



Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas - UACA
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Curso de Mestrado

OSEAS MACHADO GOMES

**ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DA PRECIPITAÇÃO
PLUVIAL NO ESTADO DA PARAÍBA**

Campina Grande
fevereiro de 2012

OSEAS MACHADO GOMES

**ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DA PRECIPITAÇÃO
PLUVIAL NO ESTADO DA PARAÍBA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Orientadores:

FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA

CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS

Campina Grande
fevereiro de 2012

OSEAS MACHADO GOMES

**ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DA PRECIPITAÇÃO
PLUVIAL NO ESTADO DA PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Sub-área: Climatologia Estatística

Orientadores: Francisco de Assis Salviano de Sousa

Carlos Antonio Costa dos Santos

Campina Grande
fevereiro de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G633a Gomes, Oseas Machado.
Análise geoestatística da precipitação pluvial no estado da Paraíba / Oseas Machado Gomes. – Campina Grande, 2012.
56 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientadores: Prof. Dr. Francisco de Assis Salviano e Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos.

Referências.

1. Precipitação Pluvial. 2. Geoestatística. 3. Análise de Superfície e Tendência. I. Título.

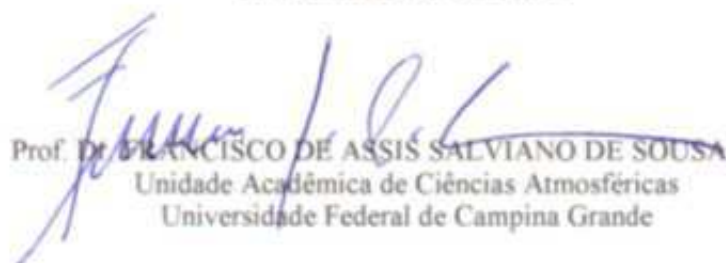
CDU 556.12 (813.3)(043)

OSEAS MACHADO GOMES

ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL NO ESTADO DA
PARAIBA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 24/02/2012

BANCA EXAMINADORA



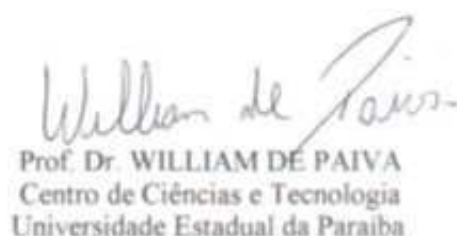
Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. WILLIAM DE PAIVA
Centro de Ciências e Tecnologia
Universidade Estadual da Paraíba

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida.

Aos meus amados pais, Domício Gomes da Silva e Cláudia Machado Gomes.

A minha esposa e filho, Celiane Batista de Souza Machado e Yohan de Souza Machado.

Aos meus orientadores : Francisco de Assis Salviano de Sousa e Carlos Antonio Costa Dos Santos, ao professor William de Paiva por me ajudar nesse trabalho e também ao professor Enilson Palmeira Cavalcanti pelo incentivo.

Quero também agradecer os autores agradecem a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar a variabilidade espacial da precipitação pluvial média mensal do estado da Paraíba utilizando técnicas geoestatísticas. Os dados foram cedidos pela Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), coletados em estações meteorológicas e postos pluviométricos localizados em 102 municípios, no período de 1962 a 2001. O semivariograma determinou a dependência espacial da variável em estudo, em seguida foi feita uma análise descritiva dos dados a fim de resumir a série e descrevê-la em termos numéricos. De acordo com os resultados todos os variogramas apresentaram forte dependência espacial ($IDE \geq 75\%$), com exceção dos meses de junho a setembro que apresentaram tendências nas séries e dificuldade no ajuste dos modelos de comportamento espacial. De acordo com a análise descritiva dos dados os coeficientes de variação apresentaram alta dispersão ($Cv > 20\%$), indicando grande variabilidade da chuva. Foram confeccionados mapas por krigagem ordinária para os meses de janeiro, fevereiro, outubro e novembro. O critério se baseou nos valores dos coeficientes de determinação ($R^2 > 93\%$) para se obter os mapas ajustados pelo modelo e o dos resíduos. O teste de Mann-Kendall foi utilizado para analisar a presença de tendências nos dados e regionalizar a distribuição espacial da precipitação pluvial no estado com boa precisão. A análise de superfície de tendência estimou os valores de precipitação e os resíduos. A superfície que melhor se ajustou aos dados foi a de 4ª ordem com coeficientes de determinação ($R^2 > 80\%$). A análise de variância justificou o ajuste da regressão polinomial aos dados observados com níveis de significâncias de 1% e 5%. Os mapas dos vetores identificaram as regiões que apresentaram as maiores tendências de precipitação pluvial. Os gráficos dos resíduos foram importantes para auxiliar na identificação de locais que não foram bem explicados pelo modelo de superfície de 4ª ordem. Em resumo, a geoestatística se revelou como uma importante ferramenta para analisar e estimar dados de precipitação pluvial mensal.

Palavras - chave: Geoestatística, precipitação pluvial e análise de superfície de tendência.

Abstract

The objective of this work is to study the spatial variability of mean monthly rainfall of the Paraíba state using geostatistical techniques. The data were provided by the Academic Unit of Atmospheric Sciences (UACA) of the Federal University of Campina Grande (UFPG), collected from weather stations and rain gauge located in 102 municipalities in the period 1962 to 2001. The semivariogram determined the spatial dependence of the variable under study, and then was carried out a descriptive analysis to summarize the time series and describe it in numeric terms. According to the results, all variograms showed a strong spatial dependence ($IDE \geq 75\%$), except for the months June to September that showed trends in the time series and difficulty in adjusting the models of spatial behavior. According to the descriptive analysis of the data the variation coefficients showed high dispersion ($CV > 20\%$), indicating high variability of rainfall. Maps were made by ordinary kriging for the months of January, February, October and November. The criterion was based on the values of the coefficients of determination ($R^2 > 93\%$) to obtain maps unadjusted, adjusted by the model and the differences between the unadjusted and adjusted. The Mann-Kendall test was used to analyze the presence of trends in time series and regionalize the spatial distribution of rainfall in the state with good accuracy. The trend surface analysis estimated the values of precipitation and the residues. The surface of the best fit to the data was the 4th order with coefficients of determination ($R^2 > 80\%$). The analysis of variance justified the adjustment and polynomial regression surface of fourth order had been accepted with significance levels of 1% and 5%. The maps of the vectors identified the regions with the highest rainfall trends. The graphics of the residuals were important to assist in identifying sites that are not well explained by the surface model of 4th order. In summary, the geostatistical has proven an important tool for analyzing and estimating monthly rainfall data.

Key-words - Geostatistics, rainfall and surface analysis of trends.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1	INTRODUÇÃO	p. 13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	p. 15
2.0.1	Análise geoestatística	p. 15
2.0.2	Variáveis Regionalizadas	p. 15
2.0.3	Variograma e Semivariograma	p. 16
2.0.4	Isotropia e Anisotropia	p. 17
2.0.5	Krigagem Ordinária	p. 17
2.0.6	Análise de superfície de tendência	p. 18
2.0.7	Mann-Kendall	p. 18
3	MATERIAL E METODOLOGIA	p. 20
3.0.8	Área de Estudo	p. 20
3.0.9	Dados	p. 21
3.0.10	Métodos	p. 21
3.0.11	Análise Geoestatística dos Dados	p. 21
3.0.12	Estudo do Variograma e do Semivariograma	p. 22
3.0.13	Isotropia e Anisotropia	p. 25
3.0.14	Índice de Dependência Espacial	p. 26

3.0.15	Krigagem Ordinária	p. 26
3.0.16	Coeficiente de Variação	p. 27
3.0.17	Coeficiente de Curtose	p. 27
3.0.18	Coeficiente de Assimetria	p. 27
3.0.19	Análise de superfície de tendência	p. 28
3.0.20	Mann-Kendall	p. 29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	p. 31
4.0.21	Análise descritiva dos dados	p. 31
4.0.22	Análise da tendência espacial	p. 35
4.0.23	Análise de superfície de tendência dos dados	p. 36
4.0.24	Krigagem ordinária da precipitação pluvial média mensal	p. 37
4.0.25	Vetores da precipitação pluvial média mensal dos meses de janeiro a dezembro	p. 43
4.0.26	Superfície de 4ª ordem da precipitação pluvial média mensal	p. 46
5	CONCLUSÃO E SUGESTÃO	p. 53
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	p. 54

Lista de Figuras

1	Representação gráfica da localização do Estado da Paraíba (a) Representação gráfica do mapa das unidades geomorfológica do Estado (b).	p. 20
2	Representação gráfica da distribuição espacial dos 102 postos pluviométricos do Estado da Paraíba utilizados no estudo	p. 21
3	Representação gráfica de parâmetros do semivariograma	p. 23
4	Modelo potencial de variograma teórico gerado pelo software Variowin 2.2	p. 24
5	Tipos de anisotropias presentes nos semivariogramas	p. 25
6	Semivariogramas ajustados à precipitação pluvial média mensal do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)	p. 33
7	Semivariogramas ajustados à precipitação pluvial média mensal do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)	p. 34
8	Semivariogramas ajustados à precipitação pluvial média, dos meses de junho a setembro, do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)	p. 35
9	Interpolação por krigagem ordinária dos valores, ajustados pelo modelo (A.) e dos resíduos (B.) das médias mensais da precipitação pluviométrica no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2001.	p. 39
10	Interpolação por krigagem ordinária dos valores, ajustados pelo modelo (A.) e dos resíduos (B.) das médias mensais da precipitação pluviométrica no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2001.	p. 40
11	Interpolação por krigagem ordinária dos valores, ajustados pelo modelo (A.) e dos resíduos (B.) das médias mensais da precipitação pluviométrica no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2001.	p. 41
12	Interpolação por krigagem ordinária dos valores, ajustados pelo modelo (A.) e dos resíduos (B.) das médias mensais da precipitação pluviométrica no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2001.	p. 42

