b). Uma representação esquemática da amostragem executada para a composição de um CAPPI é apresentada na Figura 4.

Operacionalmente, são gerados CAPPIs em intervalos de 15 minutos ou 7,5 minutos quando há presença de precipitação no campo de cobertura do radar. Todos os CAPPIs armazenados entre janeiro de 1995 e dezembro de 1999, foram consistidos e processados para cálculo da precipitação diária.

Devido a esses limites na parametrização do IRIS para a geração do produto contendo a precipitação diária, o processamento dessa acumulação foi executado em

programa computacional específico permitindo maior controle e interação com os dados e resultados.

Durante o período analisado foi descartado o mês de dezembro de 1996 em função de excessivas refletividades encontradas fora dos limites máximos para precipitação (mesmo na presença de granizo), indicados por Rinehart (2004), de 76,5 dBZ.

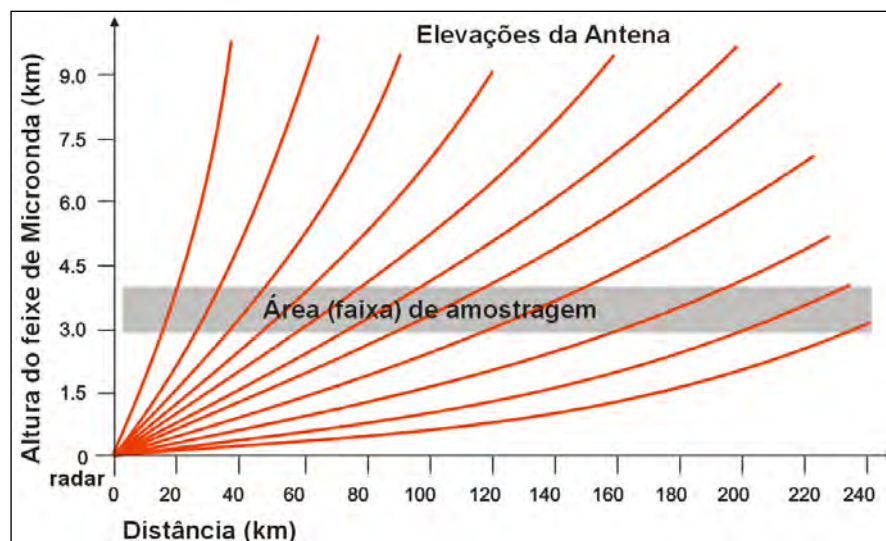


Figura 4. Representação esquemática da faixa de amostragem utilizada para a composição do campo de precipitação pelo radar. Os arcos em vermelho representam a curvatura do feixe de microonda (considerando a terra plana) nas diversas elevações utilizadas para a amostragem que é feita a uma altura média, da superfície terrestre, de 3,5 km.

As matrizes resultantes dos CAPPIs, em dBZ (refletividade), foram convertidas, individualmente, utilizando duas formas distintas:

- conversão das refletividades em precipitação, utilizando a relação $Z = 200.R^{1,6}$;
- conversão das refletividades de dBZ para Z ($Z = 10^{(dBZ/10)}$), considerando válidas as refletividades entre 15 dBZ e 65 dBZ.

Para a totalização diária, em ambas as formas, foram realizadas primeiramente as acumulações diárias, utilizando a mesma metodologia aplicada pelo IRIS,

que é a somatória das matrizes de (arquivos) CAPPISs existentes no período de 1 hora, sendo que se ocorrer um intervalo, entre dois CAPPISs, superior a 16 minutos, os dados do CAPPI sem seqüência na hora será descartado, dividindo-se o total pelo número de arquivos CAPPIS utilizados na acumulação.

Essa metodologia foi bem descrita por Figueiredo (2005) em que a chuva acumulada diária foi, inicialmente, calculada na escala horária, obedecendo ao critério relativo à quantidade mínima de arquivos, dividindo-se o valor acumulado pela quantidade de arquivos correspondentes, ao intervalo da hora admitindo-se que a mesma quantidade de chuva registrada em determinado minuto de hora se manterá até um minuto antes da próxima varredura do radar.

Em função da resolução dos dados de radar (1 km x 1 km) e da imprecisão da localização dos postos pluviométricos, disponíveis no SIGRH em minutos de Latitude e Longitude, optou-se por calcular a precipitação e refletância média sobre a posição estimada dos postos. Baseando-se nos estudos realizados por Fisch et. al (2005) e na distância média representada por 1 minuto Latitude ou Longitude na área de cobertura do radar, as acumulações foram calculadas pela média de 21 km² (20 elementos mais próximos ao elemento matricial em questão) relativa a cada elemento da matriz. Dessa forma, qualquer que seja o erro de posicionamento possível em 1 minuto de Latitude e/ou Longitude, entre a posição estimada e a posição real do posto, manteria uma correlação na medida pluviométrica acima de 0,65, conforme Fisch et al. (2005). Uma representação do modo utilizado para o cálculo da média de 21 elementos da matriz é apresentada pela Figura 5.

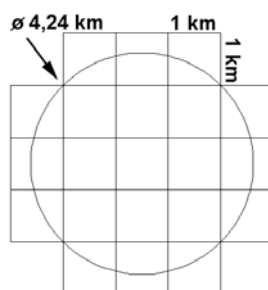


Figura 5. Representação dos elementos da matriz de dados do radar utilizados para cálculo do valor médio do elemento central à figura.

Nessa média, foram computados como válidos os elementos com valores superiores a zero e 15 dBZ (limiar mínimo para ocorrência de precipitação, CALHEIROS; ZAWADSKI, 1987) para o cálculo da refletância média. A Figura 6 apresenta os elementos da matriz do CAPPI (pixels) utilizados, sobre a posição estimada dos postos pluviométricos, para a confecção das médias.

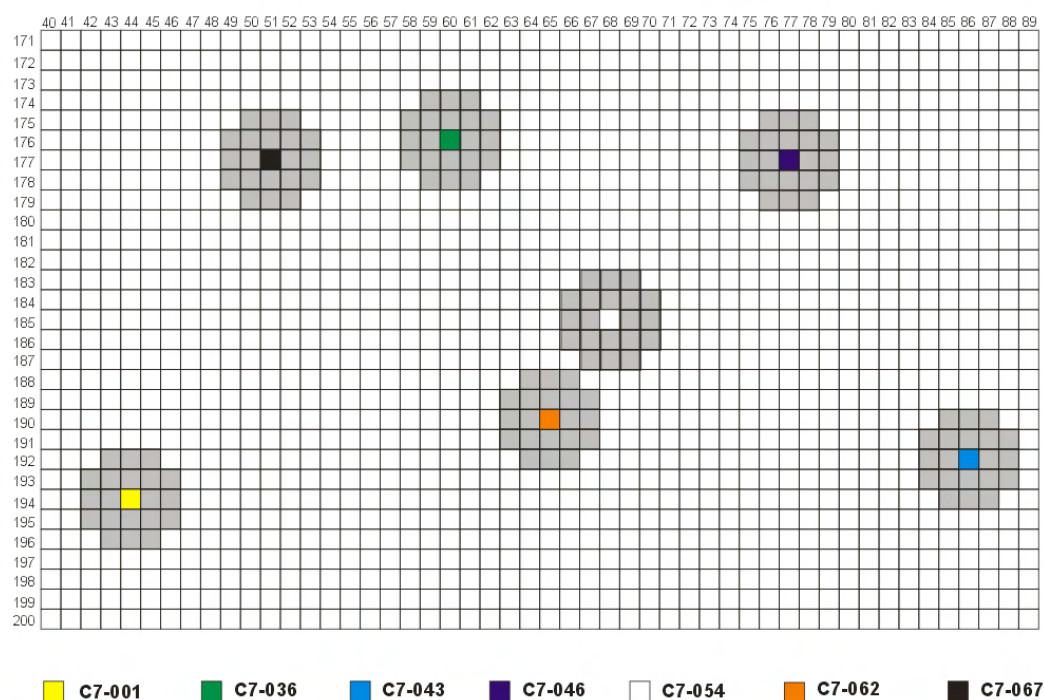


Figura 6. Representação da área delimitada sobre os elementos da matriz de dados do radar, com destaque para os elementos utilizados para cálculo dos valores médios, sobre a posição estimada do respectivo posto pluviométrico, conforme identificação em cores. Grade de 1 km², conforme índice matricial externo.

Após a totalização horária, os dados de chuva, em milímetros, e de refletividade “pura”, em Z, foram totalizados em 24 horas, considerando-se o mesmo período de acumulação dos pluviômetros que é, teoricamente, entre 07:00:00 h até às 06:59:59 h do

dia subsequente, sendo os dados em milímetros utilizados para consistência dos dados pluviométricos.

Durante a consistência de dados pluviométricos optou-se pela não utilização das acumulações registradas às sextas-feiras, aos sábados e aos domingos, por dois motivos: primeiramente, verificando a ocorrência ou não de chuva, dia a dia, foram observados vários eventos de chuva em que os registros dos pluviômetros ocorriam no dia subsequente ao registro do radar. Em uma análise posterior foram observados muitos eventos de chuva com alto índice pluviométrico em finais de semana, coincidindo com o anteriormente exposto. A inconsistência entre a presença ou não de precipitação num determinado dia não afeta significativamente este estudo, mas a excessiva presença de altos índices de precipitação diária interfere diretamente na determinação de relação ZR regionalizada, um dos objetivos deste trabalho. Na possibilidade de contaminação dos dados pluviométricos, optou-se pela redução do número de eventos computados, conforme mencionado no item 3.1.

Nas acumulações efetuadas com o radar, durante o período analisado, em 921 dias foram registradas refletividades na área delimitada, ou seja, em aproximadamente 50% dos dias entre 1995 e 1999.

3.3 Relação ZR

Para a determinação estatística da relação ZR, baseada na distribuição de freqüência representativa da área delimitada de 1.500 km² selecionada, foram elaborados os seguintes procedimentos:

- conversão dos totais diários em Z para dBZ ($\text{dBZ} = 10\log_{10}Z$);
- distribuição das freqüências da refletividade total diária (média de 21 elementos) sobre cada pluviômetro da área, em 60 classes de 2 dBZ a 62 dBZ;
- distribuição das freqüências de chuva total diária de cada pluviômetro (segunda à quinta-feira), em 60 classes de 2 mm a 120 mm;
- somatório das ocorrências em cada classe estabelecida, considerando que os registros observados em uma classe superior, obrigatoriamente, ocorreram nas classes inferiores (individualmente para cada pluviômetro);

- assumindo o valor da primeira classe como unitário (1), os valores das classes subseqüentes são frações do observado na primeira classe (somatório da classe dividido pelo somatório da primeira classe);
- construção das curvas de probabilidade, de frequência de ocorrência, de precipitação e refletividade (individualmente para cada pluviômetro);
- extração de 20 pares de mesma probabilidade (total de chuva e total de dBZ) diretamente das curvas de probabilidade determinadas para cada pluviômetro;
- construção de curvas de mesma probabilidade de mm/dia x dBZ/dia para cada pluviômetro;
- inserção de curva exponencial de ajuste para determinação de equação representativa da relação mm/dia x dBZ/dia para cada pluviômetro;
- média entre os parâmetros das curvas exponenciais ajustadas a cada pluviômetro, resultando em uma única curva exponencial de ajuste para todos os sete pluviômetros da área delimitada.

Para a determinação da ZR foram extraídos dois pares (R_1, Z_1 e R_2, Z_2) de valores da curva exponencial média ajustada, e aplicados à expressão empírica da ZR ($Z=AR^b$), em que:

$$10.\log_{10}Z = 10.\log_{10}A + 10.b.\log_{10}R \quad (15)$$

sendo $\text{dBZ} = 10.\log_{10}Z$, então:

$$\text{dBZ} = 10.\log_{10}A + 10.b.\log_{10}R \quad (16)$$

com os pares R_1, Z_1 e R_2, Z_2 obteve-se as equações:

$$Z_1 = 10.\log_{10}A + 10.b.\log_{10}R_1 \quad (17)$$

$$Z_2 = 10.\log_{10}A + 10.b.\log_{10}R_2 \quad (18)$$

subtraindo as equações (17) e (18) teve-se:

$$\begin{aligned} Z_1 - Z_2 &= 10.b(\log_{10}R_1 - \log_{10}R_2) \text{ ou,} \\ b &= (Z_1 - Z_2) / 10(\log_{10}R_1 - \log_{10}R_2) \end{aligned} \quad (19)$$

substituindo b em (17):

$$\begin{aligned} Z_1 &= 10.\log_{10}A + 10.b.\log_{10}R_1 \\ \log_{10}A &= (Z_1 - (10.b.\log_{10}R_1)/10) \end{aligned} \quad (20)$$

finalmente:

$$A = 10^{(Z_1 - (10.b.\log_{10}R_1)/10)} \quad (21)$$

A diferença básica dessa metodologia em relação à metodologia utilizada por Calheiros e Zawadski (1987), para a determinação de ZR probabilística, está centrada na base de dados e no tempo de integração da precipitação que no presente estudo foi de 24 horas por terem sido utilizados pluviômetros, enquanto no estudo anterior foi de dez minutos (dados originados de pluviógrafos), integrados em períodos de acumulações distintos. Outra característica relevante é que Calheiros e Zawadski (1987) visaram à determinação de ZRs corrigidas com a distância, resultando em relações aplicáveis à intervalos de distâncias (raios de alcance) distintas (anéis), enquanto que este estudo visa à determinação de ZR regionalizada.

Sendo este estudo efetuado somente com dados pluviométricos, o período de integração com os dados de radar foi de um dia (24 h), mantendo-se o intervalo teórico de leitura dos pluviômetros (07:00:00 às 06:59:59). Dessa forma foi possível utilizar uma base de dados, disponível para toda a cobertura do radar e suficiente para a elaboração deste estudo.

3.4 Geoestatística

Devido à sua variabilidade espacial e temporal, as precipitações oriundas de sistemas pluviométricos distintos tornam-se uma variável de difícil modelagem. A aplicação da geoestatística em estudos sobre precipitação tem crescido no Brasil. Especificamente, sua aplicação em informações provenientes de pluviômetros tem sido

significativa. Indicada para estimar uma variável em locais não amostrados, supondo a regionalidade e correlação numa distribuição espacial, a geoestatística, segundo Landim e Sturaro (2002), procura obter os valores situados numa determinada vizinhança e direção no espaço amostrado. Entre outras características, a aplicação da geoestatística em dados pontuais, esparsos e com distribuição heterogênea, como os dados pluviométricos, tem sido bem sucedida pelo tratamento dado à variáveis regionalizadas, sua continuidade espacial ou temporal, apresentado-se como um estimador mais apurado para a determinação de variáveis regionalizadas como são as precipitações.

A opção pela aplicação de metodologia geoestatística aos dados de radar visa minimizar erros ocasionados pela temporização das amostragens efetuadas em intervalos mínimos de 7,5 minutos. Considerando pequenas áreas (em relação à cobertura total do radar) e uma alta resolução (1 km^2), a acumulação diária calculada pelo sistema IRIS do radar pode ocasionar falhas na distribuição da precipitação. Como a totalização diária é resultante do somatório da acumulação horária, a amostragem temporizada de núcleos intensos de precipitação com deslocamento elevado, causa significativos intervalos sem amostragem sobre algumas pequenas áreas. Um exemplo raro da acumulação de núcleos de precipitação intensa e deslocamento acentuado é registrado na Figura 7 com a apresentação do acumulado diário do dia 14 de maio de 1994, calculada pelo sistema IRIS a partir de CAPPis de 3,5 km amostrados em intervalos de 15 min, pelo radar em Bauru. Esse efeito indesejado pode ser minimizado com a aplicação da metodologia geoestatística na distribuição da chuva acumulada em área.

Nesse sentido, considerando toda a área de cobertura de um radar e a utilização de seus dados em tempo “quase real”, a incorporação da metodologia geoestatística no âmbito da geração operacional de produtos é ainda restritiva, sendo as diferentes estruturas das precipitações um dificultador significativo à sua realização.

Seguindo o exposto por Carvalho e Assad (2002), a verificação de dependência espacial nos dados de precipitação acumulada por pluviômetros, na área delimitada para a experimentação será baseada em análises variográficas com os totais anuais de 1995 a 1999 e com o total dos cinco anos.

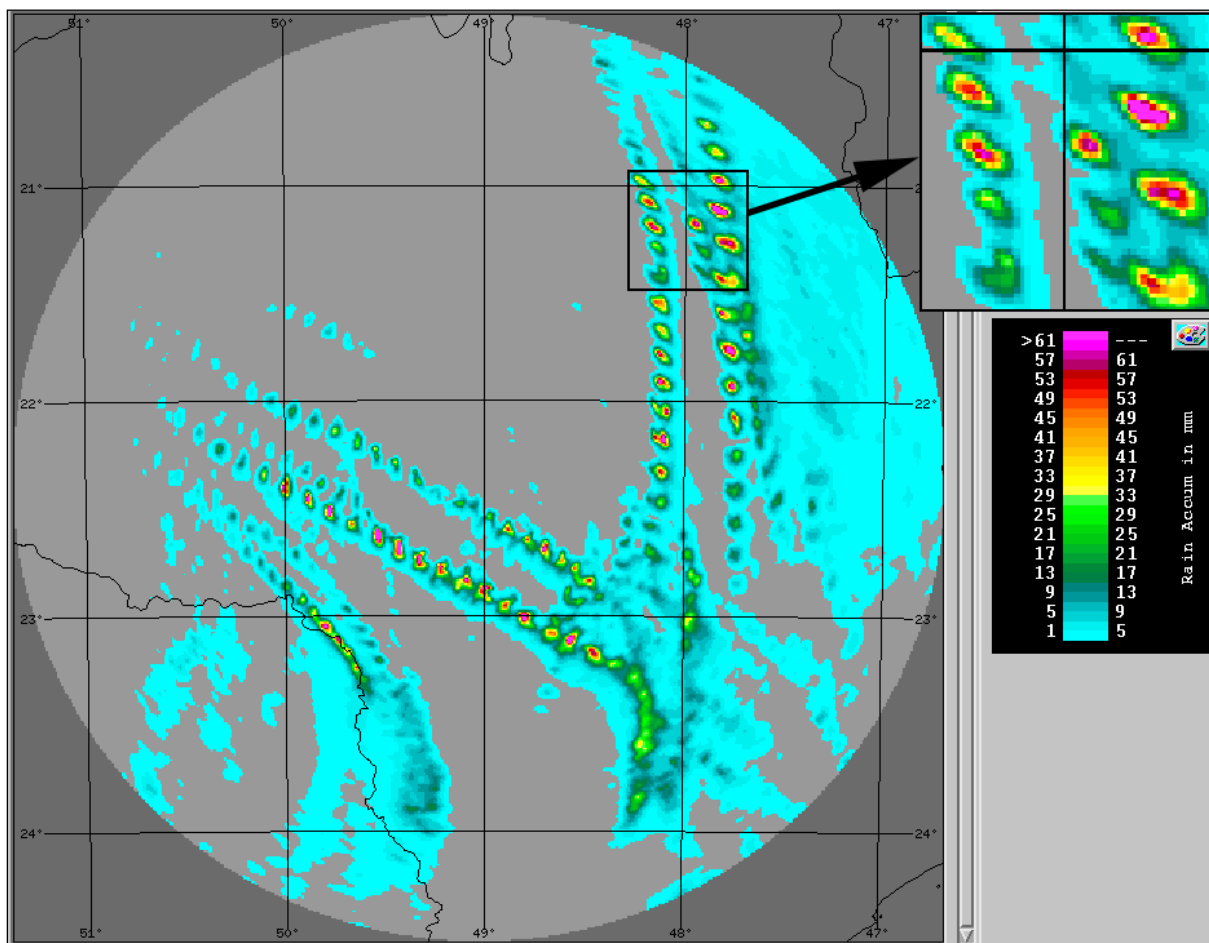


Figura 7. Saída gráfica semi-automática, gerada pelo sistema IRIS, do acumulado diário de 14 de maio de 1994, baseado em CAPPis de 3,5 km coletados em intervalos de 15 minutos, conforme escala de cores. Um detalhe ampliado de uma área com cerca de 2.500 km² (~50 km x ~50 km) foi adicionado acima da escala para destacar a descontinuidade na acumulação do IRIS.