13	Mapa de vetores da precipitação pluvial dos meses de dezembro a maio no estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)	p. 44
14	Mapa de vetores da precipitação pluvial dos meses de junho a novembro no estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)	p. 45
15	Mapa de superfície de 4º ordem (A) e o mapa dos resíduos (B) da precipitação média mensal do estado da Paraíba do mês de junho (período: 1962 a 2001)	p. 47
16	Mapa de superfície de 4º ordem (C) e o mapa dos resíduos (D) da precipitação média mensal do estado da Paraíba do mês de julho (período: 1962 a 2001)	p. 48
17	Mapa de superfície de 4º ordem (E) e o mapa dos resíduos (F) da precipitação média mensal do estado da Paraíba do mês de agosto (período: 1962 a 2001)	p. 49
18	Mapa de superfície de 4º ordem (G) e o mapa dos resíduos (H) da precipitação média mensal do estado da Paraíba do mês de setembro (período: 1962 a 2001)	p. 50
19	Comparação entre os valores observados e os estimados pela superfície de 4ª ordem (onde a linha cinza corresponde aos valores observados e a linha preta pontilhada os valores estimados).	p. 51
20	Resíduos das diferenças entre os valores observados e os valores estimados pela superfície de 4º grau das médias mensais da precipitação dos meses de junho a Setembro no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2001 .	p. 52

Lista de Tabelas

1	Estatísticas da precipitação pluvial média mensal do Estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)	p. 31
2	Parâmetros dos semivariogramas ajustados à precipitação pluvial média mensal do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)	p. 32
3	Análise descritiva do teste de mann-kendall	p. 36
4	Coefficientes de determinação dos polinômios não ortogonais de superfície, ajustados à precipitação pluvial média, dos meses de junho a setembro, do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)	p. 36
5	Análise de variância para verificar o ajuste de superfície de 4º grau aos dados, dos meses de junho a setembro, do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)	p. 37

1 INTRODUÇÃO

A região Nordeste do Brasil (NEB) além de possuir uma enorme extensão territorial de aproximadamente ($1.540.827km^2$) também possui um relevo bastante diversificado com altitudes que variam de 800m no Planalto da Borborema a 1.200m na Chapada Diamantina. O relevo, juntamente com os diferentes sistemas meteorológicos, torna a climatologia dessa região uma das mais complexas do mundo (NIMER, 1989). O Estado da Paraíba faz parte da região Nordeste e está situado a leste dela. Limitado ao norte pelo Rio Grande do Norte, a leste pelo Oceano Atlântico, ao Sul pelo Estado de Pernambuco e a Oeste pelo Estado do Ceará. A extensão territorial do estado da Paraíba é de aproximadamente ($56.340,9km^2$). A Paraíba também apresenta relevo bastante diversificado e constituídos por rochas sedimentares: Baixada Litorânea (ou Planície Litorânea), constituídas por praias, restingas, estuários e o Baixo Planalto Costeiro (Tabuleiro), constituído por falésias e vales fluviais (Várzeas). A partir do Tabuleiro até a região Sertaneja predomina as Geomorfológicas modeladas nas rochas cristalinas, com exceção da Bacia do Rio do Peixe, que é sedimentar. O clima da Paraíba também é bastante diversificado, à medida que se adentra no continente, à partir do litoral o clima torna-se mais seco. Essa variação climática em direção ao interior se reflete, também, nos diferentes tipos de solo e vegetação (RODRIGUEZ, 2002).

A Paraíba é conhecida por apresentar clima semiárido na maior parte de seu território. A precipitação do Estado, assim como em todo o NEB, é proveniente de vários sistemas meteorológicos, tais como: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtices ciclônicos da Alta Troposfera (VCAS), Sistemas Ondulatórios de Leste, Linhas de Instabilidade e Perturbações de frentes frias que atuam em diferentes meses do ano, com características diferentes de um ano para outro (PEDROZA, 2009).

A Paraíba apresenta como característica climática marcante, a irregularidade do seu regime de chuva (MENEZES et al., 2008). Essa irregularidade espaço-temporal é bem representada por apresentar eventos climáticos tais como: secas, veranicos, cheias, dentre outros. As causas destas anomalias são intensamente pesquisadas, mas ainda não existem

conclusões definitivas para explicar esses eventos.

A carência de dados em locais não amostrados, faz com que haja a necessidade em se fazer a espacialização de variáveis, como é o caso da precipitação pluviométrica, que varia muito de um lugar para outro. Essa espacialização facilita a compreensão de alguns sistemas meteorológica que atua em cada região durante todo ano, além de se verificar áreas que apresentam um comportamento mais homogêneo em relação a outras através dos mapas estimados. A geoestatística é um ramo da estatística que pode auxiliar no estudo do comportamento de variáveis. Aqui a geoestatística foi usada como método para estudar a variabilidade mensal da precipitação pluvial. Dessa forma o objetivo deste trabalho é usar a geoestatística como método para estudar a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial mensal e estimar seus valores em locais com ausência de dados observados. Assim, torna-se necessário obter a distribuição espacial da precipitação pluvial média mensal, verificar a tendência de longo prazo da precipitação pluvial para níveis de significância específicos, identificar dependência espacial da chuva, como base em semivariograma, estimar a precipitação pluvial pela técnica de krigagem ordinária, obter os mapas dos vetores da precipitação pluvial média mensal, obter as estimativas com superfície de tendência, da precipitação média mensal e identificar os resíduos da precipitação pluvial média mensal

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.0.1 Análise geoestatística

2.0.2 Variáveis Regionalizadas

Segundo LANDIM (2003) as variáveis são ditas regionalizadas por apresentarem um comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e aquelas totalmente determinísticas. Essas variáveis apresentam uma aparente continuidade no espaço, são representadas por funções numéricas ordinárias assumindo um valor definido a cada ponto no espaço.

De acordo com ANDRIOTTI (2003) uma variável regionalizada é puramente descritiva não envolvendo qualquer interpretação probabilística, como exemplos de variáveis regionalizadas podem-se citar o teor de um elemento químico em uma rocha, precipitação anual de chuva em determinada região, a altura de um aquífero e até mesmo a densidade populacional (demográfica) de um país.

De acordo com (LANDIM et al., 2002) o comportamento das variáveis regionalizadas, se baseia nos seguintes pressupostos:

ERGODICIDADE: considerando que todos os possíveis eventos foram realizados dentro de certo domínio, a esperança matemática dessas possíveis realizações da variável é a mesma.

ESTACIONARIEDADE: na região onde se pretende fazer as estimativas, o fenômeno é descrito como homogêneo dentro desse espaço.

HIPÓTESE INTRÍNSECA: as diferenças entre valores apresentam fraco incremento, isto é, as diferenças são localmente estacionárias

2.0.3 Variograma e Semivariograma

O variograma nada mais é do que uma ferramenta que permite descrever quantitativamente a variação espacial de um fenômeno regionalizado. A natureza estrutural de um conjunto de dados (assumido pela variável regionalizada) é definido a partir da comparação de valores tomados simultaneamente em dois pontos, segundo uma determinada direção.

SALGUEIRO e MONTENEGRO (2008) abordaram com base em dados pluviométricos, o variograma da precipitação pluviométrica na bacia do rio Pajeú em Pernambuco, onde o ajuste dos semivariogramas: esférico, exponencial e gaussiano foram testados, tendo como melhor ajuste o semivariograma exponencial.

CARVALHO e ASSAD (2005) abordaram com base em dados pluviométricos, a precipitação média anual de 1.027 postos pluviométricos abrangendo todo território do Estado de São Paulo no período de 1957 a 1997, em que, de acordo com os dados obtidos, o semivariograma esférico foi o que apresentou melhor ajuste, o grau de ajuste do modelo foi verificado por meio do coeficiente de determinação $R^2 = 0.95$, mostrando o quanto da variação total foi explicada pelo modelo de regressão. De acordo com o resultado do exame do semivariograma ajustado para a precipitação média anual revela que existe dependência espacial, em que o efeito pepita é $C_0 = 0.0002$ com um alcance de $a = 48.5km$. A proporção desse valor para o patamar do semivariograma ($C_0 + C_1$), no caso 4, 76% indicativo da variação de um ponto para outro, que quanto menor esse valor mais parecidos são os valores vizinhos.

Segundo MATOS (2003) o semivariograma é uma função que serve para determinar os pesos que cada amostra coletada tem em relação aos pontos onde não foram coletadas informações. De forma intuitiva pode-se imaginar que pontos mais próximos dos pontos a serem estimados possuam maior peso do que aqueles que se encontram mais afastados que se deseja estimar.

De acordo com (SARTORI et al., 2010) abordaram com base em dados de precipitação, temperatura do ar e umidade relativa do ar com dados provenientes da Estação Meteorológica da Fazenda Lageado, da Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP no período de 1988 a 2007, onde de acordo com a análise variográfica feita observou-se que o modelo que melhor se ajustou aos dados foi o modelo esférico e de acordo com os resultados obtidos todos os variogramas apresentaram dependência espacial.

2.0.4 Isotropia e Anisotropia

Diz haver isotropia quando o semivariograma não varia de direção, ou seja, quando a variabilidade de um fenômeno é a mesma em todas as direções. Diz haver anisotropia quando o semivariograma varia de direção, ou seja, quando uma das direções for privilegiada em relação a outra (ANDRIOTTI, 2003).

CAMARGO (1997) afirma que algumas das variáveis regionalizadas mudam de comportamento em uma determinada direção e rápida ou irregulares em outra. A anisotropia depende das características do fenômeno estudado, por exemplo, uma planta daninha pode apresentar maior continuidade ao se desenvolver em direção das linhas do que na direção perpendicular.

2.0.5 Krigagem Ordinária

Segundo LANDIM (2003) a krigagem ordinária é uma técnica de estimativa linear que satisfaz a hipótese intrínseca, com média desconhecida e assume a hipótese de quase-estacionariedade, ou seja, usamos a krigagem ordinária quando a variável regionalizada (VR) é estacionária de primeira ordem. Para o caso mais geral em que a variável apresenta tendência, mas cujo resíduo a hipótese intrínseca se encaixa, deve-se usar o procedimento mais geral chamado de *krigagem universal*. A krigagem ordinária pode ser utilizada tanto para estimar um ponto, como um bloco, ou uma área no qual se deseja estimar.

ISSAKS e SRIVASTAVA (1989) argumentam que a krigagem ordinária é semelhante a regressão linear múltipla, com algumas diferenças em relação ao uso das matrizes utilizadas para resolver o sistema. Através da krigagem, pode-se fazer a previsão do valor pontual de uma VR em um local específico dentro do espaço geométrico levando em consideração todos os valores observados.

Segundo DRUCK (2002) o que difere o estimador de krigagem ordinária do estimador de krigagem simples, é que a primeira não requer o prévio conhecimento da média amostral.

SOUZA et al. (2010) utilizaram a krigagem ordinária e o inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos do químicos de um argissolo, onde foram analisados os atributos pH , $H + AI$ e SB em que todos os apresentaram dependência espacial variando de forte a moderada, o modelo que melhor se ajustou aos dados foi o modelo gaussiano, que permitiu o uso dos interpoladores geoestatísticos. De acordo com as análises feitas os dois interpolares não apresentaram diferenças significativas para

nenhum dos atributos, no entanto observou-se diferença visual nos mapas interpolados pelo dois métodos, tanto o método da krigagem ordinária, quanto o método do inverso do quadrado da distância foram importantes na inferência de valores não amostrados para o três tipos de atributos.

2.0.6 Análise de superfície de tendência

EMIDIO e LANDIM (2008) usaram a técnica da superfície de tendência com regressão polinomial de primeiro grau (superfície linear), para detectar anomalias na distribuição da chuva medida pelo radar meteorológico Doppler, banda S, localizado em bauru, no período de 21 de outubro de 2004 a 29 de abril de 2005.

Para LANDIM e CORSI (2001) o método da análise de superfície de tendência pode ser utilizado em locais onde ocorrem anomalias locais, ou seja, flutuações locais. Nesse caso tenta-se encaixar uma superfície linear aos dados, em seguida uma quadrática, uma cúbica e assim por diante até encontrar a que melhor represente os dados.

MANFRÉ et al. (2011) utilizaram a análise de superfície de tendência para estudar o comportamento espacial de alguns atributos do solo, ou seja, os locais onde ocorreram as menores e as maiores concentrações de cada atributo, como a condutividade elétrica do solo, onde o solo pode ser mais favorável ao cultivo.

URBAN et al. (2011) utilizaram a técnica de superfície de tendência de atributos do solo apresentaram potencial para verificação de impactos em áreas urbanas, ou seja, os nutrientes podem interferir na qualidade da água e locais com grande anormalidade com relação a tendência podem ser considerados em avaliação de impactos.

2.0.7 Mann-Kendall

O teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK) é um teste que possui uma grande aplicabilidade na estatística não paramétrica e tem sido comumente utilizado para verificar a significância de tendências em séries temporais hidrometeorológicas, tais como a qualidade da água, vazão, temperatura, precipitação dentre outras (YUE et al., 2001).

BLAIN (2010) detectou tendências climáticas com dados de precipitação pluviométrica em oito localidades, no período de 1948 a 2007 pertencentes ao Estado de São Paulo. De acordo com os resultados do teste sazonal de Mann-Kendall (SMK) aplicado para localidade Monte Alegre do Sul, o SMK indicou a presença de tendências de elevação nas séries mensais de setembro e maio. Nas localidades de Campinas e Ribeirão Preto,

este método não paramétrico indicou a existência de tendências de elevação nas séries relativas ao mês de maio e na localidade de Jundiá foi verificada tendência de elevação apenas quando os totais anuais foram analisados. Nas localidades de Cordeirópolis e Pindorama, nenhuma tendência significativa foi observada e na localidade de Ubatuba, foi detectada, em agosto, tendência de queda nos valores de precipitação pluvial (PRE).

O coeficiente (τ) de correlação de Kendall é apropriado para medir o grau de correlação, se forem obtidas mensurações pelo menos ordinais sobre as variáveis X e Y (SIEGEL e CASTELLAN, 2006).

PAIVA e CLAKE (1995) abordaram com base em dados mensais de precipitação pluviométrica em 48 estações pluviométricas da bacia Amazônica, com mais de 15 anos de registros. Os resultados obtidos usando o teste de Mann-Kendall permitiram duas conclusões. A primeira é que tanto os valores positivos quanto os negativos de τ (correspondendo à valores positivos e negativos de tendência, seja ou não estatisticamente significante) ocorre com frequência aproximadamente igual e que os valores de τ não difere mais do que o esperado pela incerteza, dada pela hipótese de tendência zero nos 48 locais observados. A segunda foi que os valores de τ estatisticamente significantes é maior do que seria esperado pela incerteza, dada pela hipótese de todas as tendências ausentes.

3 MATERIAL E METODOLOGIA

3.0.8 Área de Estudo

A Paraíba é uma das 27 Unidades Federativas do Brasil e está situada entre os paralelos 6° e 8° graus de latitude Sul, e entre os meridianos de 34° e 39° graus de longitude Oeste, totalmente incluído na Zona Tropical (Figura 1a) e faz divisa com Pernambuco, Rio Grande do Norte, Ceará e o Oceano Atlântico, abrangendo uma área de aproximadamente $56.340,9\text{km}^2$ com 4 mesorregiões e 223 municípios (RODRIGUEZ, 2002). A Paraíba também é marcada por seu relevo e sua hidrografia (Figura 1b). O índice de precipitação na Paraíba se deve a vários fatores meteorológicos tais como, Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtices ciclônicos da alta troposfera, sistemas ondulatórios de leste, linhas de instabilidade e sistemas frontais austrais que atuam em diferentes meses do ano com características diferentes de um ano para outro (PEDROZA, 2009).

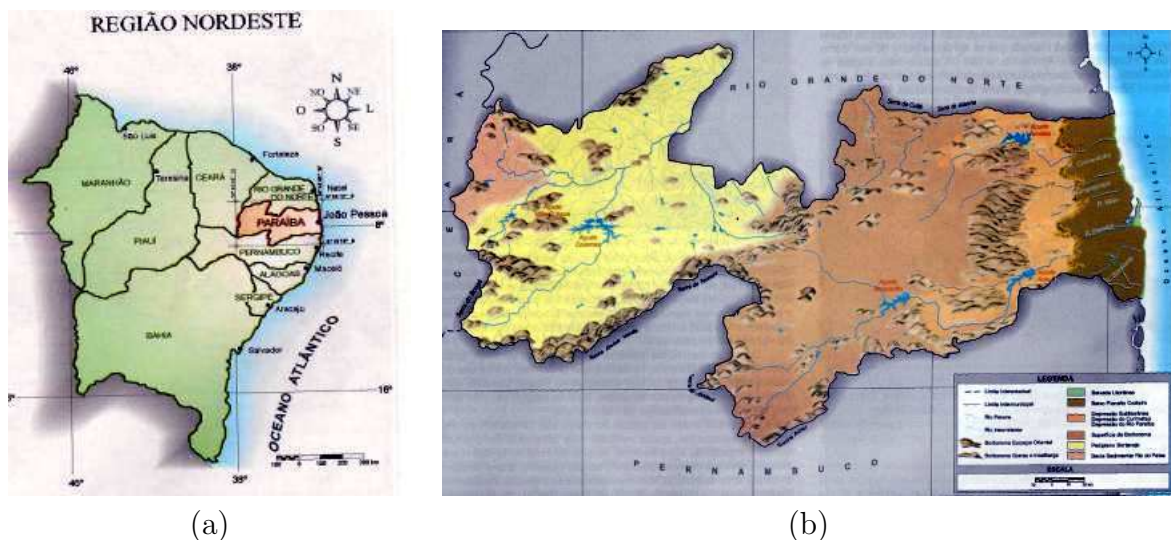


Figura 1: Representação gráfica da localização do Estado da Paraíba (a) Representação gráfica do mapa das unidades geomorfológica do Estado (b).

3.0.9 Dados

Foram utilizados dados mensais de precipitação pluviométrica distribuídos por todo Estado da Paraíba. Os dados foram coletados em estações meteorológicas e postos pluviométricos localizados em 102 municípios no período de 1962 a 2001. Os dados foram cedidos pela SUDENE e INMET. A Figura 2 mostra a distribuição espacial dos 102 postos pluviométricos distribuídos no Estado da Paraíba.

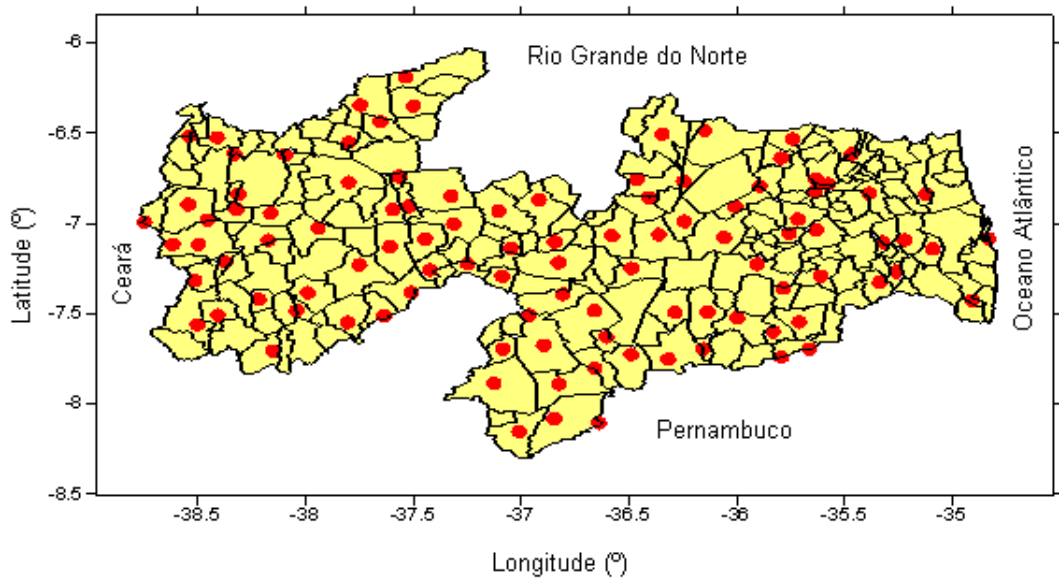


Figura 2: Representação gráfica da distribuição espacial dos 102 postos pluviométricos do Estado da Paraíba utilizados no estudo

3.0.10 Métodos

3.0.11 Análise Geoestatística dos Dados

A geoestatística estuda o comportamento das variáveis regionalizadas que possui um comportamento espacial, mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e aquelas totalmente determinísticas. A metodologia fundamental deste trabalho baseou-se nas técnicas de análise estatística e geoestatística para estudar o comportamento espacial e temporal da precipitação no Estado da Paraíba.