Uma versão Beta do programa GS+, desenvolvido pela empresa Gamma Design Software, é utilizado para elaboração dos variogramas. Para a interpolação geoestatística da precipitação diária por radar na área experimental, foi aplicada a seguinte parametrização:

- krigagem por bloco (5 x 5, grade local);
- pontos adjacentes (vizinhos) 21;
- variograma isotrópico (modelo esférico);
- grade uniforme (1 km x 1 km).

A utilização de postos pluviométricos próximos (dentro do disponível) e em regiões semelhantes visou à interdependência das amostras em relação à influência de fatores que viessem atenuar as precipitações, e consequentemente a determinação da relação ZR regionalizada, como relevo acentuado ou próximo a grandes áreas urbanizadas, conforme estudo realizado por Antonio (2004) e Antonio (2006), sobre a distribuição e, conseqüente concentração, de núcleos de tempestades severas detectados pelo radar de Bauru, que identificou áreas com excessiva concentração desses núcleos nas Serras de Botucatu e de São Pedro e na Região Metropolitana de Campinas/SP. Procurando manter uma homogeneidade em relação ao regime de chuva anual médio entre os pluviômetros, a área de experimentação possui uma média histórica (1941 - 1970) de 1.300 mm anuais, conforme mapas climáticos do DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica, elaboradas por José Setzer, na década de 80 do século passado. O posicionamento dos pluviômetros em relação ao relevo e hidrografia da área de experimentação é representado na Figura 8.

Pela utilização relativamente recente da geoestatística em aplicações climatológicas e meteorológicas, ainda discreta no Brasil, pela variabilidade espacial e temporal das precipitações no Estado de São Paulo e, devido às restrições da rede de registros pluviométrica, entre outras características, optou-se pela utilização da metodologia geoestatística nos resultados de precipitação acumulada por radar.

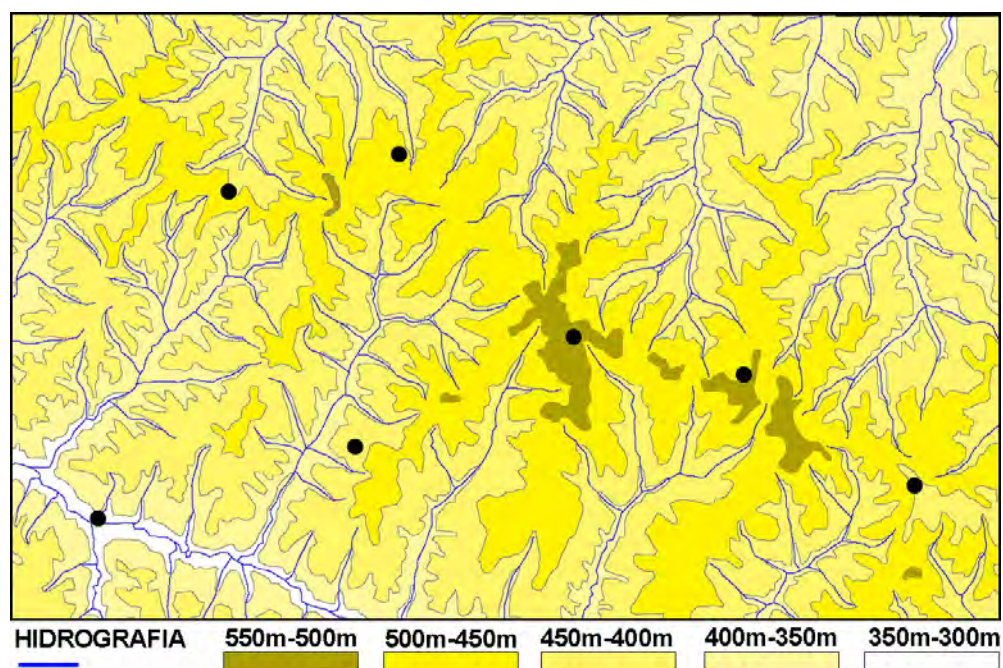


Figura 8. Hidrografia, altimetria e posicionamento dos postos pluviométricos na área de estudo (Fonte: IBGE, 1976). Pontos em pretos marcam a posição estimada dos postos pluviométricos (Fonte: www.sigrh.sp.gov.br).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Relação ZR

Comparando as distribuições de frequência de totais diários de chuva, medidos pelos pluviômetros da área de estudo, com o total de refletividade observado sobre cada pluviômetro, conforme descrito em 3.3, foi possível construir curvas de igual probabilidade de ocorrência de chuva e seu respectivo valor equivalente em refletividade.

Durante a construção das curvas de probabilidade com os totais diários registrados pelos pluviômetros foi possível verificar disparidades nas frequências das acumulações quando considerados os finais de semana (sexta, sábado e domingo). Essas distorções, ocasionadas pela maior concentração de elevados índices de precipitação diária em finais de semana, são apresentadas pelos gráficos da Figura 9, que mostram as curvas de probabilidade de ocorrência diária de chuva em cada pluviômetro utilizado nesse estudo.

Optando-se pelo descarte dos totais diários de chuva nos finais de semana foram elaboradas as probabilidades de frequência acumulada das chuvas obtidas pelos pluviômetros e pelo radar (sobre a posição estimada dos pluviômetros), conforme apresentados pelas Figuras 10 e 11.

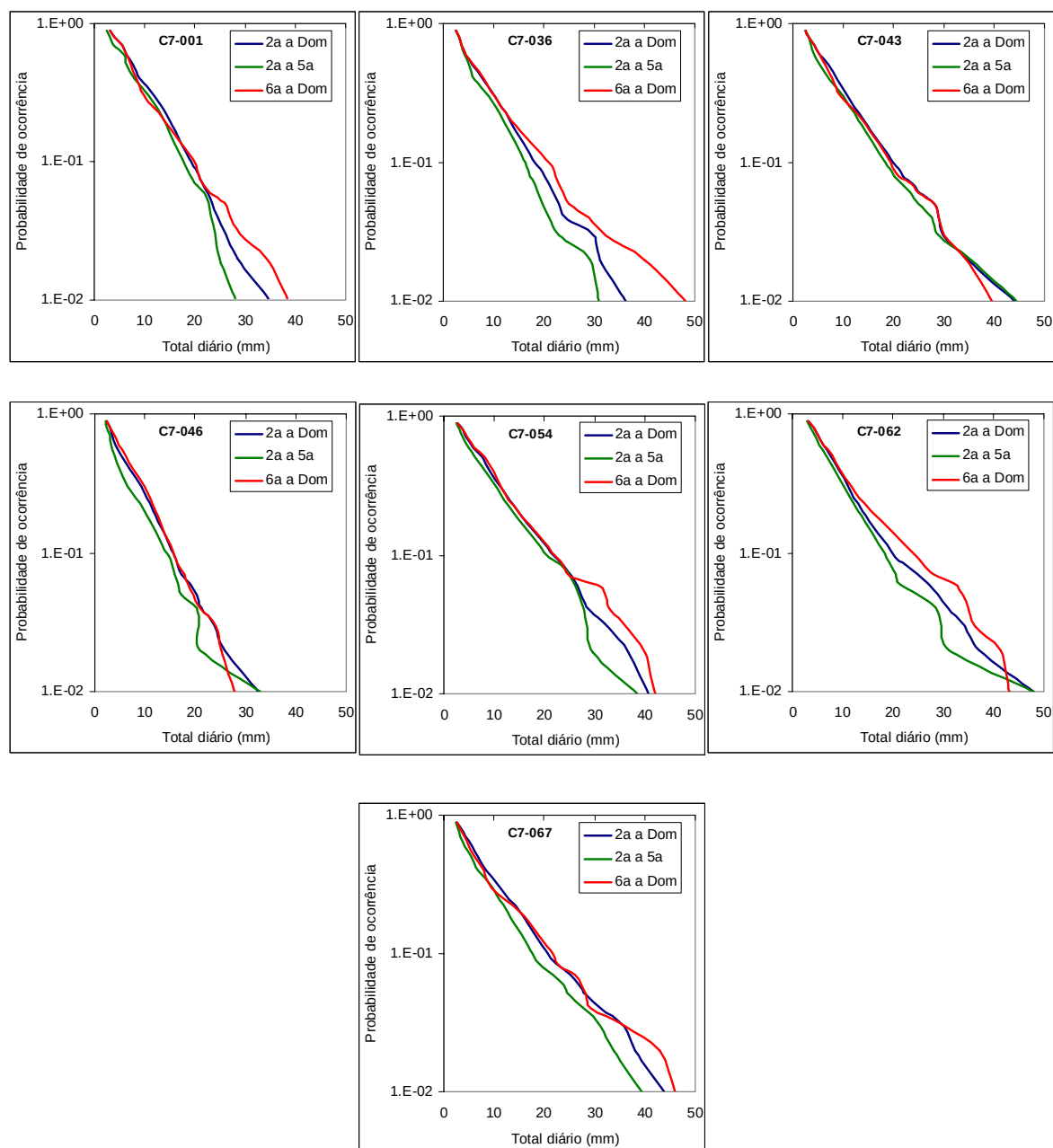


Figura 9. Probabilidade de ocorrência de chuva diária por pluviômetros, conforme identificação dos postos, considerando-se períodos distintos de acumulação: de segunda-feira a domingo (2a a Dom), de segunda-feira a quinta-feira (2a a 5a) e de sexta-feira a domingo (6a a Dom).

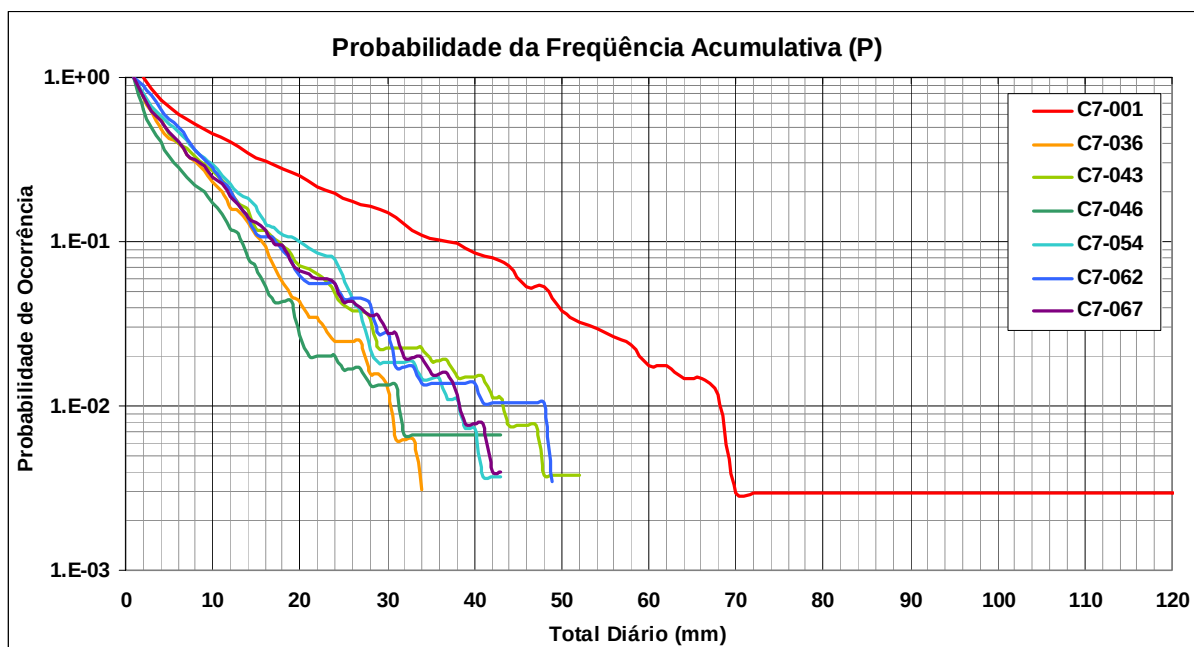


Figura 10. Probabilidade de ocorrência de total de precipitação diária, entre 1995 e 1999 (dados de 2ª à 5ª), para os pluviômetros inclusos na área de estudo.

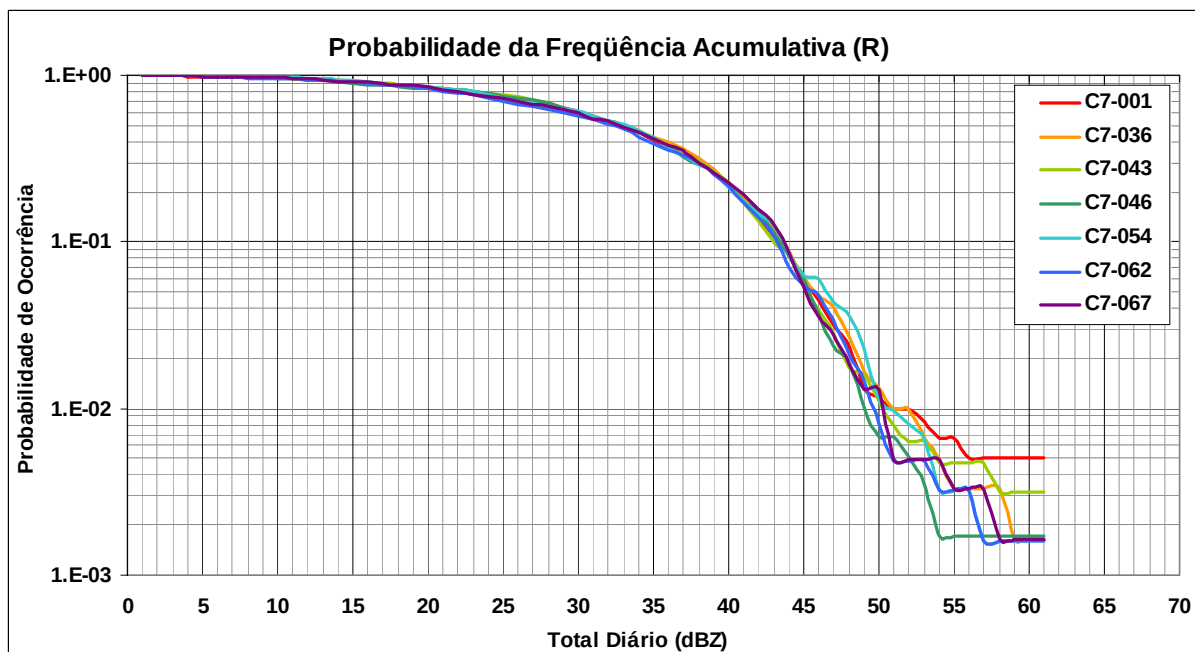


Figura 11. Probabilidade de ocorrência do total diário de dBZ, de 1995 a 1999, sobre os pluviômetros inclusos na área de estudo.

Confrontando valores probabilidade de chuva diária (R em mm/dia) e refletividade diária (Z em dBZ/dia) foram construídas curvas utilizando pares de R e Z cuja probabilidade de ocorrência fosse igual, ou seja, para uma probabilidade valor “n” utilizou-se os valores de R e Z diário correspondentes a essa probabilidade “n”. A partir dos pares selecionados foram elaboradas curvas de probabilidade entre as frequência de ocorrência de totais diários de chuva e dBZ, sendo ajustadas curvas exponenciais (retas) para cada postos, individualmente. As curvas resultantes da seleção de pares de mesma probabilidade com as respectivas curvas exponenciais ajustadas são apresentadas na Figura 12.

Para a determinação de uma relação ZR representativa da área em estudo e, conseqüentemente, de todos os postos selecionados, foi estabelecida uma única curva exponencial de ajuste para todas as curvas de igual probabilidade entre as frequências de ocorrência diárias, utilizando as médias aritméticas dos parâmetros a e b das equações exponenciais ajustadas para cada pluviômetro. Os parâmetros a e b de cada exponencial ajustada e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), juntamente com os valores médios obtidos e respectiva variância e desvio padrão são apresentados na Tabela 5. A Figura 13 apresenta o gráfico com ajuste exponencial das curvas de igual probabilidade entre as frequências de ocorrência diária dos sete postos selecionados.

Tabela 5. Coeficientes da equação exponencial ajustada para cada pluviômetro e respectivo coeficiente de determinação, conforme identificação. Os valores médios (MD), o desvio padrão (D.P.) e a variância (VAR) dos parâmetros são também apresentados.