3.0.12 Estudo do Variograma e do Semivariograma

O variograma é uma ferramenta geoestatística que permite descrever quantitativamente a variação espacial de um fenômeno regionalizado. É definido a partir da comparação de valores tomados simultaneamente em dois pontos, segundo uma determinada direção. O semivariograma é definido pela função $\gamma(h)$ e o variograma corresponde ao dobro do semivariograma $2\gamma(h)$. O variograma foi estimado através da equação (3.1)

$$2\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{(i=1)}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad (3.1)$$

em que:

$2\hat{\gamma}(h)$ - é o variograma estimado;

$N(h)$ - é o número de pares medidos separados pelo vetor (h) ;

$z(x_i)$ e $z(x_i + h)$ - são os valores da i -ésima observação da variável regionalizada coletadas nos dois pontos

O semivariograma é definido pela função $\gamma(h)$, como mostrado na equação (3.2).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i=1)}^{N(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2 \quad (3.2)$$

O semivariograma possui alguns parâmetros como:

Alcance (a): é a distância até onde as amostras estão correlacionadas espacialmente

Patamar (C): é o valor do semivariograma correspondente ao seu alcance(a). A partir desse ponto, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, ou seja, a variância $\text{Var} [z(x_i) - z(x_i + h)]$ da diferença entre os pares de amostras torna-se constante.

Efeito Pepita (C_0): quando se extrapola a curva do semivariograma para a distância zero, o semivariograma pode chegar a um valor não nulo chamado de efeito pepita. O ideal seria que $\gamma(h) = 0$, ou seja, não houvesse descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras.

Contribuição (C_1) é a diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita C_0

Os parâmetros do semivariograma são mostrados na Figura 3.

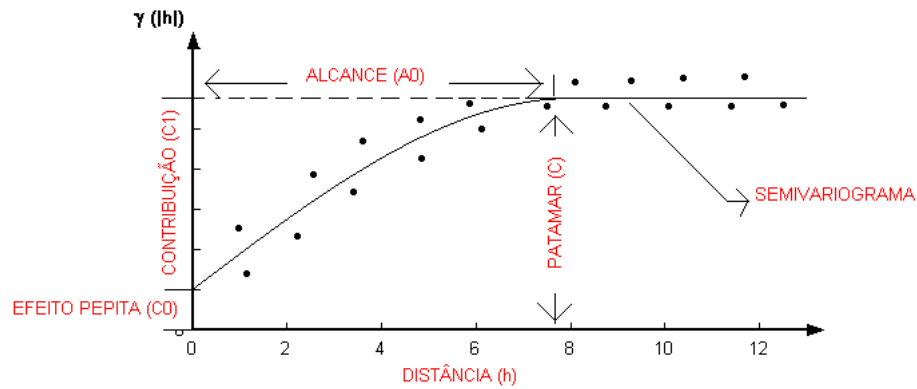


Figura 3: Representação gráfica de parâmetros do semivariograma

Alguns modelos teóricos de semivariograma podem ou não apresentar (patamar). Existem diversos modelos teóricos de variogramas, alguns desses modelos podem ser encontrados facilmente em qualquer artigo que fale sobre geoestatística. Por exemplo, LANDIM (2003) cita alguns desses modelos.

Modelos com patamar

Modelo esférico

$$\gamma(h) = C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], \text{ quando } h < a \quad (3.3)$$

$$\gamma(h) = C, \text{ quando } h \geq a \quad (3.4)$$

b) Modelo exponencial

$$\gamma(h) = C \left[1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right] \quad (3.5)$$

c) Modelo gaussiano

$$\gamma(h) = C \left[1 - e^{\left(\frac{-3h}{a} \right)^2} \right] \quad (3.6)$$

Modelos sem patamar

d) Modelo potencial

$$\gamma(h) = Ch^\alpha \quad (3.7)$$

para $\alpha = 1$ o modelo torna-se linear

para $1 < \alpha < 2$ a curva inclina-se para a esquerda

para $0 < \alpha < 1$ a curva inclina-se para a direita

O modelo potencial é outro modelo bastante comum entre os variogramas que não apresenta soleira, este tipo de variograma apresenta uma variância infinita e não ocorre uma função de covariância; neste caso, a hipótese intrínseca é a única aceitável. O tipo de semivariograma citado é mostrado na Figura 4.

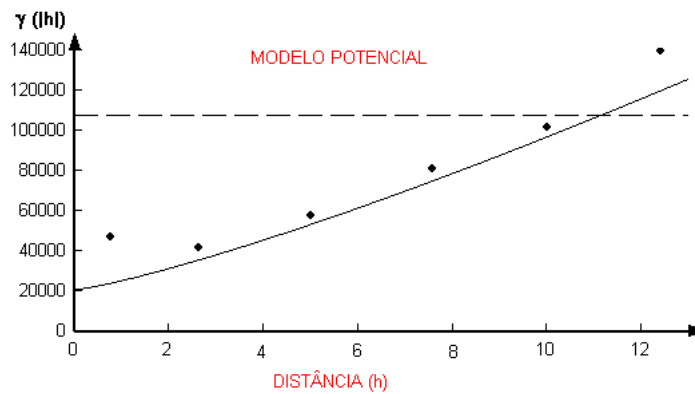


Figura 4: Modelo potencial de variograma teórico gerado pelo software Variowin 2.2

3.0.13 Isotropia e Anisotropia

Muita das vezes quando queremos analisar um fenômeno em outras direções, seu comportamento muda, o que chamamos de “anisotropia”, ou seja, quando o semivariograma varia de direção em relação a outra, caso contrário chamamos de “isotropia”, ou seja, quando o semivariograma não varia de direção. Os três tipos mais comuns de anisotropia são mostrados na Figura 5.

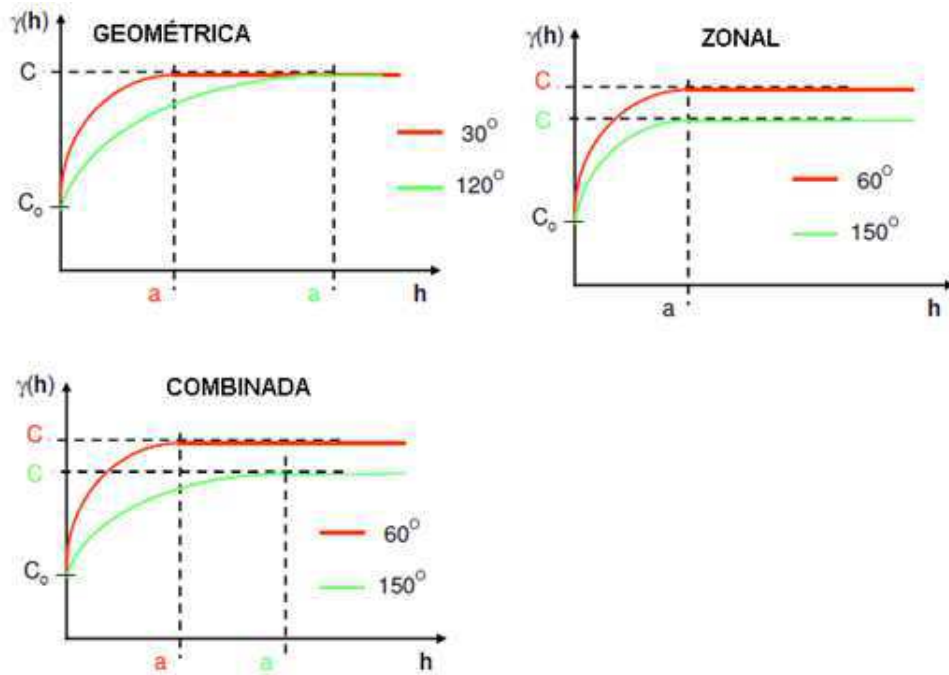


Figura 5: Tipos de anisotropias presentes nos semivariogramas

A anisotropia geométrica é aquela em que o semivariograma, mantém o mesmo patamar, porém alcances diferentes. A anisotropia zonal é aquela em que o semivariograma mantém o mesmo alcance porém patamares diferentes e a anisotropia combinada é aquela em que tanto os alcances, quanto os patamares são diferentes.

3.0.14 Índice de Dependência Espacial

O índice de dependência espacial serve para mensurar a dependência espacial do fenômeno, ou seja, os semivariogramas expressam o comportamento da variável regionalizada, ou de seus resíduos e mostram o tamanho da zona de influência em torno da amostra. Nesse estudo essa dependência foi calculada de acordo com a equação (3.8) (ZIMBACH, 2001).

$$IDE = \frac{C_1}{C_1 + C_0} \times 100 \quad (3.8)$$

em que:

valores $IDE \leq 25\%$ dependência fraca;

valores $25\% < IDE < 75\%$ dependência moderada;

valores maiores $IDE \geq 75\%$ dependência forte

Outra consideração importante foi determinar o grau de aleatoriedade presente nos dados dada pela equação (3.9) (GUERRA, 1988, apud LANDIM, 2003, p.179)

$$E = \frac{C_0}{C} \quad (3.9)$$

em que:

valores $E < 0,15$ componente aleatória pequena;

valores $0,15 \leq E \leq 0,30$ componente aleatória significativa

valores $E > 0,30$ componente aleatória muito significativa.

3.0.15 Krigagem Ordinária

A krigagem ordinária é utilizada quando a variável regionalizada (VR) é estacionária de primeira ordem e pode ser utilizada tanto para estimar valores em um ponto, em blocos, ou em uma área. O estimador de krigagem ordinária utilizado nesse estudo está mostrado na equação (3.10).

$$\hat{Z}_{(x_0)} = \sum [\lambda_i Z_{(x_i)}] \quad (3.10)$$

em que:

$\hat{Z}_{(x_0)}$ - é o valor estimado para o local x_0 não amostrado;

$Z_{(x_i)}$ - é o valor obtido por amostragem no campo;

λ_i são os pesos aplicados em cada $Z_{(x_i)}$.

O estimador $\hat{Z}_{(x_0)}$, não requer o conhecimento prévio da média, mas requer que a soma dos pesos $\sum \lambda_i$ seja igual a 1

3.0.16 Coeficiente de Variação

Segundo OLIVEIRA (1999) o coeficiente de variação é uma medida de dispersão que serve para comparar o grau de concentração em torno da média de séries distintas de dados, como mostrado na equação (3.11), utilizada nessa pesquisa:

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (3.11)$$

em que $C_v < 10\%$ baixa dispersão; $10\% < C_v < 20\%$ média dispersão; $C_v > 20\%$ alta dispersão; s : desvio padrão da amostra; \bar{x} : média aritmética.

3.0.17 Coeficiente de Curtose

De acordo com JÚNIOR (2004), denomina-se curtose o grau de achatamento de uma distribuição de dados, que foi calculado de acordo com a equação (3.12)

$$C_k = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{S_x} \right)^4 - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (3.12)$$

em que $C_k = 0$, a distribuição é dita mesocúrtica; $C_k < 0$, a distribuição é dita leptocúrtica; $C_k > 0$, a distribuição é dita platicúrtica; n : número de observações; S_x : desvio padrão da amostra

3.0.18 Coeficiente de Assimetria

O coeficiente de assimetria é outra medida de dispersão que serve para medir o grau de afastamento da simetria de uma distribuição de dados (JÚNIOR, 2004), e foi calculado de acordo com a equação (3.13).

$$C_S = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{S_x} \right)^3 \quad (3.13)$$

em que se o resultado for ($C_S = 0$), a distribuição é simétrica, se ($C_S < 0$), a distribuição é assimétrica negativa, se ($C_S > 0$), a distribuição é assimétrica positiva; n : número de observações; S_x : desvio padrão da amostra; \bar{x} : média aritmética

3.0.19 Análise de superfície de tendência

Segundo LANDIM (2003), a análise de superfície de tendência é uma técnica bastante simples e útil. Por essa técnica, tanto os mapas de tendência, quanto os resíduos, podem ser interpretados do ponto de vista espacial. Essa técnica possibilita, também, que seja efetuada interpolações para suprir a carência de dados observados. Aqui foi utilizado o método dos polinômios não ortogonais, para ajustá-los à amostra e estimar dados faltosos. O modelo matemático dos polinômios não ortogonais pode ser visto na equação (3.14).

$$z_i(X, Y) = [a_0 + a_1x_i + a_2y_i + a_3x_i^2 + a_4x_iy_i + a_5y_i^2 + \dots] + e_i(x_i, y_i) \quad (3.14)$$

em que $z_i(X, Y)$ é a variável mapeada em função das coordenadas x_i e y_i ; $e_i(x_i, y_i)$ representa os resíduos; $a \dots o$ são os coeficientes que proporcionam o melhor ajuste aos dados amostrados

Os tipos de equações polinomiais utilizados nesse estudo são mostradas nas equações (3.15), (3.16), (3.17), (3.18) e (3.19)

- Superfície de primeira ordem

$$Z^*(X, Y) = a + bY + cX \quad (3.15)$$

- Superfície de segunda ordem

$$Z^*(X, Y) = a + bY + cY^2 + dX + eXY + fX^2 \quad (3.16)$$

- Superfície de terceira ordem

$$Z^*(X, Y) = a + bY + cY^2 + dY^3 + eX + fXY + gXY^2 + hX^2 + iX^2Y + jX^3 \quad (3.17)$$

- Superfície de quarta ordem

$$\begin{aligned}
Z^*(X, Y) = & a + bY + cY^2 + dY^3 + eY^4 + fX + gXY + hXY^2 + iXY^3 + jX^2 \\
& + kX^2Y + lX^2Y^2 + mX^3 + nX^3Y + oX^4
\end{aligned} \tag{3.18}$$

- Superfície de quinta ordem

$$\begin{aligned}
Z(X, Y) = & a + bY + cY^2 + dY^3 + eY^4 + fY^5 + gX + hXY + iXY^2 + jXY^3 \\
& + kXY^4 + lX^2 + mX^2Y + nX^2Y^2 + oX^2Y^3 + pX^3 + qX^3Y + rX^3Y^2 + sX^4 + tX^4Y + uX^5
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Hipóteses das superfícies de tendências

$$\begin{cases} H_0 : \text{não ocorre ajuste significativo da superfície calculada aos dados} \\ H_1 : \text{ocorre ajuste significativo da superfície calculada aos dados} \end{cases}$$

3.0.20 Mann-Kendall

O teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK) foi utilizado para verificar a significância de tendências nas séries de precipitação pluviométrica. A estatística S do teste de Mann-Kendall foi calculada de acordo com a equação (3.20)

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \tag{3.20}$$

O sinal foi obtido mediante as equações (3.21), (3.22) e (3.23)

$$\text{sign}(x_j - x_k) = 1 \quad \text{se} \quad x_j - x_k > 0 \tag{3.21}$$

$$\text{sign}(x_j - x_k) = 0 \quad \text{se} \quad x_j - x_k = 0 \tag{3.22}$$

$$\text{sign}(x_j - x_k) = -1 \quad \text{se} \quad x_j - x_k < 0 \tag{3.23}$$

A estatística S aproxima-se da normalidade à medida que n cresce, com média e variância definidas como nas equações (3.24) e (3.25).

$$E(S) = 0 \quad (3.24)$$

$$Var(S) = \frac{1}{18}[n(n-1)(2n+5)] \quad (3.25)$$

O teste estatístico Z serve para calcular a tendência de uma série temporal foi obtido através da equação (3.26).

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (3.26)$$

O coeficiente τ de correlação do teste de Mann-Kendall foi calculado de acordo com a equação (3.27) (SIEGEL; CASTELLAN, 2006).

$$\tau = \frac{2S}{N(N-1)} \quad (3.27)$$

Hipóteses do teste de Mann-Kendall

$$\begin{cases} H_0 : \text{não existe tendência significativa na série de dados} \\ H_1 : \text{existe tendência significativa na série de dados} \end{cases}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.0.21 Análise descritiva dos dados

A Tabela 1 exibe os resultados da análise descritiva da precipitação média mensal. Pode ser visto na Tabela que todos os meses apresentaram coeficiente de assimetria positivo ($Cs > 0$), o que indica dados amostrais assimetricamente positivos. Os coeficientes de variação ($Cv > 20\%$) implicam em alta dispersão em relação aos valores médios e indicam o percentual de variabilidade da chuva. Todos os valores médios são maiores do que suas respectivas medianas exceto abril, isso confirma a assimetria positiva dos dados. Com relação à curtose, apenas os meses de janeiro e fevereiro apresentaram coeficientes de curtose ($Ck < 0$), indicando que nesses meses a distribuição dos dados é do tipo leptocúrtica.

Tabela 1: Estatísticas da precipitação pluvial média mensal do Estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)

Meses	n	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	S	Cs	Ck	$Cv\%$
janeiro	102	66,24	58,26	16,37	159,96	36,18	0,64	-0,58	54,62%
fevereiro	102	100,20	99,27	28,73	197,82	44,05	0,39	-0,91	43,97%
março	102	160,65	159,09	67,30	396,22	57,73	0,67	1,28	35,94%
abril	102	153,70	155,05	76,92	321,31	48,29	0,64	0,57	31,42%
maio	102	83,51	75,11	29,78	287,84	45,55	2,10	6,56	54,55%
junho	102	63,40	36,33	10,80	322,79	60,95	2,31	5,86	96,14%
julho	102	57,78	29,34	3,23	303,27	62,12	1,93	3,56	107,52%
agosto	102	27,25	10,92	0,00	171,56	36,74	2,19	4,71	134,81%
setembro	102	16,94	6,80	0,00	103,19	22,04	2,00	3,43	130,09%
outubro	102	9,83	7,25	0,35	54,23	9,67	2,50	7,47	98,46%
novembro	102	13,38	11,18	1,26	54,89	9,92	1,61	3,49	74,11%
dezembro	102	30,27	28,60	7,65	76,18	13,75	0,75	0,19	45,42%

n: número de observações; S: desvio-padrão; Cv : coeficiente de variação; Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros e os modelos de semivariogramas ajustados aos dados de precipitação pluvial. Todos os semivariogramas foram analisados na direção 0° (EW) e apresentaram forte índice de dependência espacial ($IDE > 75\%$). Como mostrado na Tabela todos os modelos apresentaram valores dos coeficientes de determinação ($R^2 > 90\%$), indicando que as variações da precipitação pluvial foram bem explicadas pelos modelos, com exceção do mês de abril ($R^2 = 75,2\%$).