Posto	a	b	R^2
C7-001	0,3377	0,1057	0,9606
C7-036	0,2150	0,0968	0,9773
C7-043	0,1521	0,1099	0,9733
C7-046	0,1126	0,1095	0,9502
C7-054	0,1778	0,1080	0,9809
C7-062	0,3415	0,0929	0,9669
C7-067	0,1577	0,1086	0,9743
MD	0,2135	0,1045	
D.P.	0,091425	0,0068	
VAR	0,008358	5.E-05	

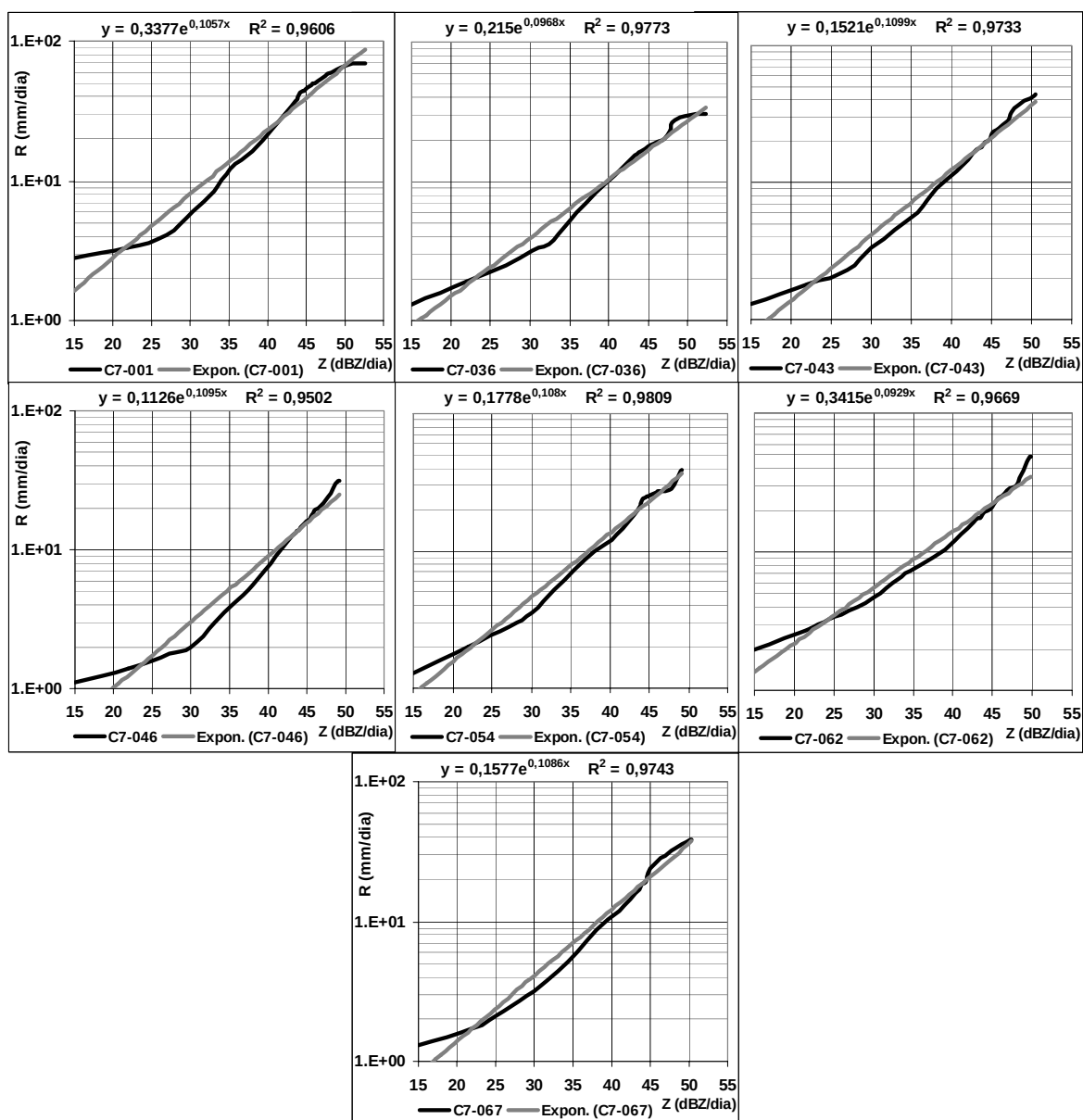


Figura 12. Curvas de probabilidade entre as freqüência de ocorrência de total diário de chuva (R - mm/dia) e refletividade (Z - dBZ/dia) sobre os pluviômetros, com a respectiva curva exponencial (reta) de ajuste médio, conforme identificação dos postos inseridos nos gráficos.

Para a determinação da ZR foram extraídos dois pares (R_1, Z_1 e R_2, Z_2) diretamente da curva exponencial média ajustada à área e aplicados a expressão empírica da ZR ($Z = AR^b$), como detalhado em 3.3. Dessa forma, os valores encontrados para os

parâmetros A e b foram, respectivamente, 47 e 2,07 sendo a relação ZR determinada para a área de experimentação expressa por $Z = 47.R^{2,07}$, cuja aplicabilidade visou a acumulação diária.

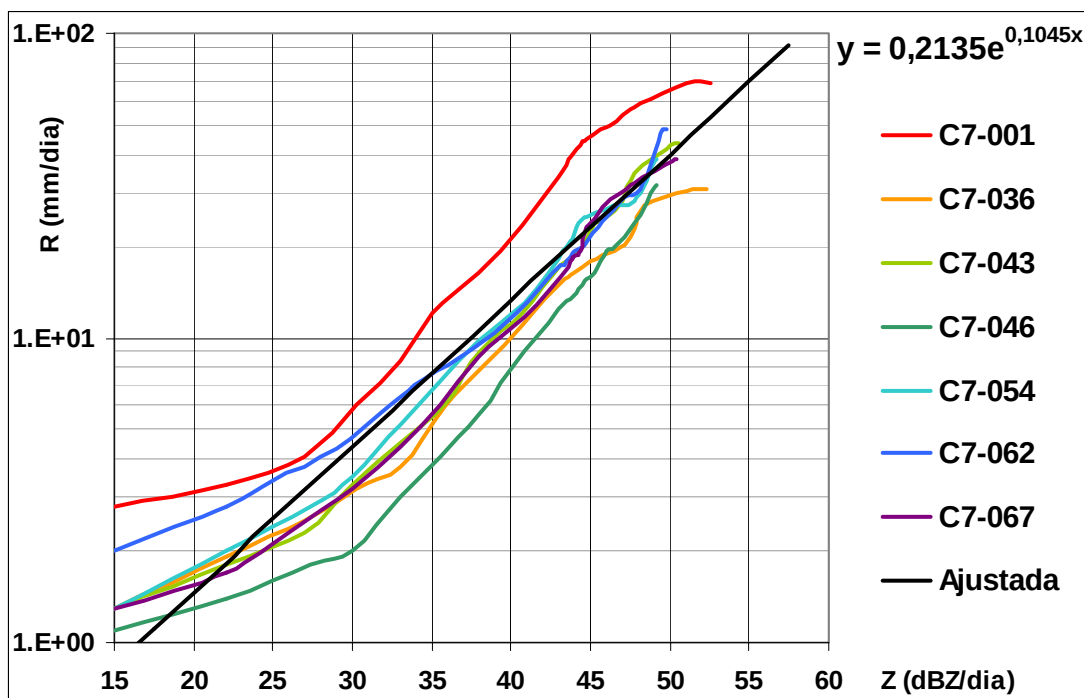


Figura 13. Probabilidades das freqüências de ocorrência diária de chuva por pluviômetro e respectivas probabilidades de refletividades (média de 21 km²) por radar, sobre os pluviômetros, conforme identificação dos postos pluviométricos, e respectiva exponencial de ajuste médio (reta).

Para verificação da ZR determinada, foram realizados testes na área delimitada com dados do mês de janeiro de 2000. O posto C7-036 deixou de operar nesse ano, reduzindo para seis o número de postos do SIGRH existentes na área. Foi acrescentado o posto de Tupã, do IAC (Instituto Agrônômico), para verificação do desempenho da ZR na área de estudo, o qual está localizado nas coordenadas S21°56'04.8" e W50°30'49.2", próximo do posto C7-043, que pelas informações disponíveis no SIGRH encontra-se nas coordenadas S21°56' e W50°30' (sem precisão em segundos).

Nessa verificação foram totalizados pontualmente (somente um elemento da matriz), sobre o pixel de 1 km² da matriz do CAPPI correspondente ao posto

Tupã do IAC, os totais diários de precipitação. Para manter uma padronização nos resultados a totalização diária seguiu a metodologia utilizada pelo sistema operacional IRIS/Sigmet dos radares do IPMet/UNESP, sendo aplicadas duas relações ZR distintas: $Z=200.R^{1,6}$ (clássica) e $Z=47.R^{2,07}$ (regionalizada). Na comparação entre os pluviômetros do IAC e do DAEE (SIGRH), ambos em Tupã/SP, as curvas de acumulações apresentaram um relativo paralelismo só que defasado em um dia, indicando leituras distintas num mesmo evento chuvoso. Entre as curvas obtidas pelas acumulações pontuais por radar, a equação ZR regional determinada para a área de estudo foi a que mais se aproximou da curva da estação do IAC, ficando a relação ZR clássica com os menores índices de acumulação. As maiores discrepâncias entre as leituras dos pluviômetros, localizados a curta distância, ocorreram nos dias 2, 3, 4 e 31 de janeiro.

Analizando imagens de radar e de satélite meteorológico desses dias é possível verificar incompatibilidade nos registros do posto C7-043, em função das coberturas de nuvens e das áreas de chuvas verificadas pelo radar na região e na área de experimentação, reforçando a opção pela metodologia aplicada para a determinação da ZR probabilística. Em relação à totalização no período entre 2 e 31 de janeiro, a diferença entre o acumulado total do posto do IAC e o estimado pontualmente pela relação regional foi da ordem de 18%, enquanto que pela relação clássica foi da ordem de 44%. As curvas de massa utilizadas nessas análises são representadas na Figura 14, e os totais diários na Tabela 6.

Tabela 6. Totais de chuva diária observada pelos pluviômetros em Tupã e no pixel de 1km^2 sobre o pluviômetro do IAC, estimados pelas ZRs $Z=47.R^{2,07}$ (AD) e $Z=200.R^{1,6}$ (MP), no período de 2 a 31 de janeiro de 2000, com os respectivos totais mensais.

JAN	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
IAC	35,5	2,0	0,0	43,8	1,7	0,0	35,1	2,5	6,0	0,0	2,4	25,7	0,0	5,4	0,5	
AD	0,0	0,0	13,9	3,8	0,0	22,2	5,6	18,0	0,0	8,1	10,2	0,0	11,5	2,0	1,0	
MP	0,0	0,0	11,6	1,0	0,0	15,8	4,2	16,0	0,0	5,8	6,5	0,0	8,8	1,0	0,0	
C7-043	0,0	44,0	40,5	1,1	2,1	38,2	1,9	0,0	4,5	4,4	28,4	0,0	0,0	14,0	0,0	
↶	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Total
IAC	0,0	2,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,6	0,0	0,0	0,0	1,5	166,3
AD	7,9	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	3,8	0,0	0,0	3,0	2,3	17,0	136,8
MP	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0	1,0	1,5	12,5	92,7
C7-043	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	45,2	226,4

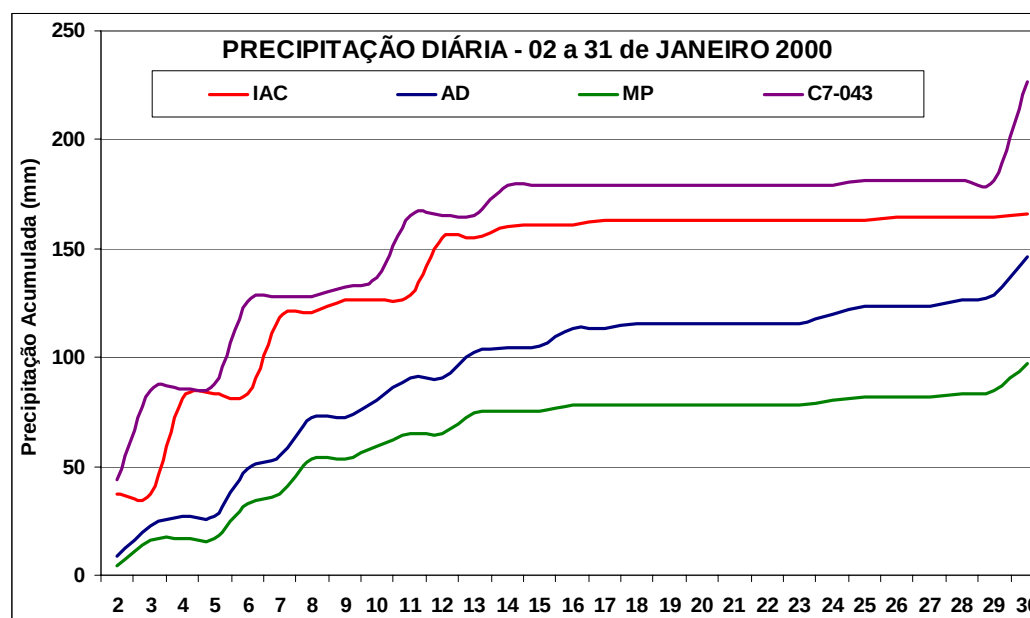


Figura 14. Curva de massa dos pluviômetros em Tupã/SP dos postos do IAC e C7-043, juntamente com a acumulação pontual por radar (sobre posto do IAC) com as relações $Z=200.R^{1,6}$ (MP) e $Z=47.R^{2,07}$ (AD).

4.2 Geoestatística

Para as distribuições geoestatísticas das precipitações em área, objetivo principal desse estudo, foram elaboradas análises variográficas nos totais de chuvas diárias registradas pelos seis pluviômetros em todos os dias, em que houve ocorrência de registros, do período entre 1 e 31 de janeiro de 2000. Dos 31 dias analisados, em seis dias não ocorreram registros em nenhum dos pluviômetros. Nos dias restantes foram identificadas dependências espaciais com índices superiores a 0,50 em somente seis dias (valores entre 0 e 1 indicam correlação direta), sendo predominante o ajuste do modelo esférico nas análises variográficas. O efeito pepita, que indica a inexistência de dependência espacial ou insuficiência de pontos amostrados, foi observado em 13 dias da série. Esses resultados indicam a necessidade de utilização de séries temporais extensas, vários meses ou anos, para obtenção de dependência espacial da precipitação por pluviômetros, como nos estudos Holawe e Dutter (1988), Goovaerts (1999) e Carvalho e Assad (2002), que utilizaram séries temporais com 20 anos, 25

anos e 40 anos, respectivamente. Outro aspecto a ser observado é que em janeiro, em nosso Estado, é predominante a ocorrência de precipitação convectiva, caracterizada por chuvas intensas, de curta duração e de grande variabilidade espacial. Essa precipitação característica é um grande dificultador na estimativa de chuva acumulada em área, proveniente de registros pluviométricos, principalmente quando considerada a resolução espacial.

Análises variográficas resultantes dos totais anuais das precipitações registradas pelos pluviômetros da área apresentaram bom ajustamento pelo modelo Gaussiano, indicando presença de dependência espacial. Quando considerada a média ou o total dos cinco anos, o modelo de melhor ajustamento foi o esférico. A Tabela 7 apresenta os resultados das análises variográficas e os modelos que apresentaram os melhores ajustes, nos totais anuais, no total e média do quinquênio, para os pluviômetros da área de experimentação.

Tabela 7. Resultados das análises variográficas dos pluviômetros da área de experimentação.

Ano	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	Modelo	R ² (modelo)	R ² (val.cruz.)
1995	10	8.130	24,1	Gaussiano	0,99	0,55
1996	17.900	86.900	46,5	Gaussiano	0,72	0,29
1997	10	8.625	11,7	Gaussiano	0,69	0,70
1998	100	32.620	14,8	Gaussiano	0,70	0,79
1999	10	17.110	26,0	Gaussiano	0,96	0,12
1995-1999	32.900	99.590	15,1	Esférico	1,0	0,83
Média 95/99	1.351	3.988	15,3	Esférico	1,0	0,84

Os resultados obtidos para o Efeito Pepita (C_0), que revela a descontinuidade do variograma para distâncias menores que a distância entre as amostras, e para o Patamar (C), que mostra o limite da dependência espacial entre as amostras, sugerem dois aspectos: erros de medição ou variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1988). O aumento no número de pluviômetros

amostrados levaria a um aumento significativo da área delimitada em função das distâncias entre os pluviômetros, reduzindo a eficiência de uma relação ZR regionalizada.

A distribuição média da precipitação (isoietas) baseada em dados pluviométricos, no período de 1995 a 1999, sobre a área de estudo, gerada por krigagem, é apresentada pela Figura 15.

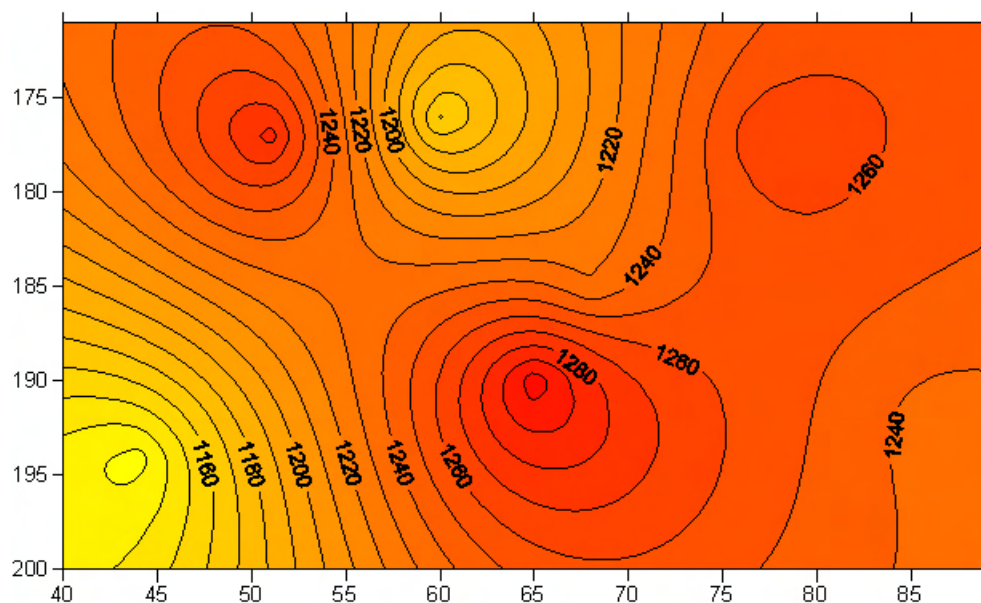


Figura 15. Isoietas do total médio quinquenal (1995 - 1999) na área delimitada para estudo. Índices da matriz de CAPPI, em quilômetros, anotados externamente.

As acumulações diárias baseadas em dados do radar meteorológico foram analisadas utilizando-se os mesmos processos aplicados aos pluviômetros, sendo utilizada a relação ZR determinada para a área de estudo ($Z = 47.R^{2,07}$).

O radar não detectou precipitações sobre a área experimental em 9 dias no mês de janeiro de 2000, os quais não coincidiram plenamente com os dados pluviométricos. As análises variográficas realizadas nos demais dias apresentaram melhor ajuste com modelo esférico em aproximadamente 80% das acumulações diárias, sendo que nos dias em que outro modelo obteve um ajuste melhor os índices de alcance efetivo, proporcionalidade e ajustamento foram muito próximos dos índices do modelo esférico. Pelos resultados das análises optou-se pela aplicação do modelo de semivariograma esférico para os

dados de precipitação acumulada por radar na área de estudo, no mês de janeiro de 2000, o qual é dado por:

$$\gamma(h) = s \begin{cases} \left(\frac{3|h|}{2a} - \frac{1|h|^3}{2a^3} \right) & |h| \leq a \\ s & |h| > a \end{cases} \quad \text{se} \quad (22)$$

em que:

γ : variância

h : distância

a : alcance

Os resultados da aplicação do modelo esférico foram considerados satisfatórios em relação aos coeficientes de determinação (R^2), os quais apresentaram valores superiores a 0,7 com exceção de um dia. No dia 25 de janeiro de 2000 o ajuste do modelo esférico à matriz de acumulação diária, foi próximo de 0,4 em virtude da ocorrência de áreas de precipitação com deslocamento rápido, conforme informações obtidas nos CAPPIs de 15 minutos entre 18:01h e 19:01h, apresentando concentração superior a 40 mm numa área de aproximadamente 5 km² (0,003% da área de experimentação). Nessa área, no CAPPI de 3,5 km de altura, às 18:16h foi detectado um núcleo de precipitação com cerca de 70 mm de intensidade, considerado como núcleo de tempestade potencialmente severa. Como não houve a extração de “outlayers” (registros incompatíveis foram extraídos no processamento inicial, conforme mencionado em Metodologia), a pontualidade desse evento (não detectado pelos pluviômetros) resultou no baixo índice de ajustamento do modelo esférico, mas com um elevado índice de ajustamento na validação cruzada dos dados, apresentando valor superior a 0,9, conforme mostra a Tabela 8, juntamente com os demais dias de janeiro de 2000 em que ocorreram detecções de chuvas pelo radar na área experimental.

Valores diferentes foram encontrados na comparação entre as distribuições em áreas das chuvas diárias, registradas por pluviômetros e por radar. As distribuições resultantes de pluviômetros ficam muito prejudicadas pela inconsistência entre os registros de um mesmo evento chuvoso.

Tabela 8. Coeficientes de determinação (R^2) do modelo esférico de semivariograma e da validação cruzada (VC) aplicados aos dados das acumulações diárias no mês de janeiro de 2000, obtidas por radar, na área experimental de 1.500 km², em grade de 1 km².

DIA	1	2	4	5	7	8	9	11	12	13	14
R^2	0,903	0,741	0,853	0,707	0,962	0,989	0,884	0,989	0,889	0,899	0,967
VC(R^2)	0,911	0,814	0,879	0,941	0,948	0,922	0,872	0,910	0,939	0,440	0,950
DIA	15	16	17	18	19	20	25	26	30	31	Total
R^2	0,763	0,774	0,830	0,854	0,966	0,867	0,394	0,905	0,836	0,943	0,709
VC(R^2)	0,770	0,845	0,932	0,644	0,935	0,651	0,907	0,937	0,794	0,848	0,891

Nos dias em que não houve detecções por radar, mas ocorreram registros em pluviômetros da área experimental, foram analisadas as imagens infravermelhas do satélite meteorológico geoestacionário GOES para verificação da presença de coberturas de nuvens sobre a região. Um exemplo desse tipo de ocorrência é observado no dia 27 de janeiro de 2000, onde os pluviômetros na área registraram as seguintes acumulações:

- C7-001 = 8,7 mm;
- C7-043 = 0,0 mm;
- C7-046 = 101,0 mm (índice superior ao período de retorno de 2 anos, Tabela 4);
- C7-054 = 28,9 mm;
- C7-062 = 0,0 mm;
- C7-067 = 23,7 mm.

Nesse dia, não ocorreram registros de precipitações próximas às áreas dos pluviômetros, segundo dados dos radares do IPMet/UNESP (Bauru e Presidente Prudente) e, as imagens do satélite não mostram cobertura de nuvens sobre a região. Outro exemplo de incompatibilidade entre as observações dos pluviômetros e dos radares ocorreu em 30 de janeiro de 2000, quando ambos os radares detectaram várias áreas de precipitação sobre a área de experimentação, no período da tarde, condizente com as imagens de satélite que mostram uma intensa cobertura de nuvens sobre a região na tarde deste dia, mas não houve nenhum

registro de precipitação pelos pluviômetros. Pelo exposto, estima-se que nos dois eventos ocorreram erros nos registros pluviométricos.

Mesmo utilizando igual método de interpolação geoestatística (krigagem) nas acumulações diárias por radar e por pluviômetros, os resultados pouco se aproximaram, indicando não ser adequada a comparação diária entre as duas acumulações (radar e pluviômetros), como apresenta a literatura utilizada, onde a distribuição temporal das análises é efetuada com períodos, no mínimo, mensais.

Atualmente não é possível a geração automática da chuva acumulada diária pelo sistema proprietário (IRIS/Sigmat) dos radares meteorológicos do IPMet/UNESP. O sistema IRIS gerencia e controla todas as rotinas operacionais dos radares, sendo responsável pela geração de produtos destinados à pesquisa e à disseminação em geral. Todo produto gerado pelo sistema IRIS é baseado em uma única relação ZR, responsável pela representação da chuva nos 181.000 km² monitorados pelo radar, não havendo nesse sistema uma tarefa (rotina) automática que permita a geração da chuva acumulada diária, somente horária, sendo necessária a intervenção humana para o cálculo da chuva diária. Os resultados da acumulação diária, gerados no IRIS, podem ser disponibilizados graficamente, como já apresentado.

Para a comparação entre as acumulações diárias por pluviômetros e por radar, geradas pelo IRIS e pelo presente estudo, foram elaborados manualmente a extração e ampliação dos campos de chuva diária acumulada gerados pelo sistema IRIS no mês de janeiro de 2000, com a relação ZR operacional no IPMet/UNESP ($Z = 200.R^{1,6}$). Nas acumulações com interpolação geoestatística foi utilizada a relação ZR probabilística determinada para a área de experimentação ($Z = 47.R^{2,07}$), sendo a resolução espacial de 1 km² (resolução do CAPPI). Acumulações por radar são oriundas de observações contínuas em intervalos mínimos de 7,5 minutos, como descrito em 3.3, a observação numa resolução de poucos quilômetros pode ser comprometida na ocorrência de precipitação convectiva de curta duração ou com rápido deslocamento. Nesse sentido, a aplicação da interpolação geoestatística nas acumulações da chuva por radar reduz o efeito de segmentação da acumulação resultante da amostragem cíclica dos CAPPIs.

Os resultados dessas comparações podem ser visualizados na Figura 16, composta por três campos de chuva acumulada diária em dia 31 de janeiro de 2000. O

campo superior é resultante da interpolação geoestatística, com krigagem (modelo linear) baseada em dados dos pluviômetros, em isoietas. O campo central é um detalhe ampliado da saída gráfica da chuva acumulada gerada pelo sistema IRIS utilizando a relação $Z=200.R^{1,6}$, onde estão anotadas as posições dos pluviômetros. O campo inferior apresenta a chuva acumulada com interpolação geoestatística (krigagem com modelagem esférica) e aplicação da relação $Z=47.R^{2,07}$, sob uma grade de 1 km^2 . As diferenças entre as formas de apresentação dos campos de chuva acumulada e de suas respectivas escalas ocorrem em função dos diferentes sistemas (programas) utilizados na elaboração dos mesmos.

As acumulações geradas pelo IRIS e modelagem geoestatística foram semelhantes, como era esperado, mas quando considerada somente a distribuição sobre área limitada, a interpolação geoestatística apresenta uma suavização melhor e permite a utilização de uma escala adequada às acumulações da área em questão, já que a escala gerada pelo sistema IRIS é aplicada a toda área coberta pelo radar, conforme já apresentado pela Figura 7. Fragmentações observadas na acumulação realizada pelo IRIS não se apresentam nas acumulações com interpolação geoestatística (Figura 16), minimizando erros ocasionados pela temporização na amostragem do radar.

As Figuras com os gráficos das acumulações diárias mais representativas em janeiro de 2000, limitados a área de experimentação, estão dispostos no APÊNDICE 2, juntamente com detalhes das imagens em infravermelho do satélite GOES em dias em que não houve conformidade na identificação da presença de precipitação entre radar e pluviômetros, na área em questão.

4.3 Considerações Finais

As distribuições em área de acumulações diárias baseadas em dados pluviométricos dependem da confiabilidade da informação coletada. Equações empíricas de máxima intensidade e frequência de precipitação, apesar de elaboradas com registros pluviográficos, utilizam dados pluviométricos a fim de completar os estudos das chuvas para duração entre 2 e 6 dias (PFAFSTETTER, 1982). Nesse sentido, a utilização da metodologia apresentada na consistência dos dados pluviométricos apresenta-se como uma ferramenta para verificação da confiabilidade das informações coletadas.

O uso de dados pluviométricos para a determinação de uma relação ZR regionalizada, visando à quantificação da precipitação diária, torna-se uma alternativa viável, principalmente quando considerada a distribuição irregular dos pluviômetros e a escassez de pluviógrafos. Os testes realizados com a adaptação da metodologia, proposta por Calheiros e Zawadzki (1987), para determinação da ZR, resultaram em acumulações com valores mais próximos dos registros pluviométricos, quando comparadas às acumulações diárias geradas pelo sistema operacional do radar (IRIS).

Na utilização de pluviômetros para a determinação de ZR regionalizada sugere-se atenção no uso de séries muito extensas (antigas), em função de possíveis alterações na morfologia da região, conforme estudo recente apresentado por Antonio e Antonio (2007), que identificaram indícios de alteração nos regimes mensais e anuais da precipitação na Região do Pontal do Paranapanema, SP, após a formação do reservatório da UHE de Porto Primavera.

A metodologia de acumulação por radar sugerida (acumulação diária executada em valores de Z e posteriormente convertidos em dBZ), possibilita a utilização simultaneamente de várias relações ZR. Dessa forma, em um campo de precipitação acumulada por radar (raio de 240 km) pode-se utilizar simultaneamente ZRs distintas, ajustadas regionalmente, resultando em acumulações específicas para cada área delimitada, como por exemplo, sub-bacias hidrográficas ou propriedades rurais.

As interpolações geoestatísticas aplicadas às acumulações por radar apresentaram melhores distribuições espaciais em relação às totalizações obtidas pelo sistema IRIS, permitindo a utilização de escalas pluviométricas ajustadas às quantificações em áreas limitadas.

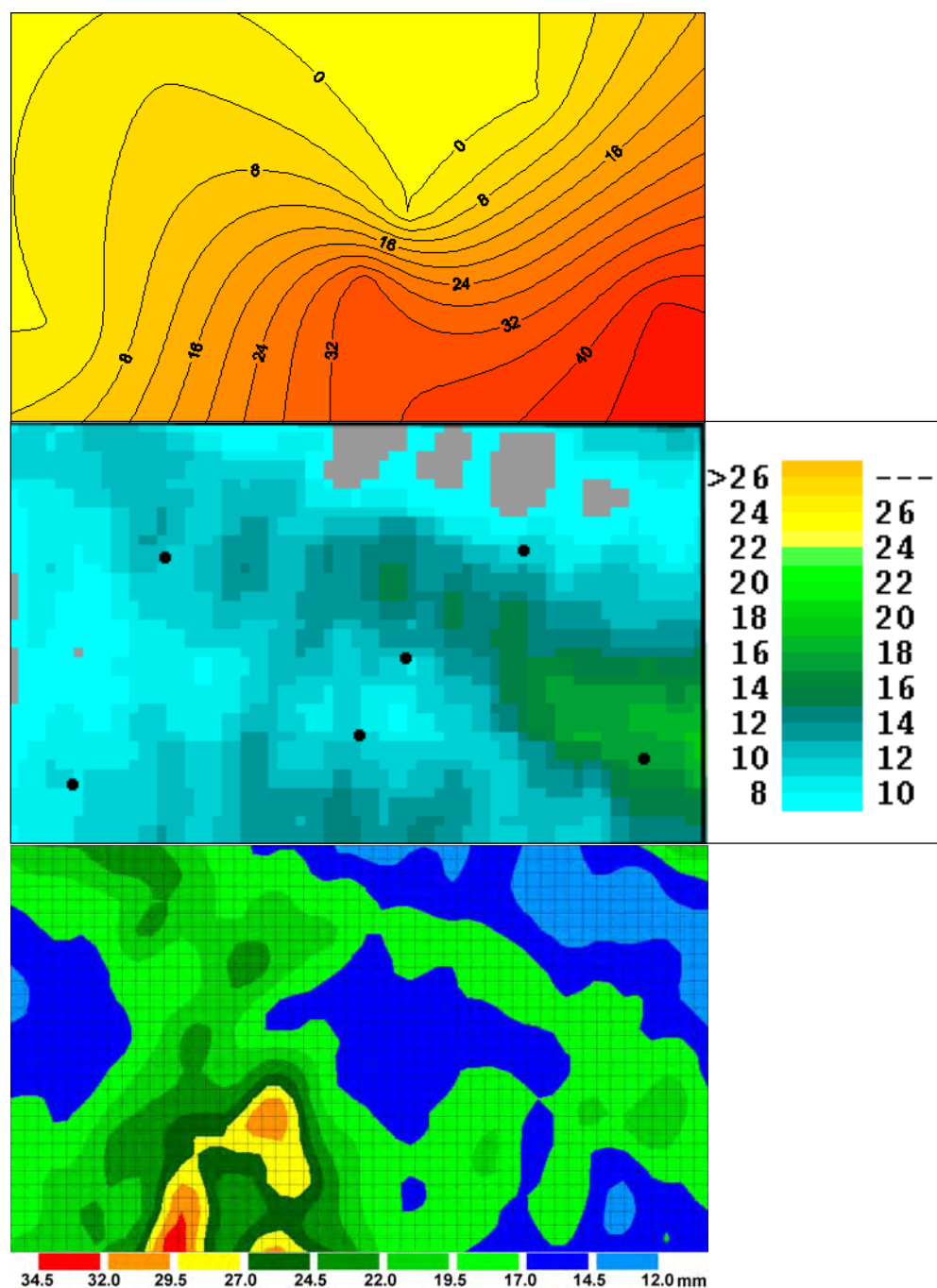


Figura 16. Campos de precipitação diária de 31 de janeiro de 2000 na área experimental. Na parte superior, isoiets resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1.6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2.07}$.

5 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a aplicação da geoestatística na acumulação diária por radar, em área limitada, apresenta uma distribuição da chuva mais condizente, dissimulando as fragmentações observadas nas acumulações do atual sistema do radar;
- significativa melhora na resolução espacial, com tratamento geoestatístico, também deve ser considerada, pois o sistema do radar é restritivo na utilização de áreas delimitadas para acumulações;
- a utilização de radares meteorológicos na obtenção da chuva acumulada diária apresenta-se como uma complementação às informações fornecidas por redes pluviométricas de baixa densidade, ou pela inexistência dessas redes;

- pela automatização permitida ao sistema, as acumulações diárias geradas pelo radar podem ser disponibilizadas imediatamente após a totalização diária, possibilitando a utilização instantânea das informações, seja por agricultores ou em cálculos de amplitudes hídricas, entre outros;

- as metodologias utilizadas na consistência de dados pluviométricos e na determinação da ZR podem ser aplicadas em outros tipos de dados para análises similares;

- para utilização em esquema operacional há a necessidade de ajustamento de outras relações ZRs adequadas às diferentes regiões monitoradas pelo radar.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONIO, C. A. de A. Uso da Geoestatística na Comparação da Acumulação de Precipitações Obtidas por Pluviômetro e por Radar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004.

_____. Núcleos de Tempestades severas Observadas por Radar Meteorológico na Região Central do Estado de São Paulo Durante o Verão 2003/2004. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004.

_____. Distribuição de Núcleos de Tempestades Potencialmente Severas na Região Central de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBMET, 2006.

_____.; ANTONIO, M. de A. Radar versus Radar na Acumulação da Precipitação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: EMBRAPA, 2005.

ANTONIO, M. de A. **Técnica de ajuste em tempo real de medida de chuva com radar.** 1998. 156f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1998.

_____.; ANTONIO, C. A. de A. Quantificação e Distribuição da Chuva de Janeiro de 2005 em Área Piloto Usando Radar Meteorológico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: EMBRAPA, 2005.

_____.; ANTONIO, C. A. de A. O lago de Porto Primavera alterando o regime de chuvas no Pontal do Paranapanema, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. **Anais...** (em impressão), 2007.

_____.; BRANGELI, E. B.; ANTONIO, C. A. de A. Campo de Chuva Acumulada: Quantificação por Radar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1995, Recife. **Anais...** São Paulo: ABRH, 1995.

BARBOSA, M. C. D.; ROTUNNO FILHO, O. C.; PEREIRA FILHO, A. J.; MAGALHÃES, P. C. Geoestatística aplicada a dados de radar meteorológico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10./Congresso da FLISMET, 7., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: SBMET, 1998.

_____.; _____.; _____.; NOBRE, M. M. M. Análise geoestatística aplicada à integração entre dados de radar meteorológico e postos pluviométricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11./Congresso da FLISMET, 8., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000.

CALHEIROS, R. V. **Resolução espacial de estimativas de precipitação com radar hidrometeorológico**. 1982. 229f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982.

_____.; ZAWADZKI, I. Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in Brazil. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Boston, v. 26, p. 118-132, 1987.

CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D. Comparações de Interpoladores Espaciais Univariados para Precipitação Pluvial Anual no Estado de São Paulo. **Comunicado Técnico**, Campinas, n. 33, 2002. Disponível em:
<<http://www.cnptia.embrapa.br/modules/tinycontent3/content/2002/comuntec33.pdf>>. Acesso em: dezembro 2006.

CLARK, I. **Practical geostatistics**. London: Applied Science, 1979. 129 p.

ENGLUND, E.; SPARKS, A. Geo-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software) Users's Guide. Las Vegas. Environmental Monitoring Systems Laboratory, 1988.

FIGUEIREDO, J. C. **Pluviometria para a região central do Estado de São Paulo utilizando ecos de radar meteorológico**. 2005. 143f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

FISCH, G.; HANAOKA, P. C. M; VENDRAME, I. F. Variabilidade espacial-temporal da chuva durante o experimento LBA/TRMM 1999 na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: EMBRAPA, 2005.