Tabela 2: Parâmetros dos semivariogramas ajustados à precipitação pluvial média mensal do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)

Meses	Modelos	C_0	$C_0 + C_1$	A_0	IDE	R^2
Janeiro	Linear	1,0000	949,0000	104,10	99,9%	95,7%*
Fevereiro	Linear	1,0000	1404,0000	104,10	99,9%	94,4%*
Março	Esférico	10,0000	5539,0000	309,60	99,8%	91,8%
Abril	Esférico	328,0000	2951,0000	216,30	88,9%	75,2%
Maio	Exponencial	223,0000	3258,0000	164,60	93,1%	92,0%
Outubro	Esférico	22,8000	234,2000	710,90	90,0%	95,7%*
Novembro	Esférico	32,1000	120,1000	236,40	73,3%	96,5%*
Dezembro	Esférico	38,5000	283,8000	307,00	86,4%	90,5%

IDE: índice de dependência espacial; C_0 : efeito pepita; $C_0 + C_1$: patamar; A_0 : alcance; R^2 : coeficiente de determinação

As Figuras 6 e 7 mostram os modelos de semivariogramas ajustados à precipitação pluvial média mensal do estado da Paraíba. De acordo com os ajustes foi verificado que o modelo que melhor se ajustou as médias mensais dos meses de janeiro e fevereiro foi o modelo linear, com um alcance de aproximadamente 105 km e 99,9% de dependência espacial (IDE). Os meses de março, abril, outubro, novembro e dezembro foram ajustados pelo modelo esférico com dependência espacial $73,3\% \leq IDE \leq 99,9\%$, os meses de junho a setembro foram ajustados pelo modelo potencial Figura 8.

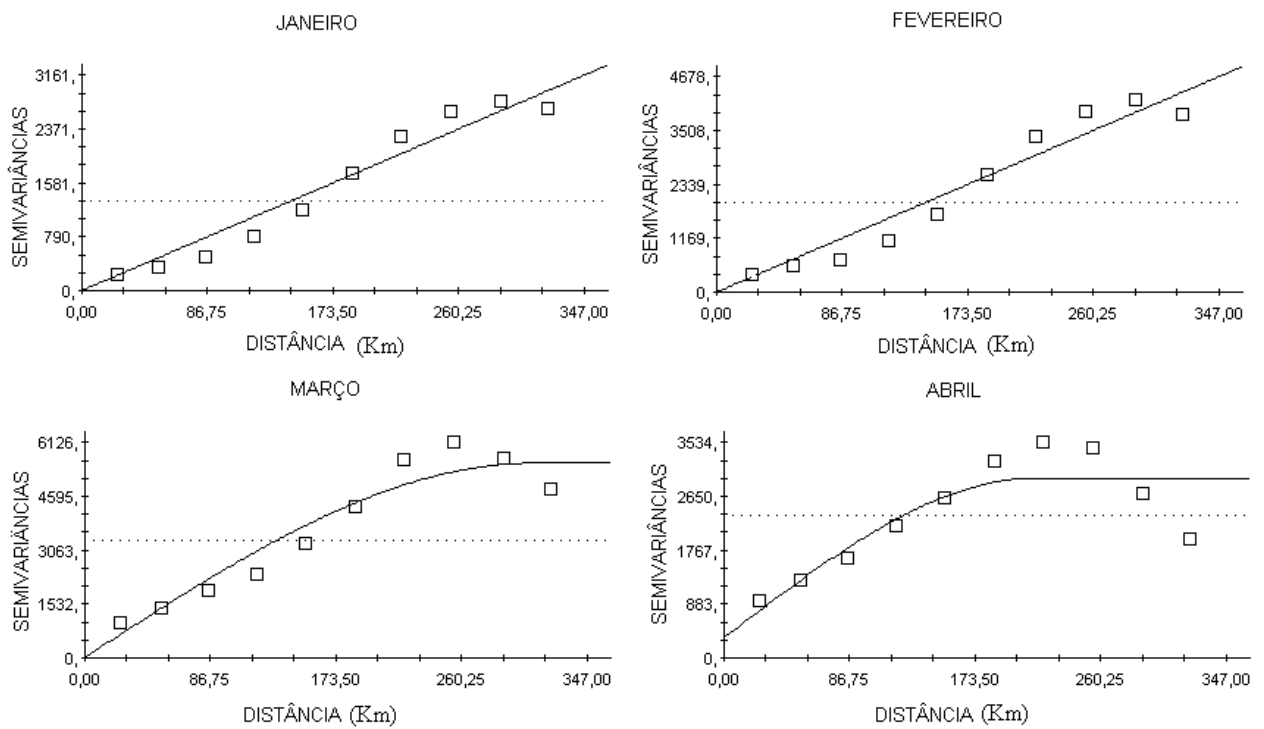


Figura 6: Semivariogramas ajustados à precipitação pluvial média mensal do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)

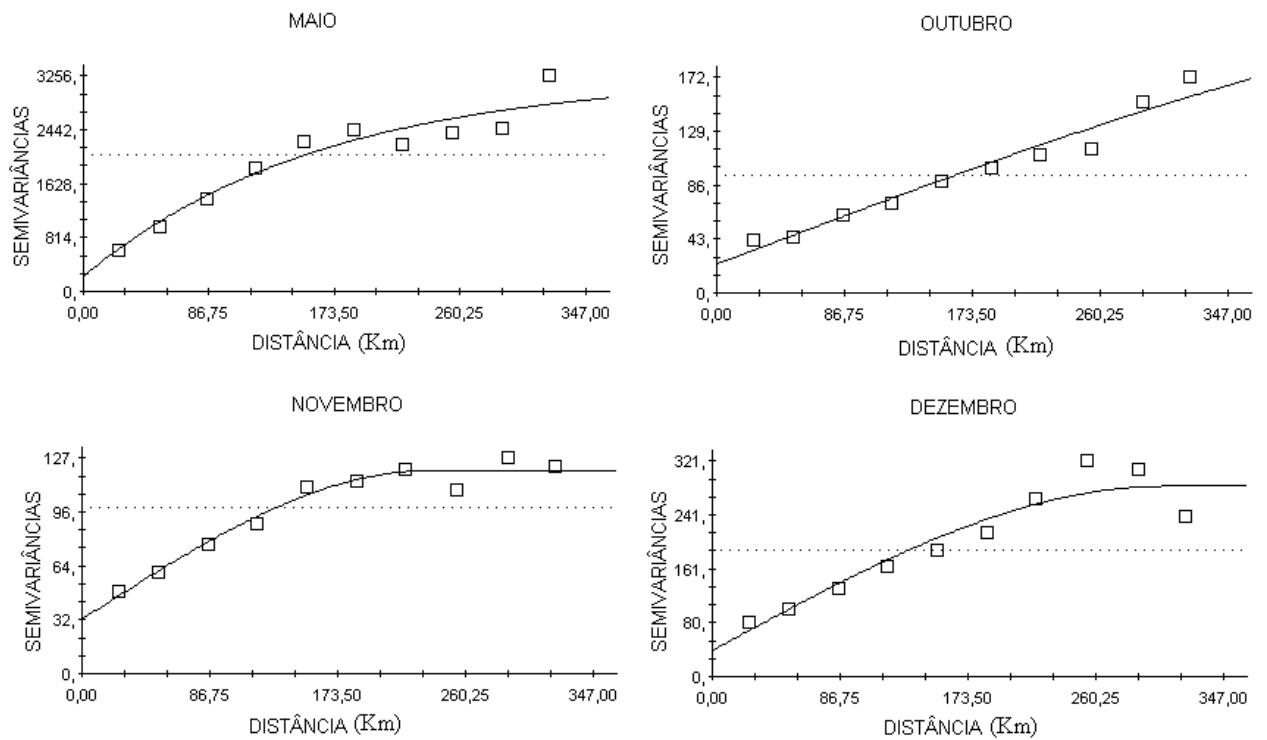


Figura 7: Semivariogramas ajustados à precipitação pluvial média mensal do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)

Na Figura 8 são mostrados os semivariogramas ajustados às médias mensais dos meses de junho a setembro, de acordo com LANDIM (2003) esse tipo de semivariograma indica a presença de tendência nos dados. Esse tipo de situação pode ser resolvida aplicando uma outra técnica da geostatística chamada de krigagem com tendência, proposta em (LANDIM et al, 2002).

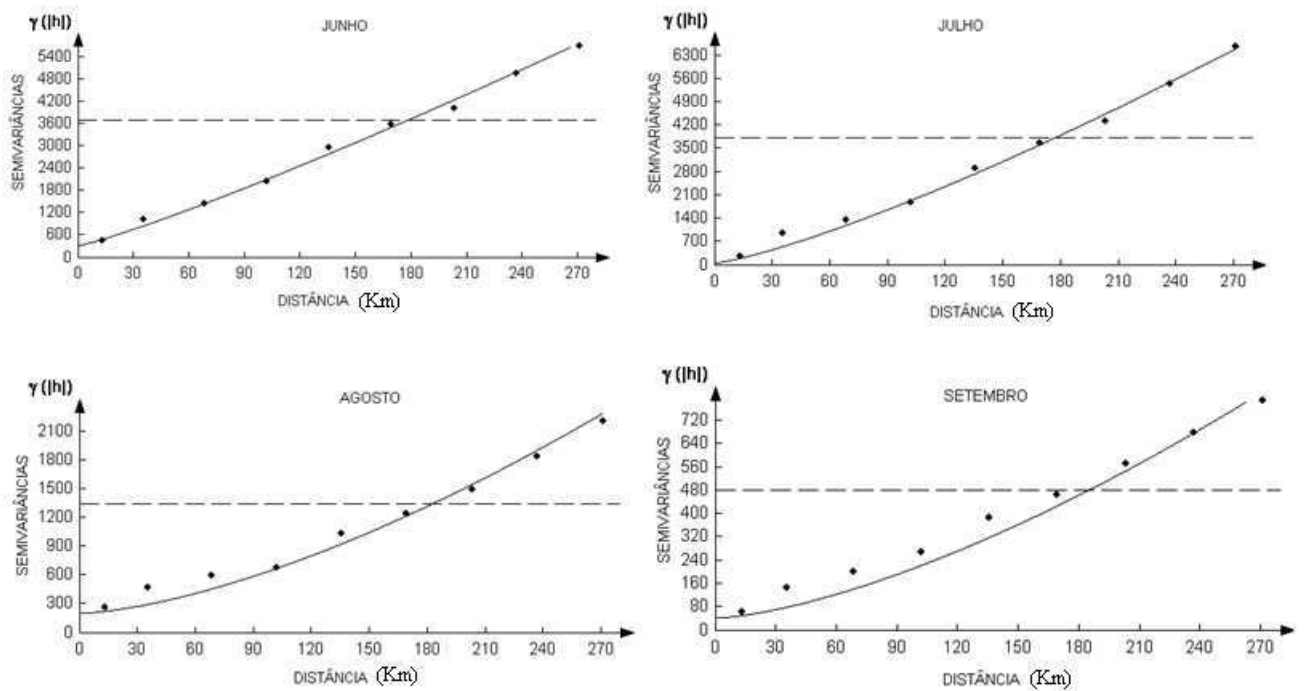


Figura 8: Semivariogramas ajustados à precipitação pluvial média, dos meses de junho a setembro, do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)

4.0.22 Análise da tendência espacial

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de tendência da precipitação pluvial média mensal, utilizando o teste de Mann-Kendall, com nível de significância adotado ($\alpha = 0.05$), os valores positivos de Z indicam tendência crescente, já os valores negativos de Z indicam tendência decrescente. De acordo com os resultados, apenas os meses de maio e novembro não apresentaram tendências significativas ($p - valor > 0,05$). Esse valor satisfaz a hipótese nula (H_0), não há tendência significativa na série, esse fato pode estar relacionado ao fim do período chuvoso do Sertão e início do período chuvoso no Litoral do Estado. Já no mês de novembro o fato pode estar associado ao final do período de chuva no Sertão e início do período chuvoso no Litoral. Os meses de dezembro a abril apresentaram tendências espaciais positivas e significativas em direção ao Sertão, ou seja, os maiores vetores de precipitação estão localizados nessa Região, como mostrado na Figura 13 ($Z > 0$) e ($p - valor < 0,05$); esses valores satisfazem a hipótese alternativas (H_1), há tendência nas séries, isso pode estar associado ao período chuvoso no Sertão. Os meses de junho a outubro apresentaram tendências espaciais negativas e significantes em direção ao Litoral, ou seja, os maiores vetores de precipitação estão localizados nessa Região como mostrado na Figura 14 ($Z < 0$) e ($p - valor < 0,05$), satisfazendo a hipótese alternativa (H_1), isso pode estar associado ao período de chuva do Litoral.

Tabela 3: Análise descritiva do teste de mann-kendall

Meses	período-registro	τ	Z	p-valor
janeiro	1962-2001	0.345	5.135	$2.8193e - 07^*$
fevereiro	1962-2001	0.398	5.924	$3.1311e - 09^*$
março	1962-2001	0.385	5.734	$9.827e - 09^*$
abril	1962-2001	0.268	3.987	$6.6835e - 05^*$
maio	1962-2001	-0.108	-1.599	0.10983
junho	1962-2001	-0.502	-7.460	$8.6493e - 14^{**}$
julho	1962-2001	-0.645	-9.591	$< 2.22e - 16^{**}$
agosto	1962-2001	-0.61	-9.059	$< 2.22e - 16^{**}$
setembro	1962-2001	-0.51	-7.570	$3.7194e - 14^{**}$
outubro	1962-2001	-0.247	-3.667	0.00024549*
novembro	1962-2001	-0.0698	-1.035	0.30057
dezembro	1962-2001	0.152	2.261	0.023750*

Z: tendência das médias mensais da precipitação pluvial calculada pelo teste; τ : coeficiente de correlação de mann-kendall; significativo {*}; muito significativo {**}

4.0.23 Análise de superfície de tendência dos dados

A Tabela 4 mostra os resultados da análise de superfície de tendência, para cinco graus aplicado aos dados. De acordo com os valores dos coeficientes de determinação (R^2), a superfície de 4ª ordem foi a que melhor se ajustou aos dados, O mês de agosto foi o que apresentou o menor coeficiente de determinação ($R^2 \cong 75,6\%$), ou seja, da variação total apenas 75,6% foi explicada equação de regressão.

Tabela 4: Coeficientes de determinação dos polinômios não ortogonais de superfície, ajustados à precipitação pluvial média, dos meses de junho a setembro, do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)

Meses	$R^2(1)$	$R^2(2)$	$R^2(3)$	$R^2(4)$	$R^2(5)$
Junho	0,470625755	0,742159857	0,799981001	0,810539616*	0,38907046
Julho	0,571591135	0,790024281	0,814835415	0,827050223*	0,490329423
Agosto	0,506865863	0,716042344	0,742302168	0,755819498*	0,433681747
Setembro	0,468040325	0,760494269	0,788048995	0,804474422*	0,389483569

A Tabela 5 mostra os resultados da análise de variância da superfície de 4º grau ajustada aos dados, onde para os níveis de significância adotados ($\alpha = 1\%$) e ($\alpha = 5\%$). De acordo com os valores do teste F, todas as superfícies de 4ª ordem foram significativas satisfazendo a hipótese alternativa H_1 .

Tabela 5: Análise de variância para verificar o ajuste de superfície de 4º grau aos dados, dos meses de junho a setembro, do estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)

Fonte de Variação (Junho)	SQ	g.l.	QM	$F_{calculado}$
Regressão polinomial de (4º grau)	303839,2126	14	21702,8009	26,43569305*
Resíduos	71424,02789	87	820,9658379	
Total	375263,2405	101		
Fonte de Variação (Julho)	SQ	g.l.	QM	F_c
Regressão polinomial de (4º grau)	321817,2855	14	22986,94896	29,41598975*
Resíduos	67985,62878	87	781,444009	
Total	389802,9142	101		
Fonte de Variação (Agosto)	SQ	g.l.	QM	$F_{calculado}$
Regressão polinomial de (4º grau)	102735,469	14	7338,247783	19,01384138*
Resíduos	33576,98974	87	385,9424109	
Total	136312,4587	101		
Fonte de Variação (Setembro)	SQ	g.l.	QM	$F_{calculado}$
Regressão polinomial de (4º grau)	39307,34875	14	2807,667768	25,00692808*
Resíduos	9767,976899	87	112,2755965	
Total	49075,32565	101		

4.0.24 Krigagem ordinária da precipitação pluvial média mensal

Os mapas de interpolação pelo método da krigagem ordinária foram efetuados para os meses de janeiro, fevereiro, outubro e novembro. O critério para escolha desses meses foi o dos maiores valores de (R^2). Foram confeccionados os mapas de interpolação por krigagem ordinária dos valores ajustado pelo modelo (A.) e o mapa dos resíduos (B.). Os resultados estão expostos nas Figuras (9), (10), (11) e (12).

A Figura 9A mostra o mapa dos valores ajustados pelo modelo das médias mensais da precipitação pluviométrica para o mês de janeiro, esse mapa indica as regiões onde ocorrem os maiores e os menores valores estimados pelo método da krigagem ordinária das médias mensais de precipitação pluviométrica, como pode ser observado no mapa, as regiões do Cariri e Curimataú apresentaram as menores médias mensais de precipitação pluviométrica seguido da região do Litoral, já no sertão foram verificados as maiores médias mensais da precipitação pluviométrica, que pode estar diretamente associada ao período chuvoso da região. A Figura 9B mostra o mapa dos resíduos das médias mensais da precipitação do mês de janeiro. Os valores positivos podem ser interpretados como sendo àqueles locais onde os valores observados foram maiores do que os estimados e os negativos como sendo àqueles locais onde os estimados foram maiores do que os observados das médias mensais da precipitação pluviométrica.

Os resultados mostrados nas Figuras 10A, 10B são semelhantes aos da Figura 9A, 9B. Por se tratar da época chuvosa na região do Sertão, apenas os valores das médias mensais da precipitação são mais intensos. A Figura 11A mostra o mapa dos valores ajustados das médias mensais da precipitação do mês de outubro. Como pode ser visto, a região do Litoral apresenta maiores valores de precipitação pluviométrica do que as regiões do Cariri e do Sertão, pois se trata do final do período chuvoso na região do Litoral. O mapa dos resíduos deixa clara a superioridade das chuvas do Litoral em relação às do sertão haja vista que o processo se inverte, finda o período chuvoso no Litoral e inicia o período chuvoso do Sertão. No mapa da Figura 12A os valores estimados da precipitação na região do Sertão aumentam e os do Litoral diminuem. No mapa dos resíduos o número de pontos positivos começa a aumentar, indicando o surgimento de valores mais altos de precipitação na região.