GOOVAERTS, P. Geoestatistical approaches for incorporating elevation into the spatil interpolation of rainfall. **Journal of Hydrology**. Elsevier Science, 1999. 17p.

HOLAWÉ, F.; DUTTER, R. Geoestatistical study of precipitation series in Austria: time and space. **Journal of Hydrology**. Elsevier Science, 1999. 13p.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford Univ.: 1989. 600 p.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: UNESP, 1998. 226 p.

_____; STURARO, J.R. Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. Rio Claro, 2002. Disponível em
<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: outubro 2006.

LIMEIRA, R. C.; MENEZES, H. E. A.; SOUSA, F. de A. S. Comparação de Dados do Pluviômetro de Ville de Paris com os do Pluviômetro Cunha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004.

LOU, A. P. F. **Modelagem geoestatística aplicada a integração entre dados de postos pluviométricos e radar meteorológico**. 2004. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MARSHALL, J. S.; PALMER, W. McK. The Distribution of Raindrops with Size. **Journal of Meteorology**, Boston, v. 5, p. 165-171, 1948.

MARTINEZ, F. J.; MAGNI, N. L. G. **Equações de Chuvas Intensas do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1999. Disponível em:
<<http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/basecon/ecisp/PlugDAEE.pdf>>. Acesso em: junho 2006.

MATHERON, G. **Les variables regionalisées et leur estimation**. Paris: Masson, 1965, 306 p.

MELLO C. R.; LIMA J. M.; SILVA A. M.; MELLO J. M.; OLIVEIRA M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 925-933, 2003.

MINISCLOUX, F.; CREUTIN, J. D.; ANQUETIN, S. Geoestatistical Analysis of Orographic Rainbands. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 40, p. 1835-1854, 2001.

PFAFSTETTER, O. **Chuvas intensas no Brasil: relação entre precipitação, duração e frequência de chuvas, registradas com pluviógrafos, em 98 postos meteorológicos**. 2. ed. Rio de Janeiro: DNOS, 1982. 426 p.

REICHARDT, K. **A Água em Sistemas Agrícolas**. 1. ed. São Paulo: Manole, 1987. 195 p.

RINEHART, R. E. **Radar for Meteorologists**. 4. ed. Columbia: Rinehart Publishing, 2004. 334 p.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria dos Serviços e Obras Públicas. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Atlas pluviométrico do Estado de São Paulo (Período 1941-1970). São Paulo, 1972. 84 p.

SOKOL, Z. The Use of Radar and Gauge Measurements to Estimate Areal Precipitation for Several Czech River Basins. **Stud. Geophys. Geod.**, Prague, v. 47, p. 587-604, 2003.

STEINER, M.; SMITH, J. A. A Microphysical Interpretation of Radar Reflectivity-Rain Rate Relationships. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 61, p. 1114-1131, 2003.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. 2. ed. Brasília: Pax, 2001. 532 p.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Bras. de Ciênc. do Solo, 2000. p. 1-54.

APÊNDICE 1

CARACTERÍSTICAS DO RADAR METEOROLÓGICO EM BAURU/SP

Localização: S22°21'27" W49°01'37"

Altitude: 642 metros – n.m.m.

Alcance Quantitativo: 240 km de raio (CAPPI – Constant Altitude Plan Position Indicator)

Alcance Qualitativo: 450 km de raio (PPI – Plan Position Indicator)

Fabricante: Enterprise Eletronics Corporation

Modelo: EEC DWR-88S

Sistema Operativo: IRIS (Interactive Radar Information System) da Sigmet

Sistema Operacional:

- até 2005, VMS-VAX da Digital
- atual, REDHAT Interprise Linux

Processador de Sinal:

- até 2005, RVP 6
- atual, RVP 8

Frequência: 2.700 a 2.900 MHz

Potência de Pico: 550 kW

Banda: S DOPPLER

Comprimento de Onda: 10,7 cm

Largura de Pulso:

- PPI: 2,0 microseg
- CAPPI: 0,8 microseg

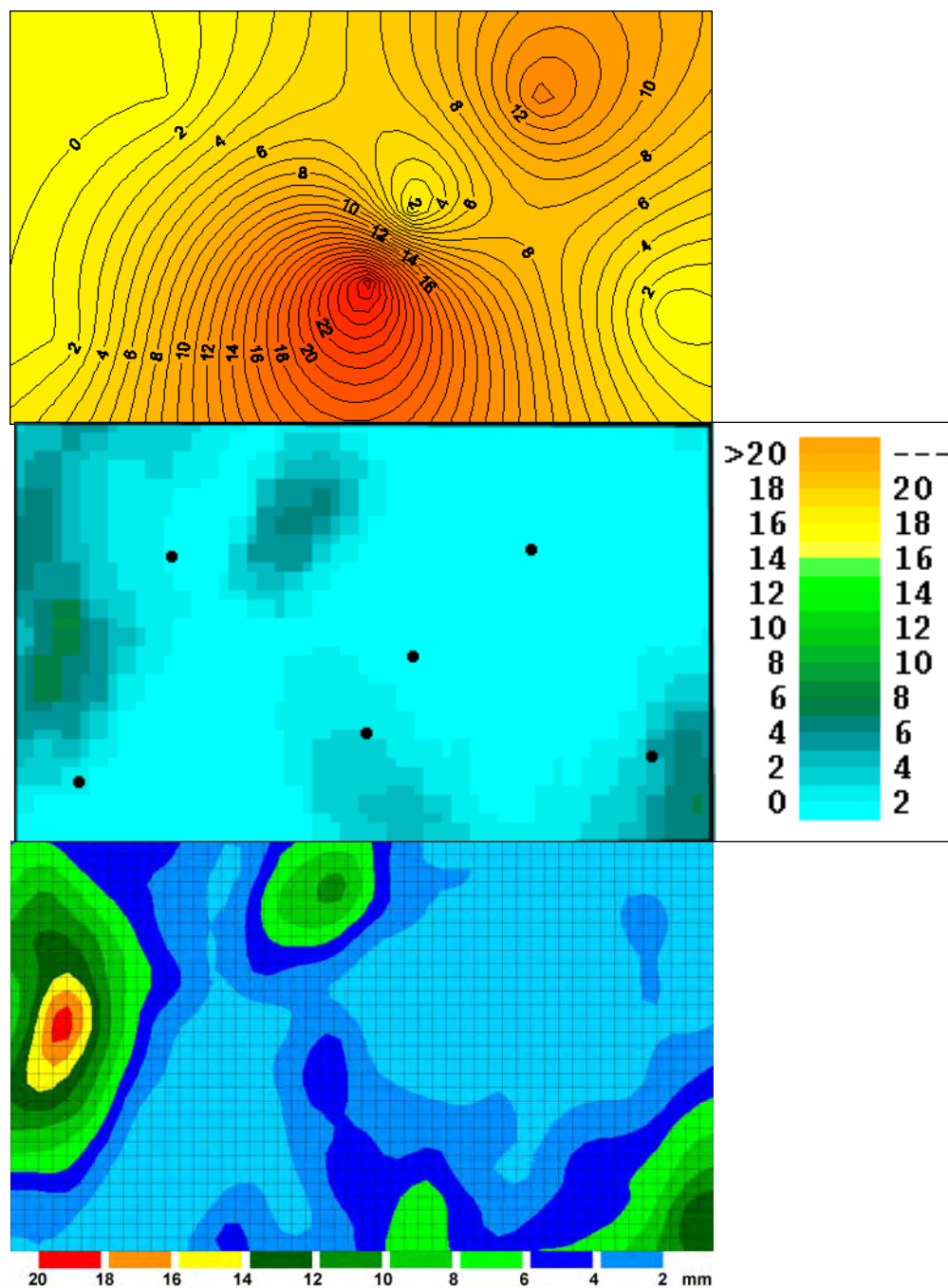
Antena:

- Tipo: Parabolóide
- Diâmetro: 3,66 m
- Ganho: 38 dB
- Feixe: 2,05° cônico
- Altura da Torre: 11 m

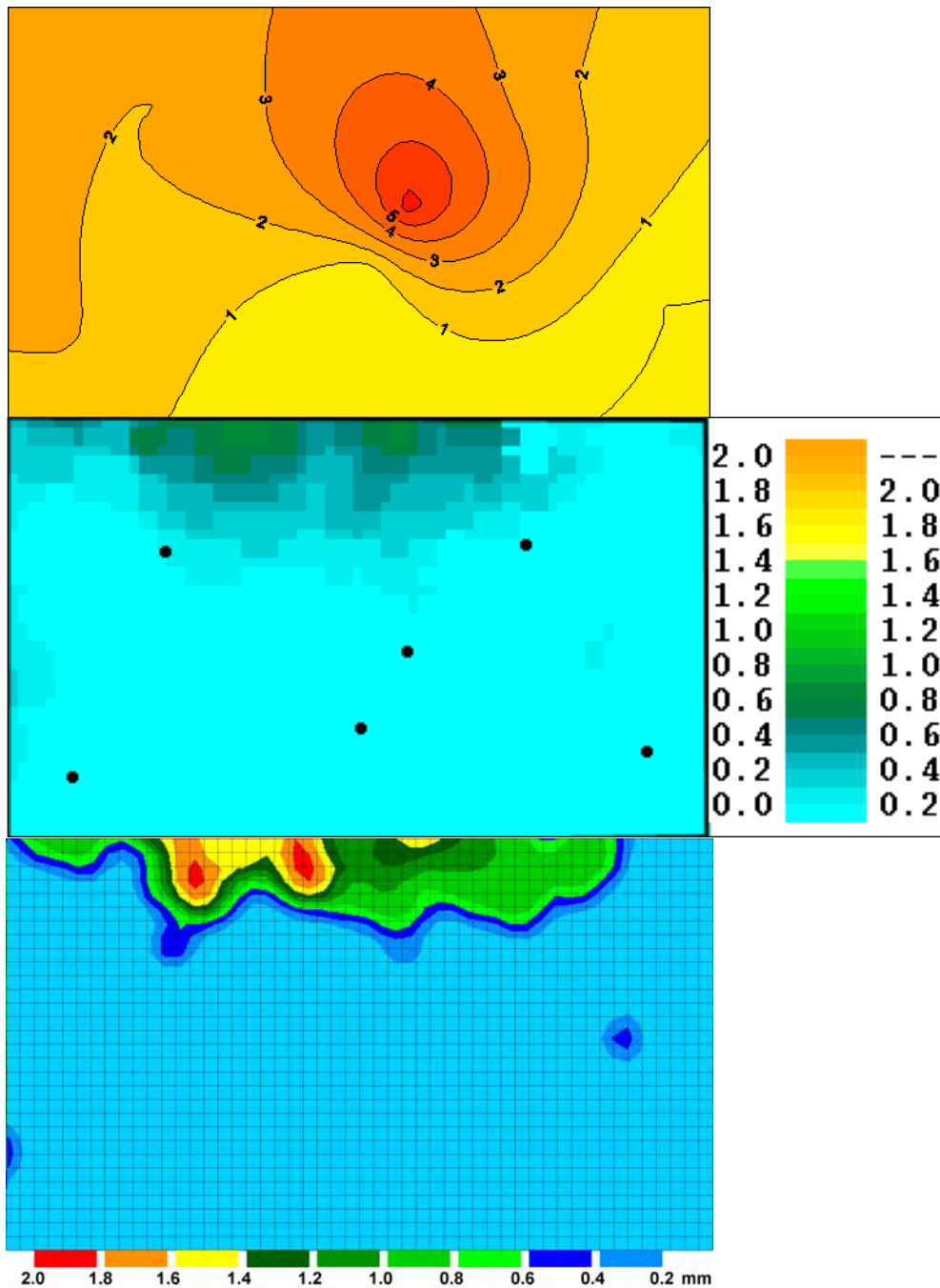
Relação ZR Operacional: $Z = 200.R^{1,6}$

APÊNDICE 2

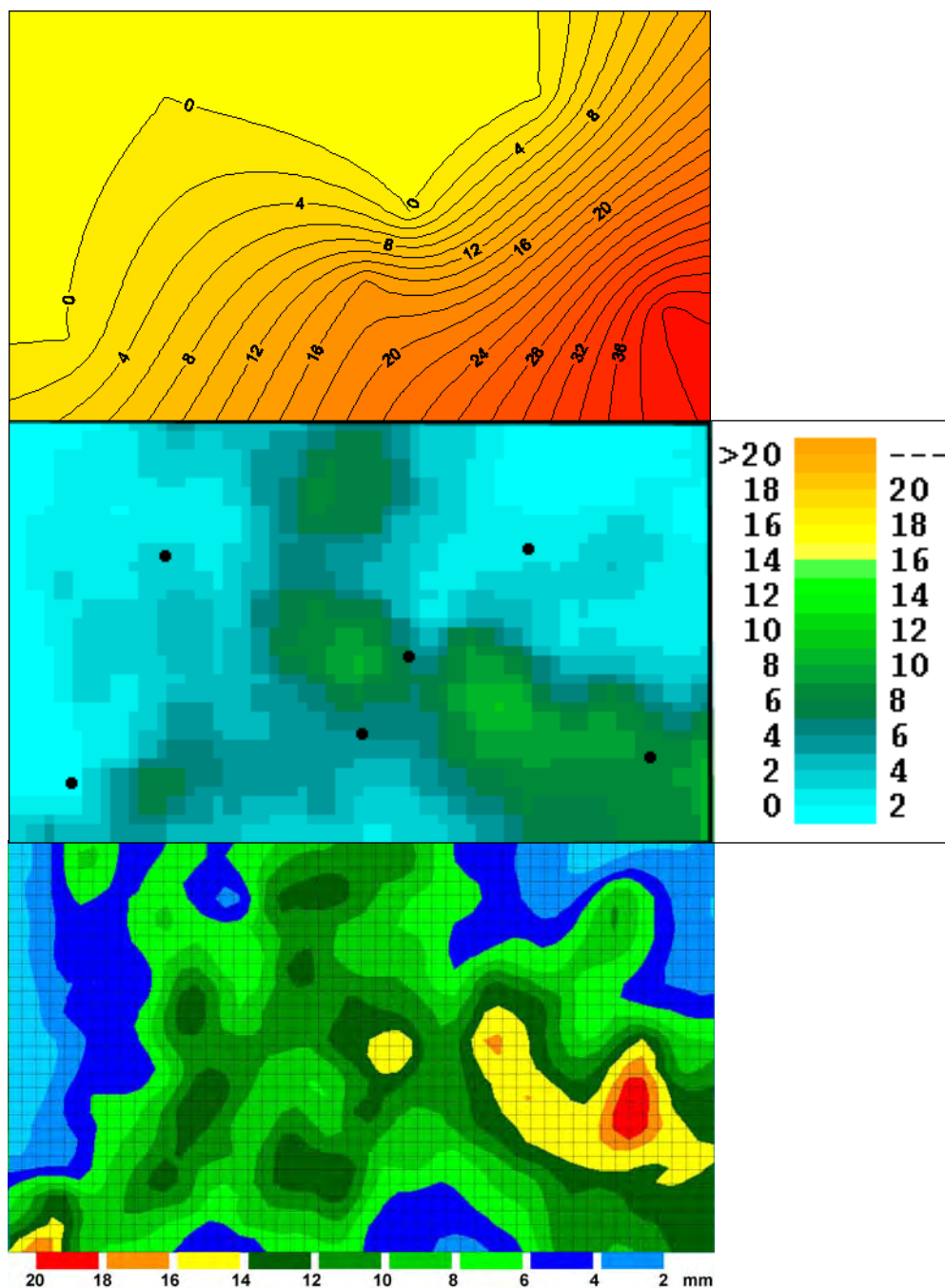
CAMPOS DE PRECIPITAÇÃO DIÁRIA - JANEIRO/2000



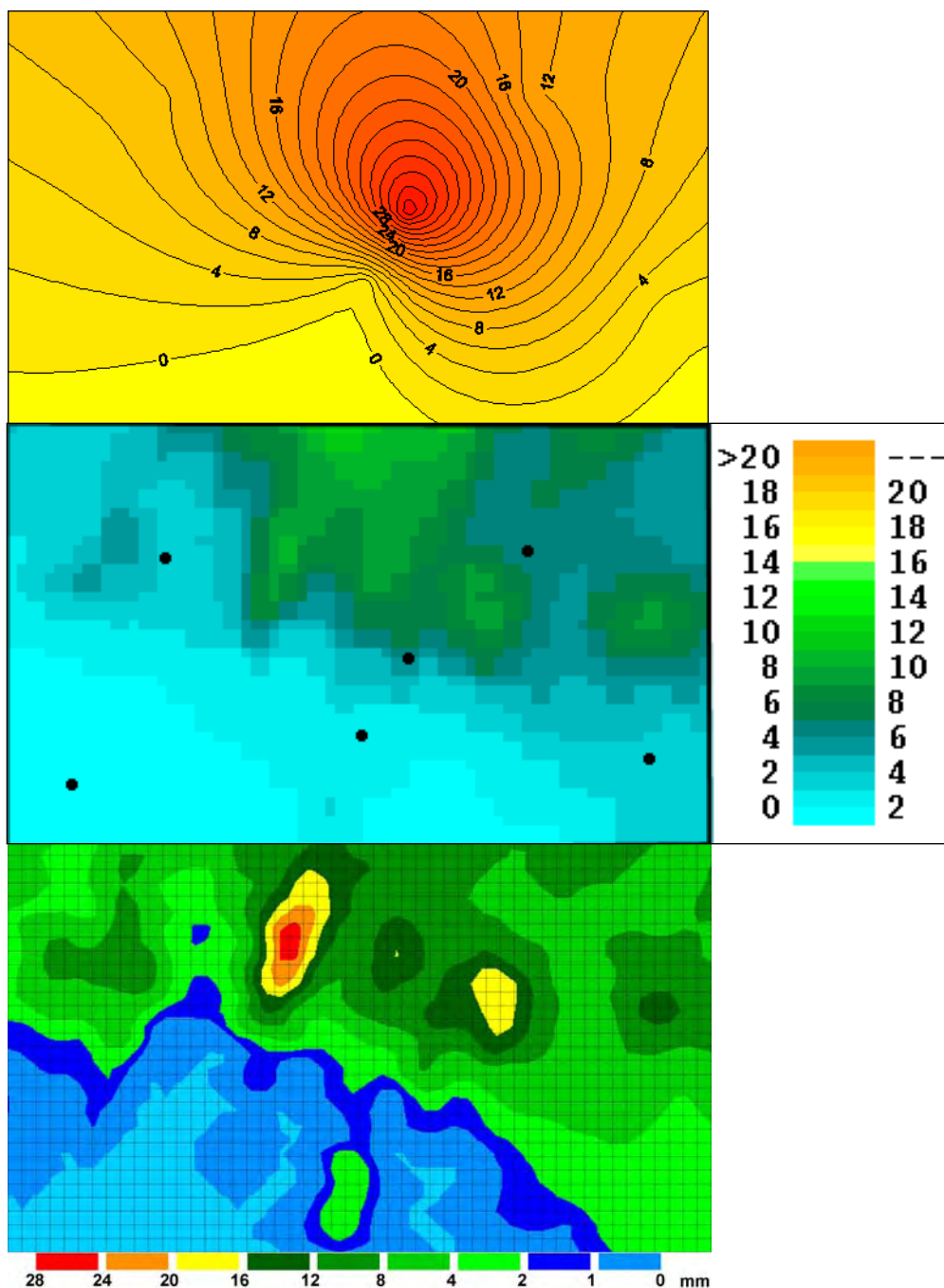
Campos de precipitação diária de 1 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km^2 .



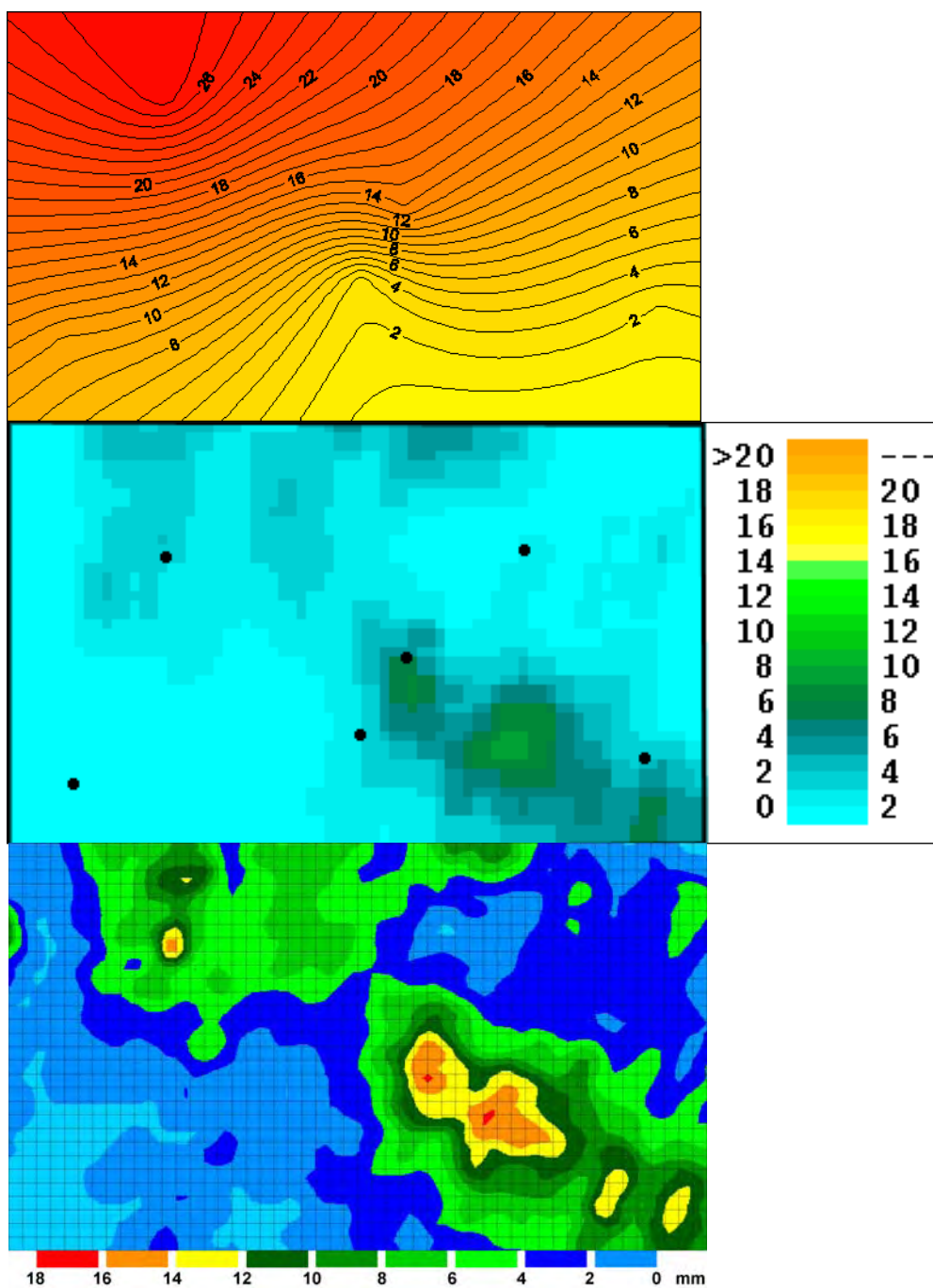
Campos de precipitação diária de 2 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km^2 .



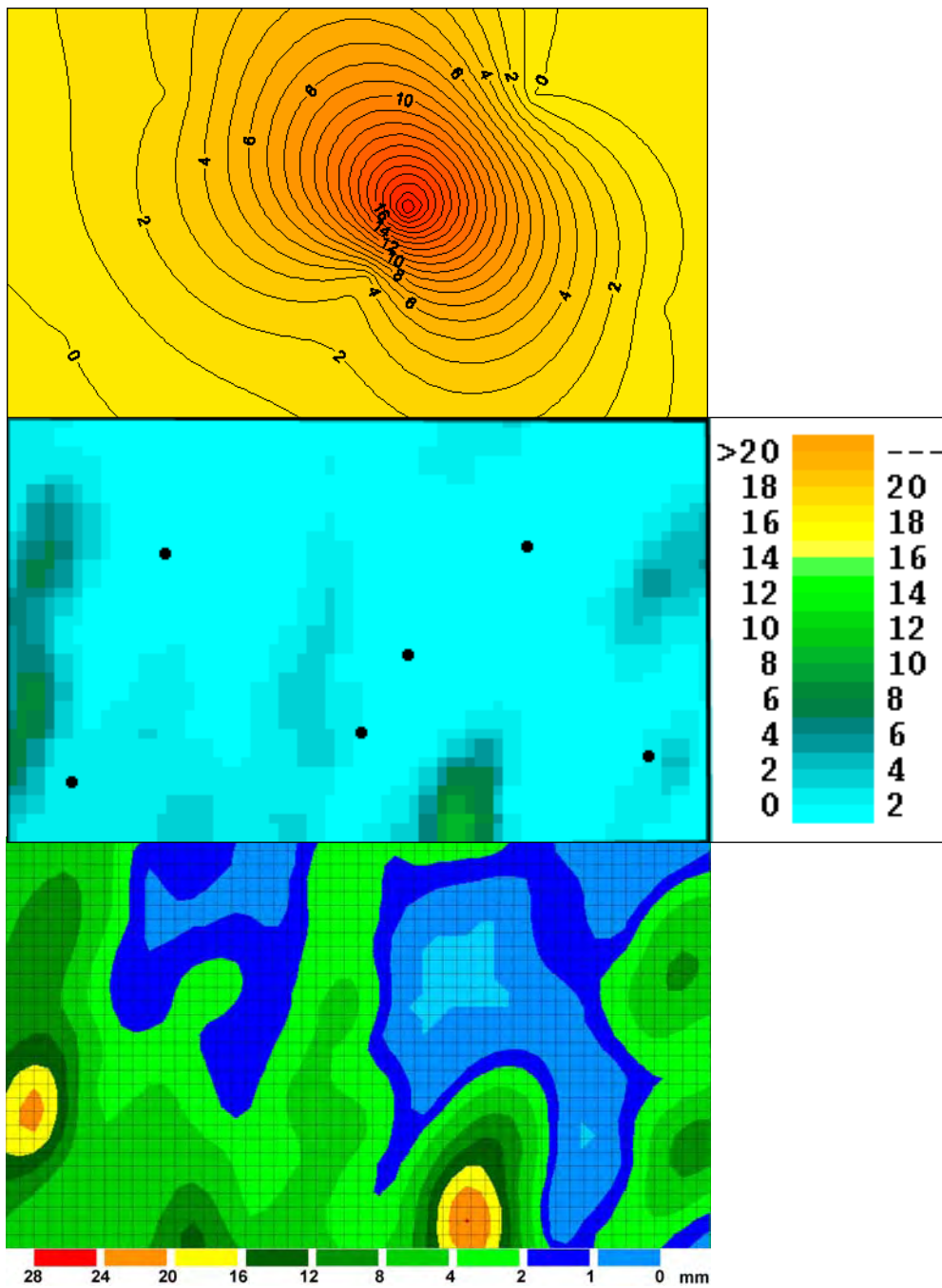
Campos de precipitação diária de 4 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km^2 .



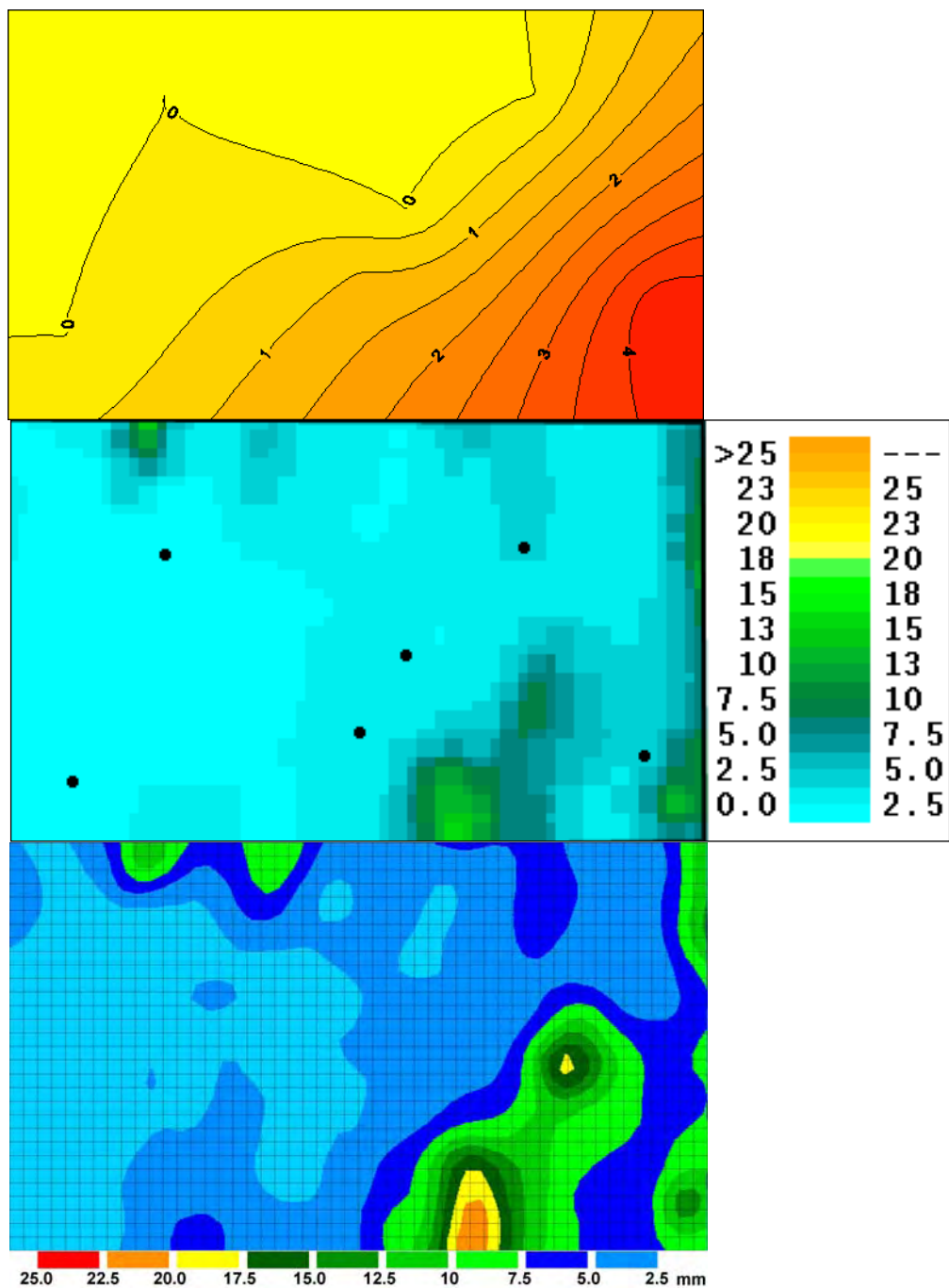
Campos de precipitação diária de 5 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km².



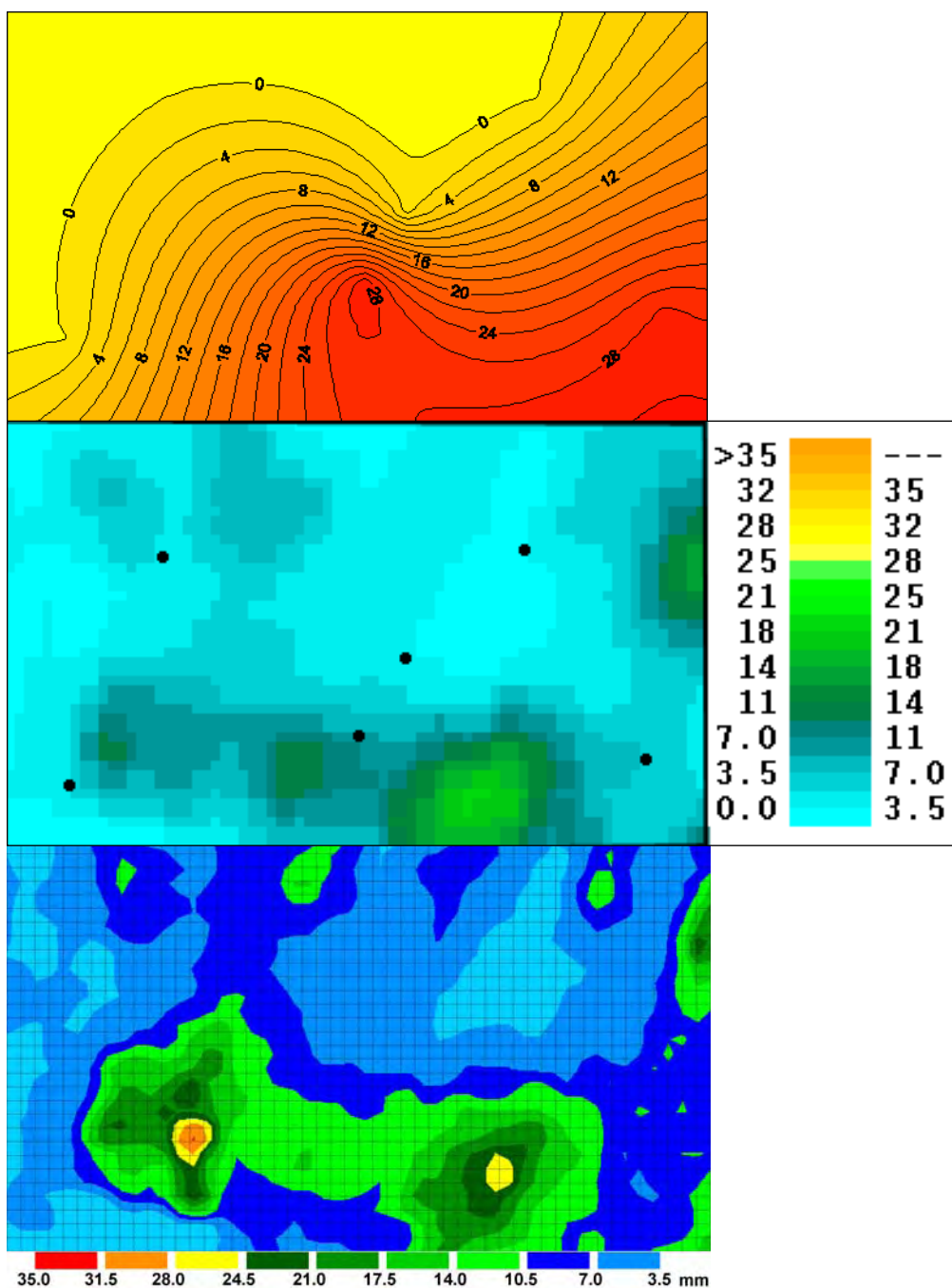
Campos de precipitação diária de 8 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km^2 .



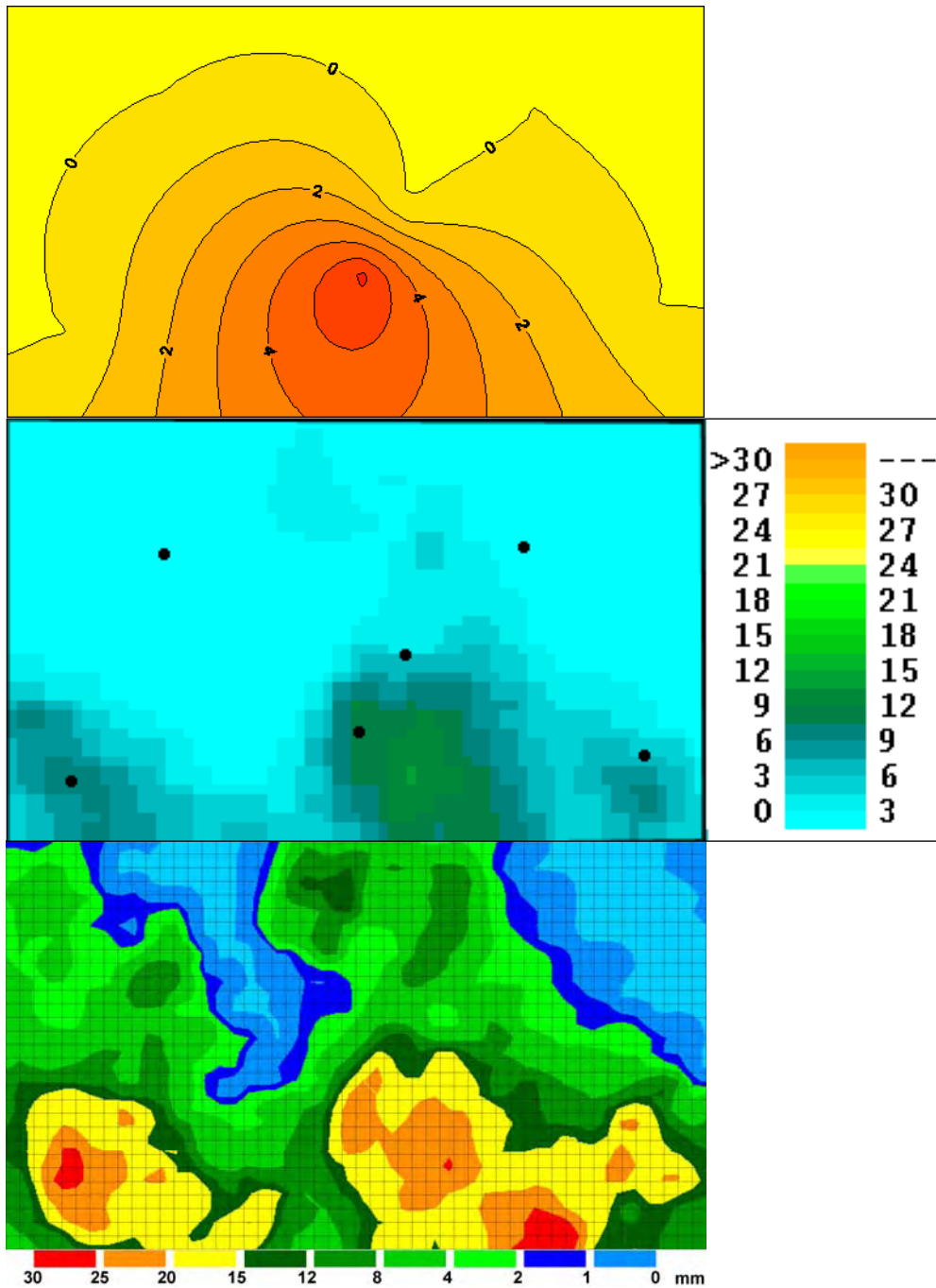
Campos de precipitação diária de 9 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km².



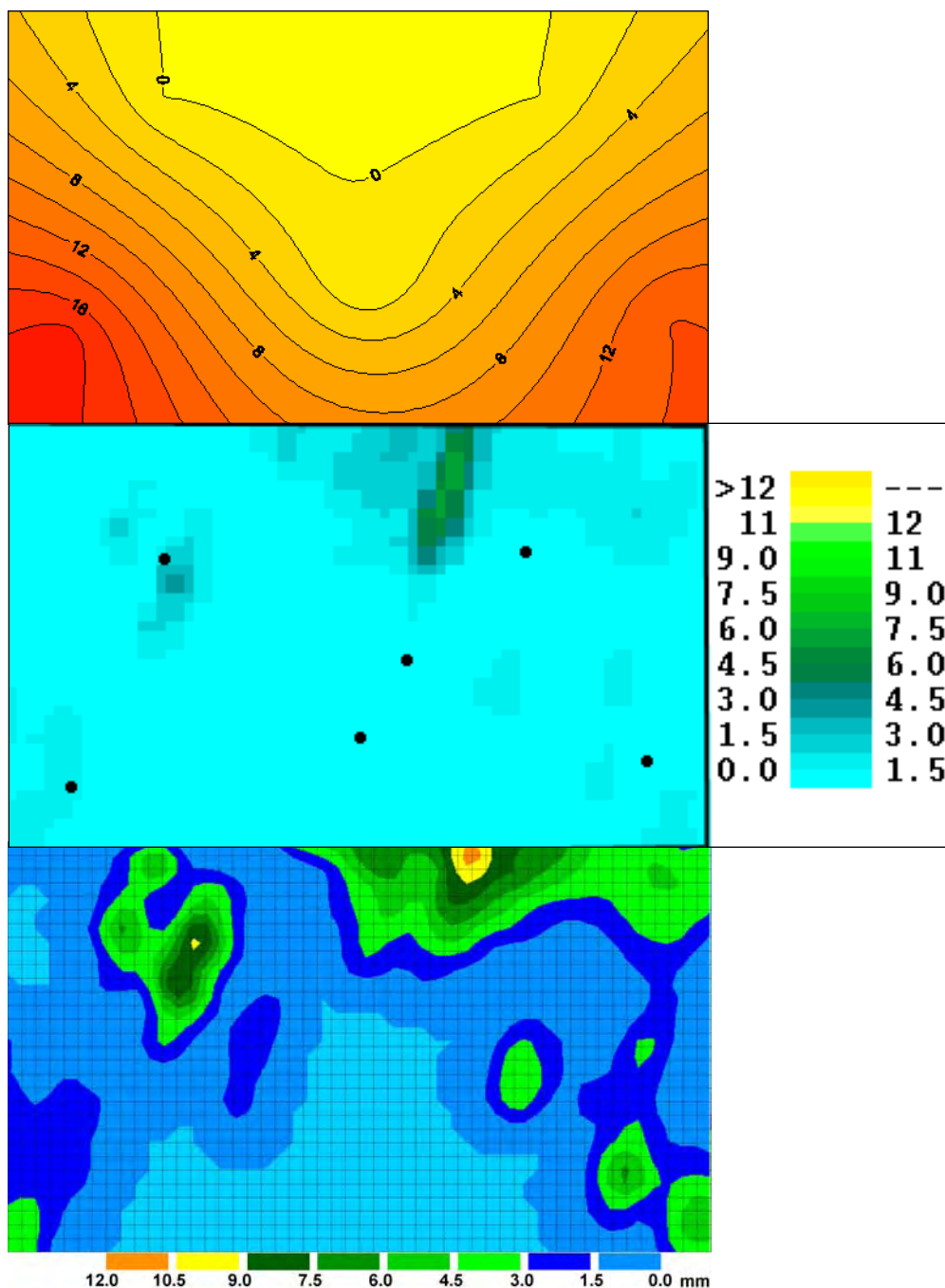
Campos de precipitação diária de 11 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km².



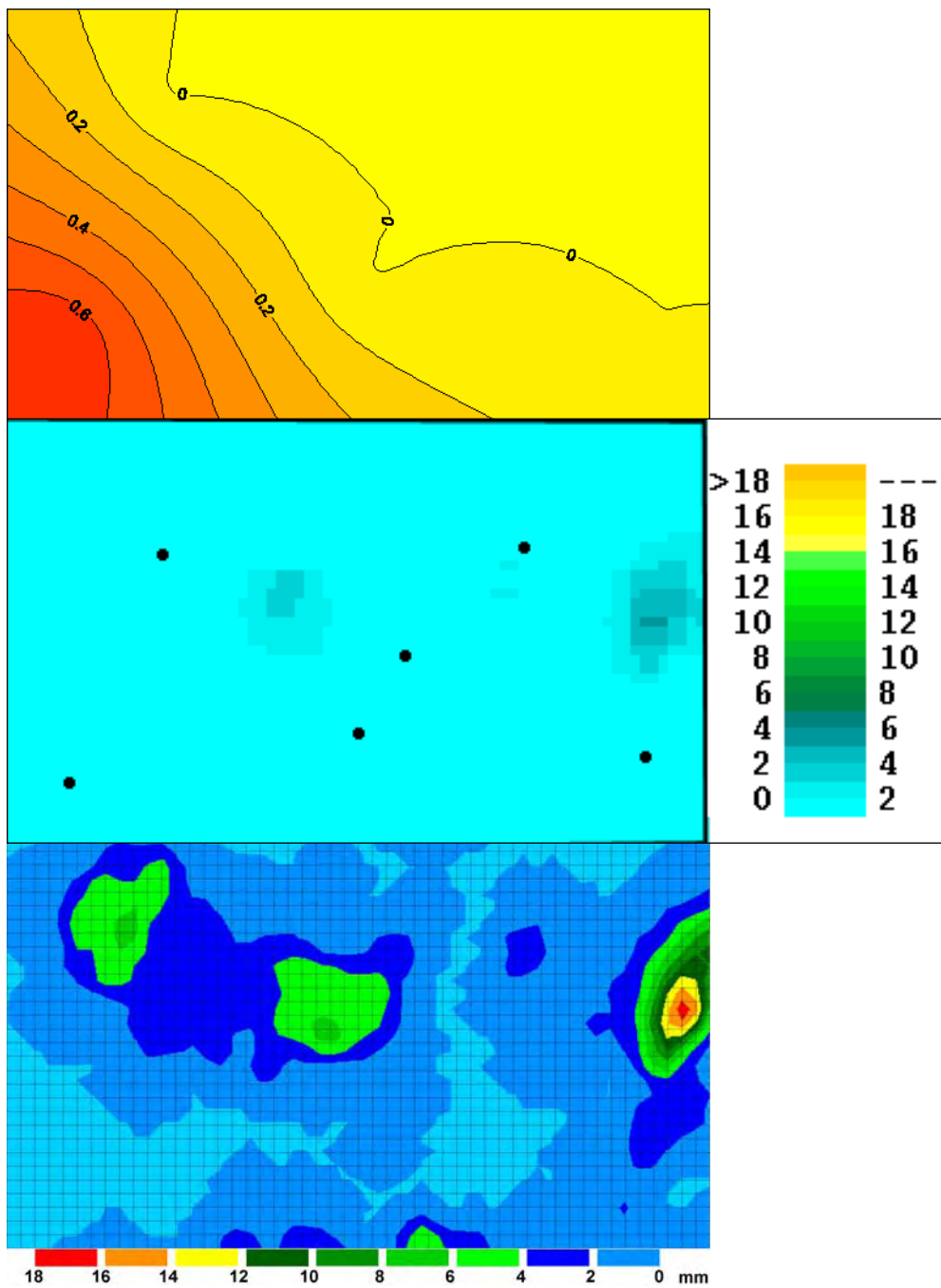
Campos de precipitação diária de 12 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km^2 .



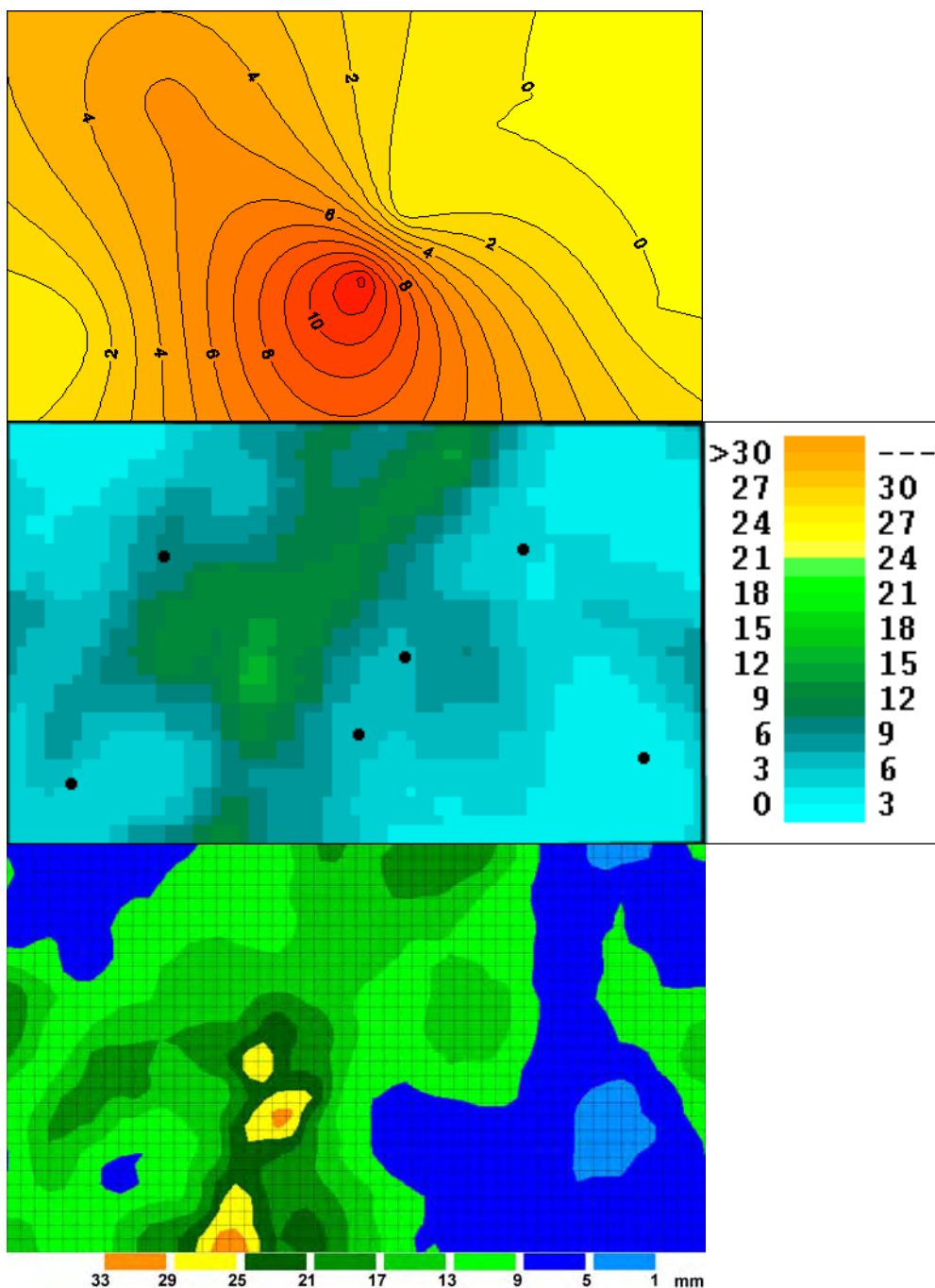
Campos de precipitação diária de 14 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km^2 .



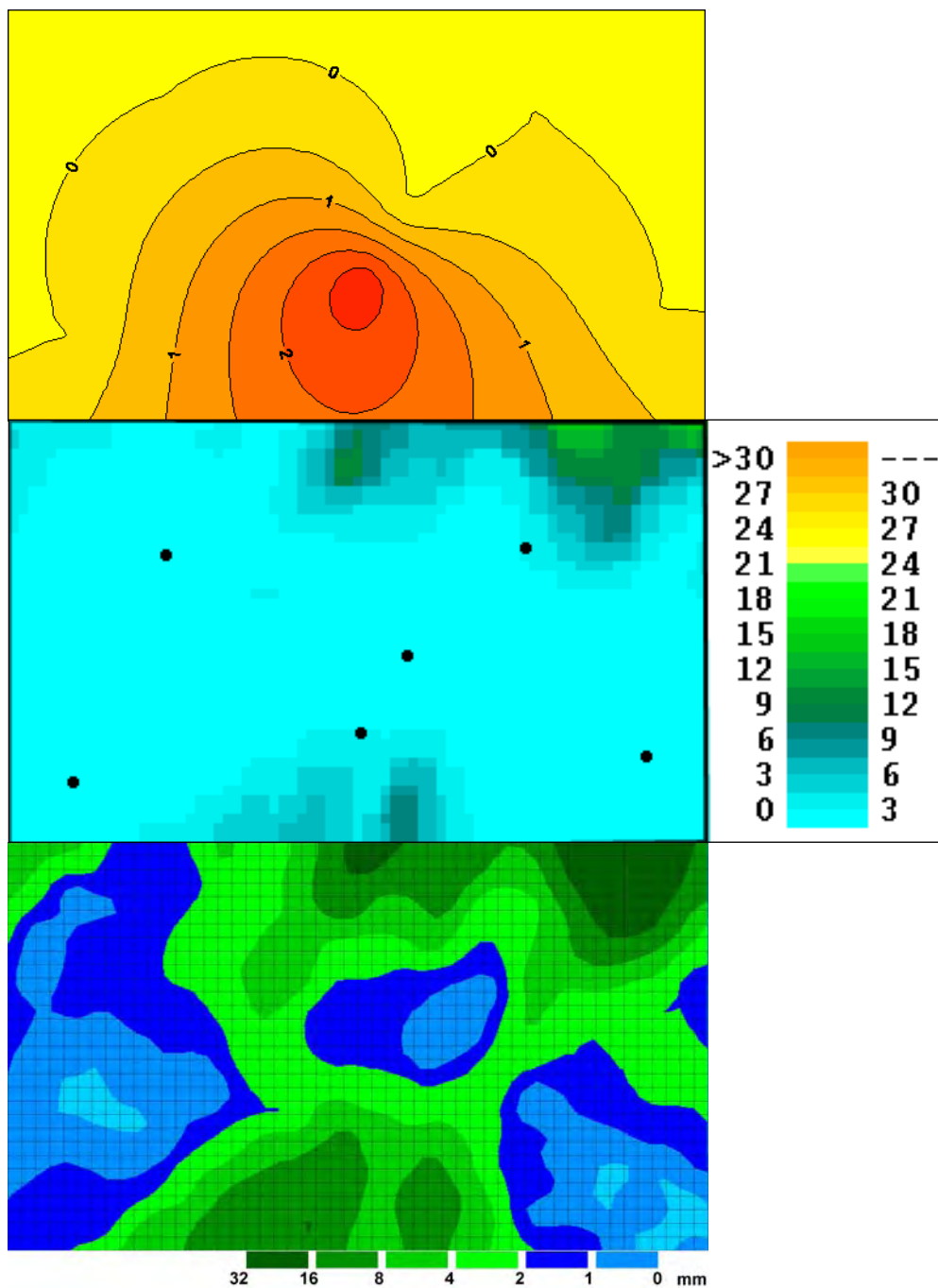
Campos de precipitação diária de 15 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1.6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2.07}$, acrescido de grade de 1 km^2 .



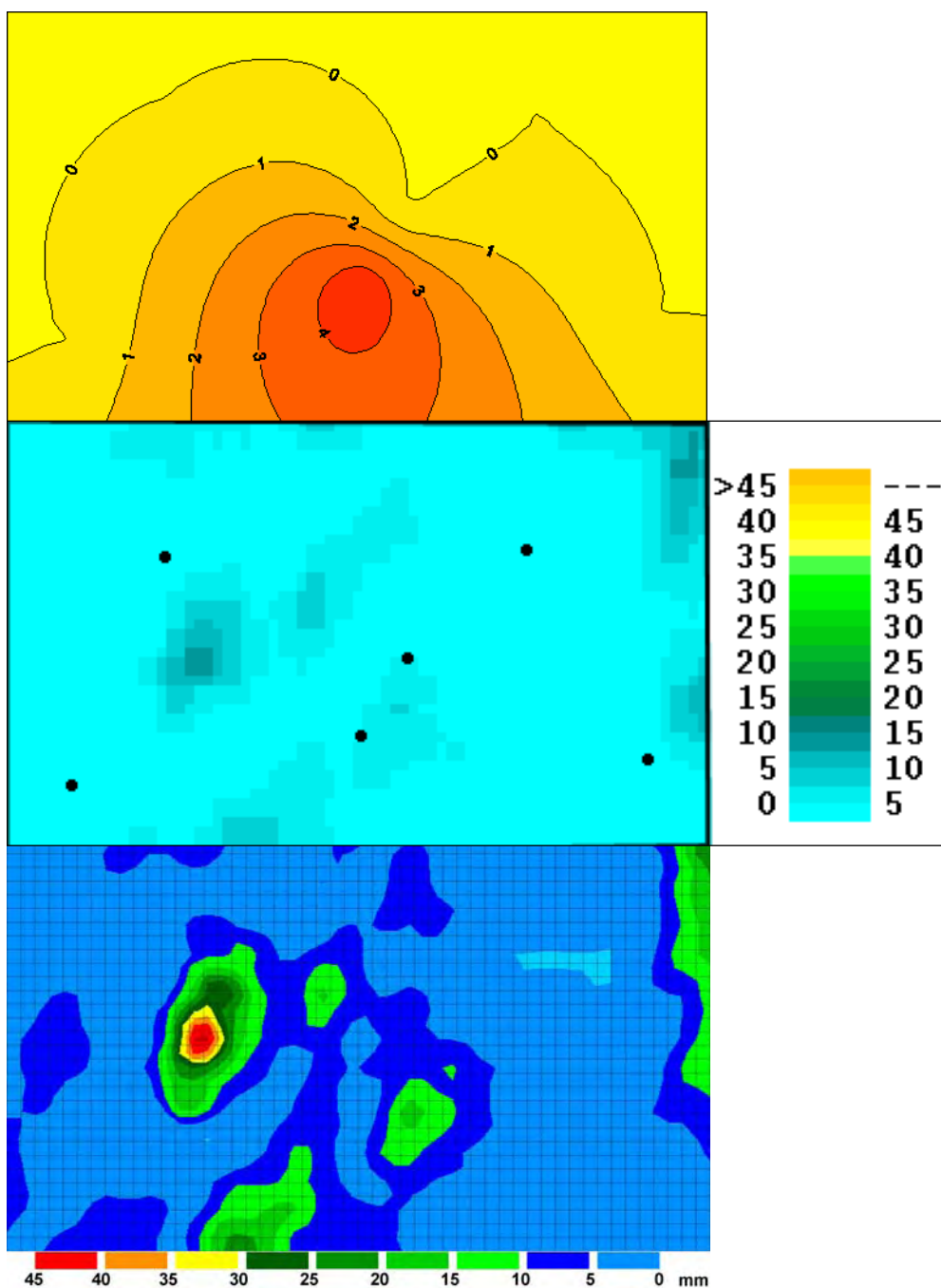
Campos de precipitação diária de 16 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km².



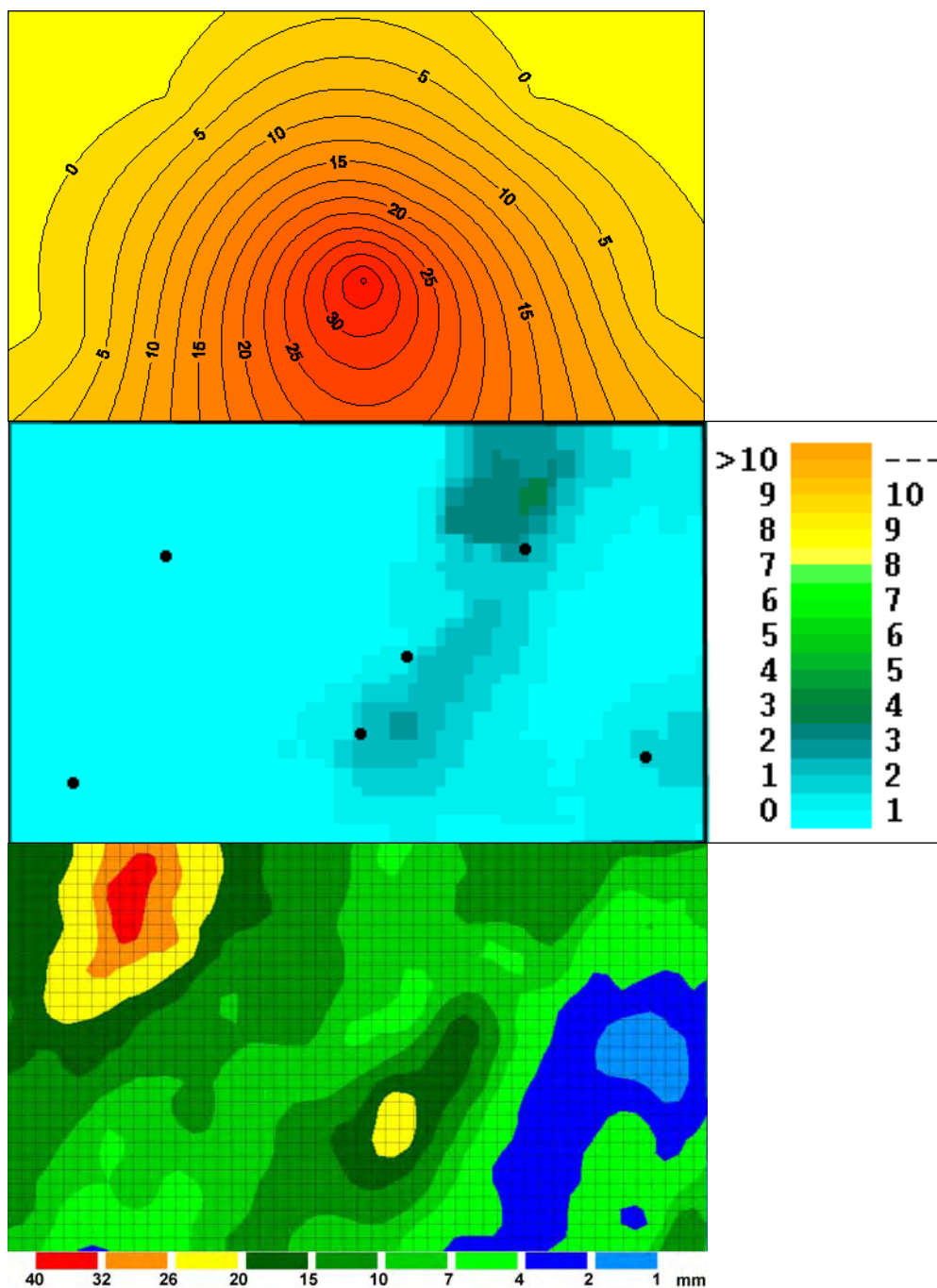
Campos de precipitação diária de 17 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km^2 .



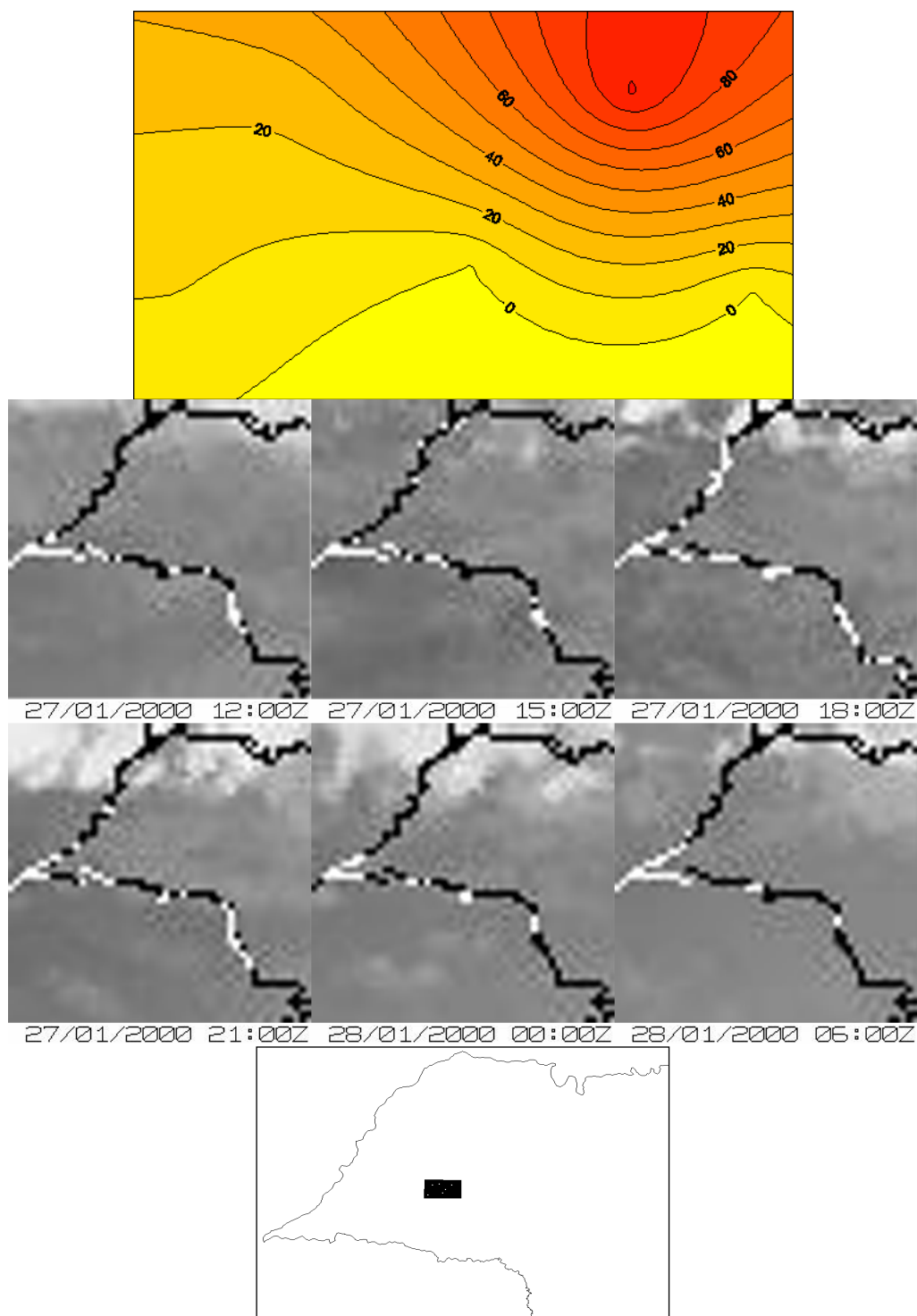
Campos de precipitação diária de 19 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km².



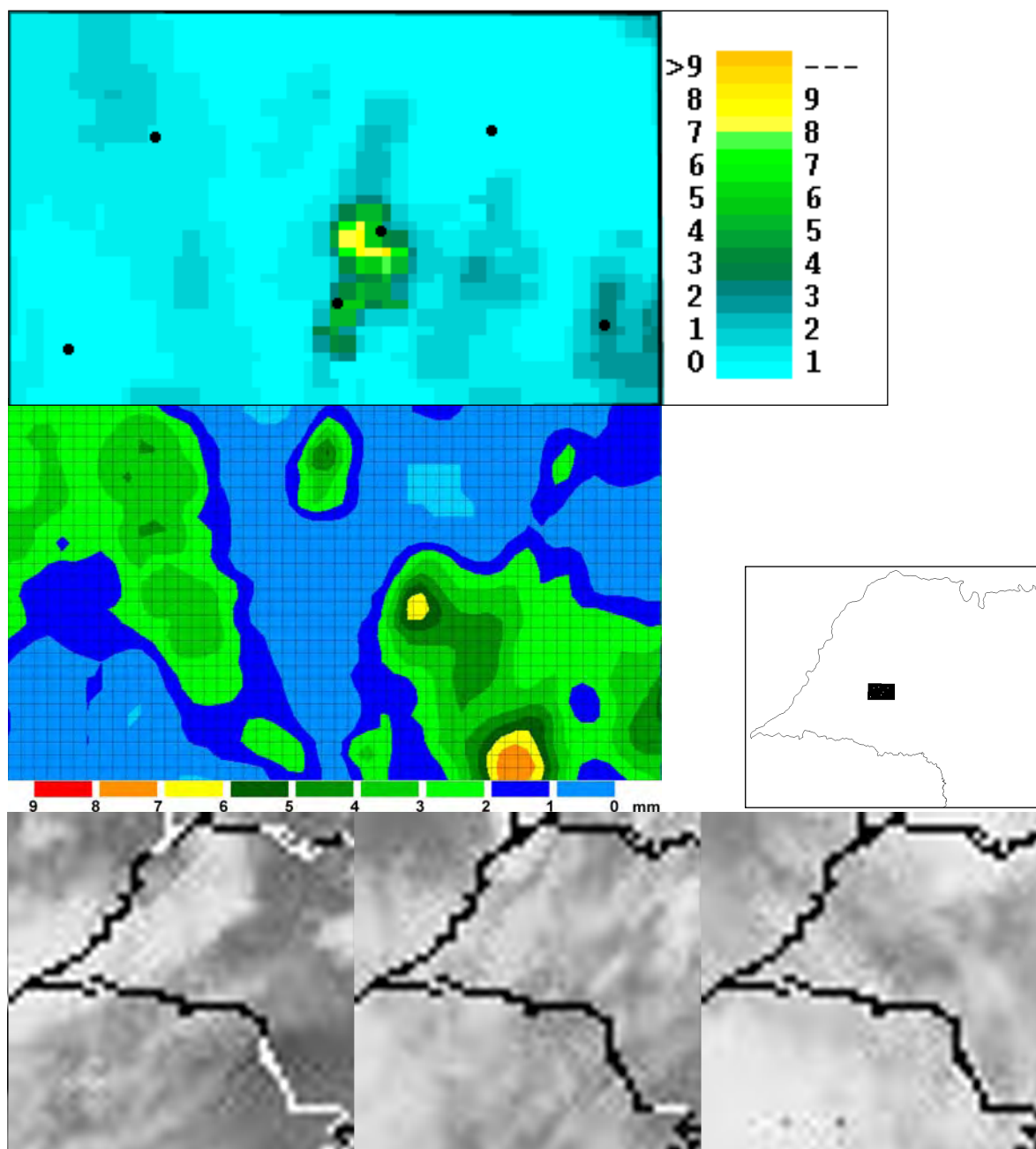
Campos de precipitação diária de 25 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km².



Campos de precipitação diária de 26 de janeiro de 2000 na área de experimental. Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos. Ao centro, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo inferior é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km^2 .

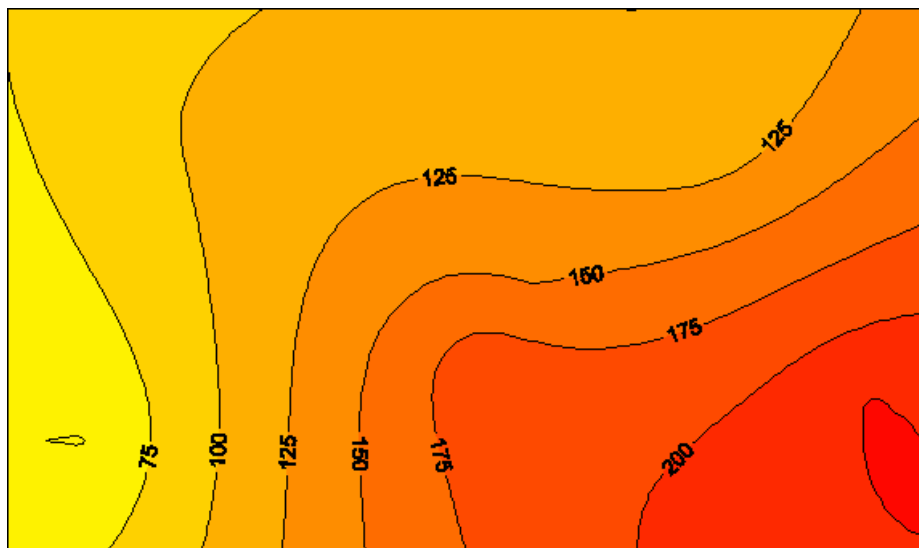


Na parte superior, isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos de 27 de janeiro de 2000. Ao centro, detalhes ampliados de imagens infravermelhas do satélite GOES. O quadro inferior mostra a posição da área experimental. Os radares de Bauru e Presidente Prudente não detectaram chuvas na área nesse dia.

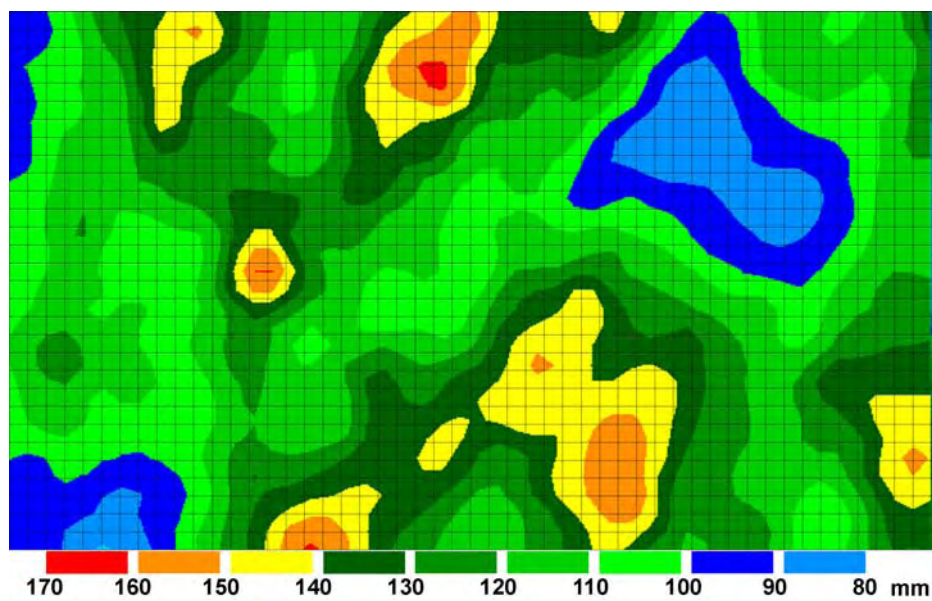


30/01/2000 15:00Z 30/01/2000 18:00Z 31/01/2000 06:00Z
Campos de precipitação diária, por radar, de 30 de janeiro de 2000 na área de experimental.

Na parte superior, detalhe ampliado da acumulação gerada pelo sistema IRIS ($Z=200.R^{1,6}$), com inserção da localização dos pluviômetros. O campo ao centro, à esquerda, é resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km^2 . Ao centro, à direita, posição da área experimental. No quadro inferior detalhes ampliados de imagens infravermelhas do satélite GOES. Os pluviômetros da área não detectaram chuvas nesse dia.



Total da precipitação mensal de janeiro de 2000 na área experimental. Isoietas resultantes de krigagem (modelo linear) em dados pluviométricos.



Total da precipitação mensal de janeiro de 2000 observada pelo radar na área experimental, resultante de krigagem (modelo esférico) e relação $Z=47.R^{2,07}$, acrescido de grade de 1 km².