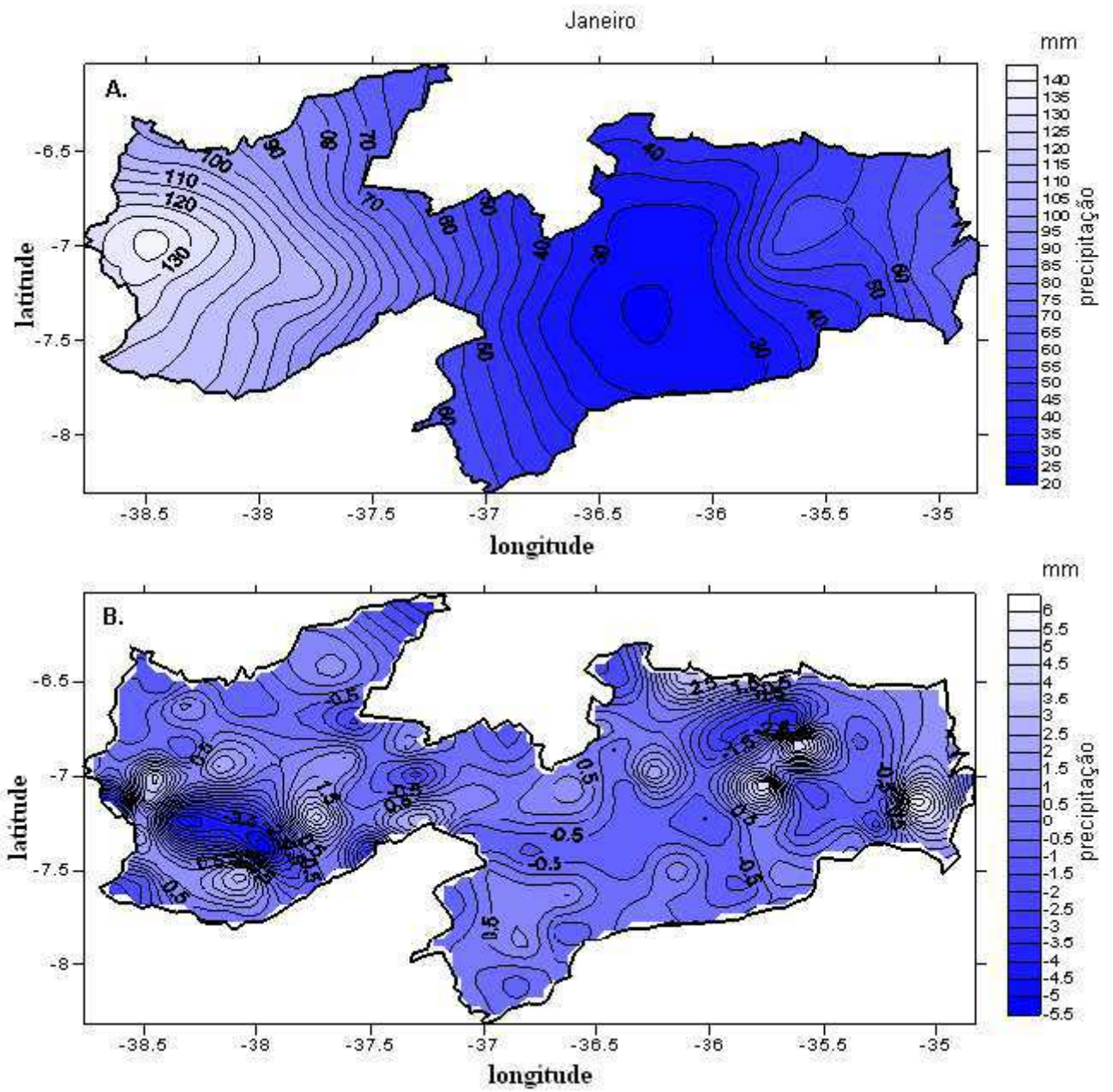


Figura 9: Interpolação por krigagem ordinária dos valores, ajustados pelo modelo (A.) e dos resíduos (B.) das médias mensais da precipitação pluviométrica no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2001.

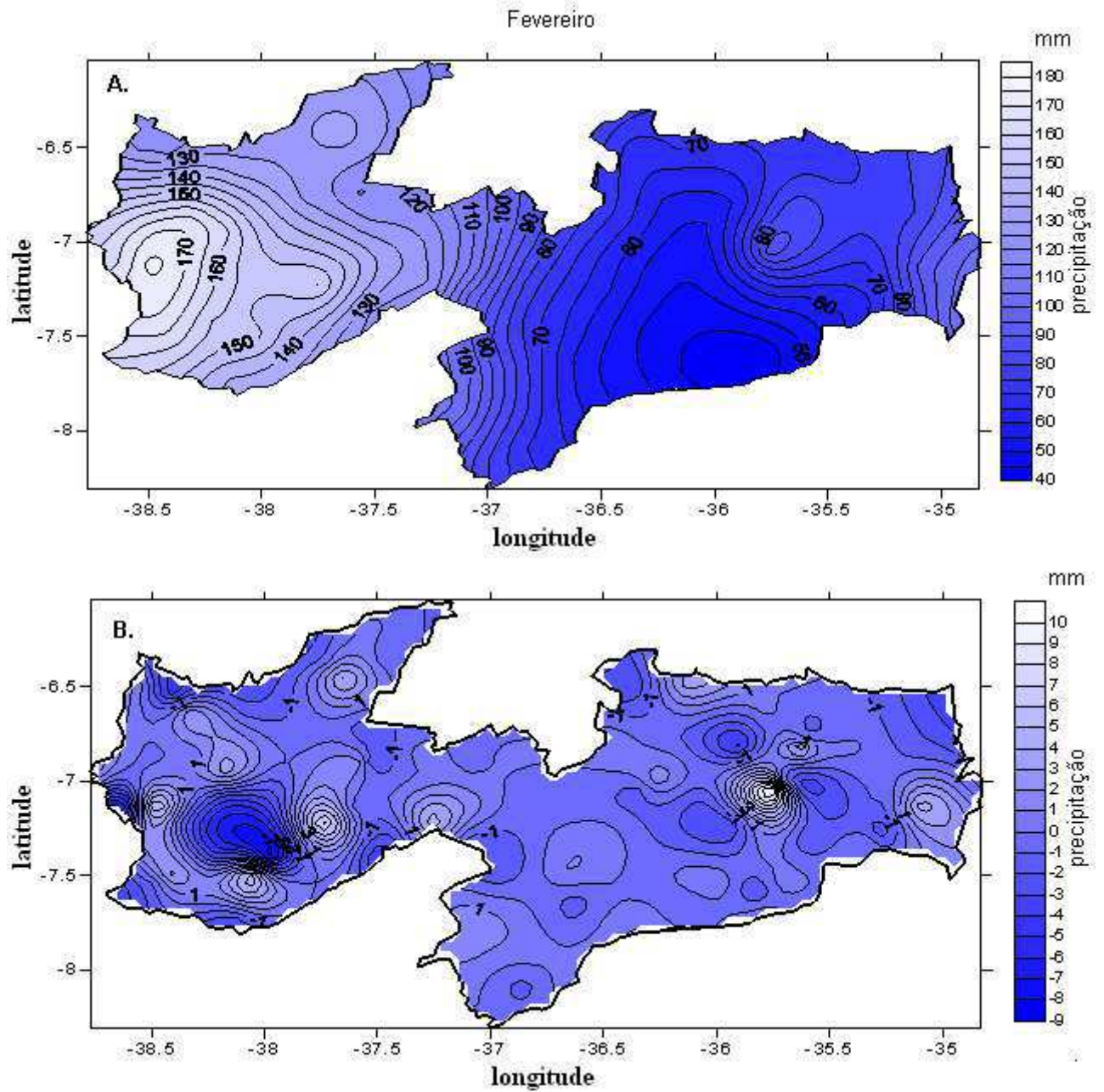


Figura 10: Interpolação por krigagem ordinária dos valores, ajustados pelo modelo (A.) e dos resíduos (B.) das médias mensais da precipitação pluviométrica no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2001.

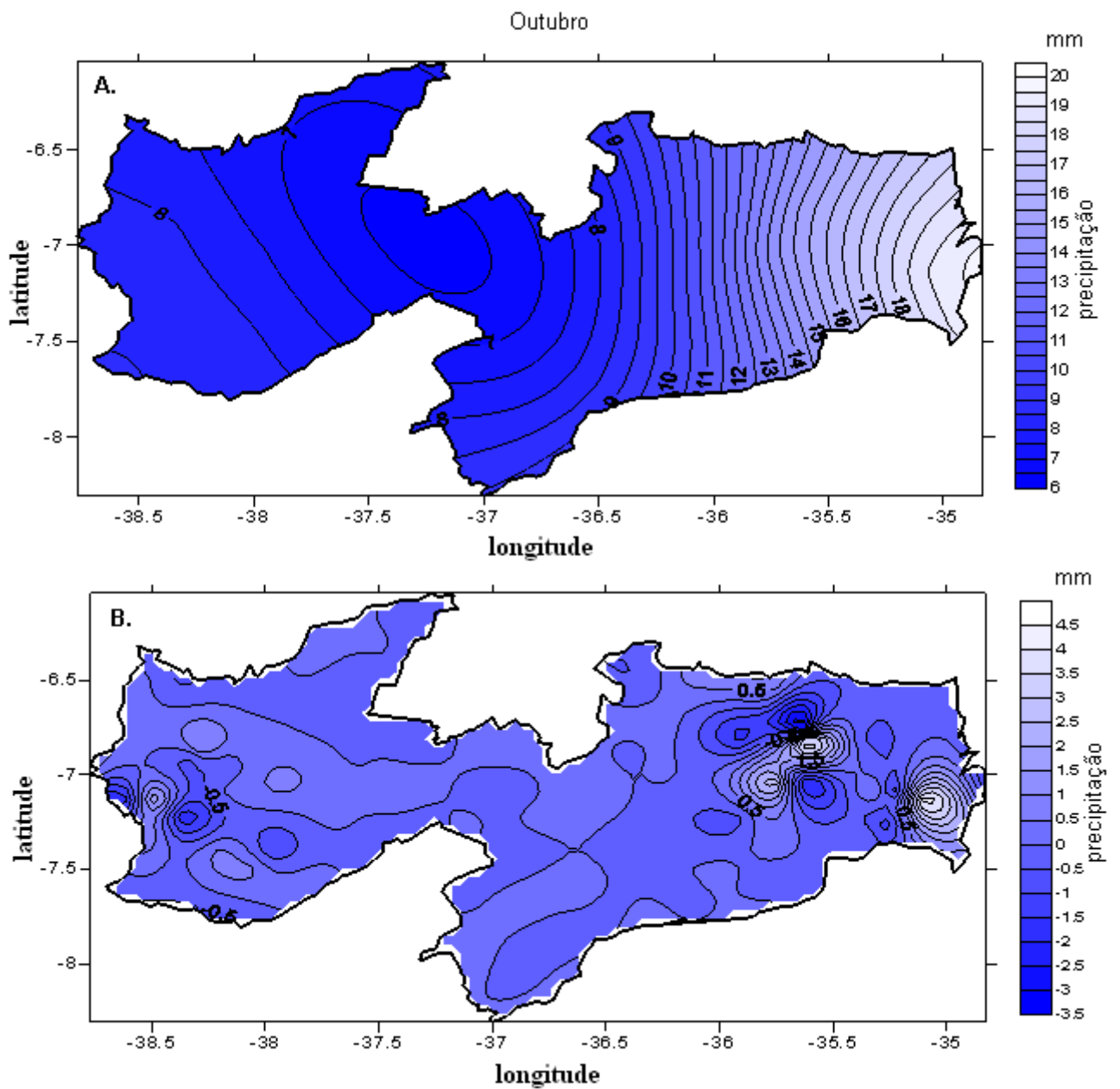


Figura 11: Interpolação por krigagem ordinária dos valores, ajustados pelo modelo (A.) e dos resíduos (B.) das médias mensais da precipitação pluviométrica no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2001.

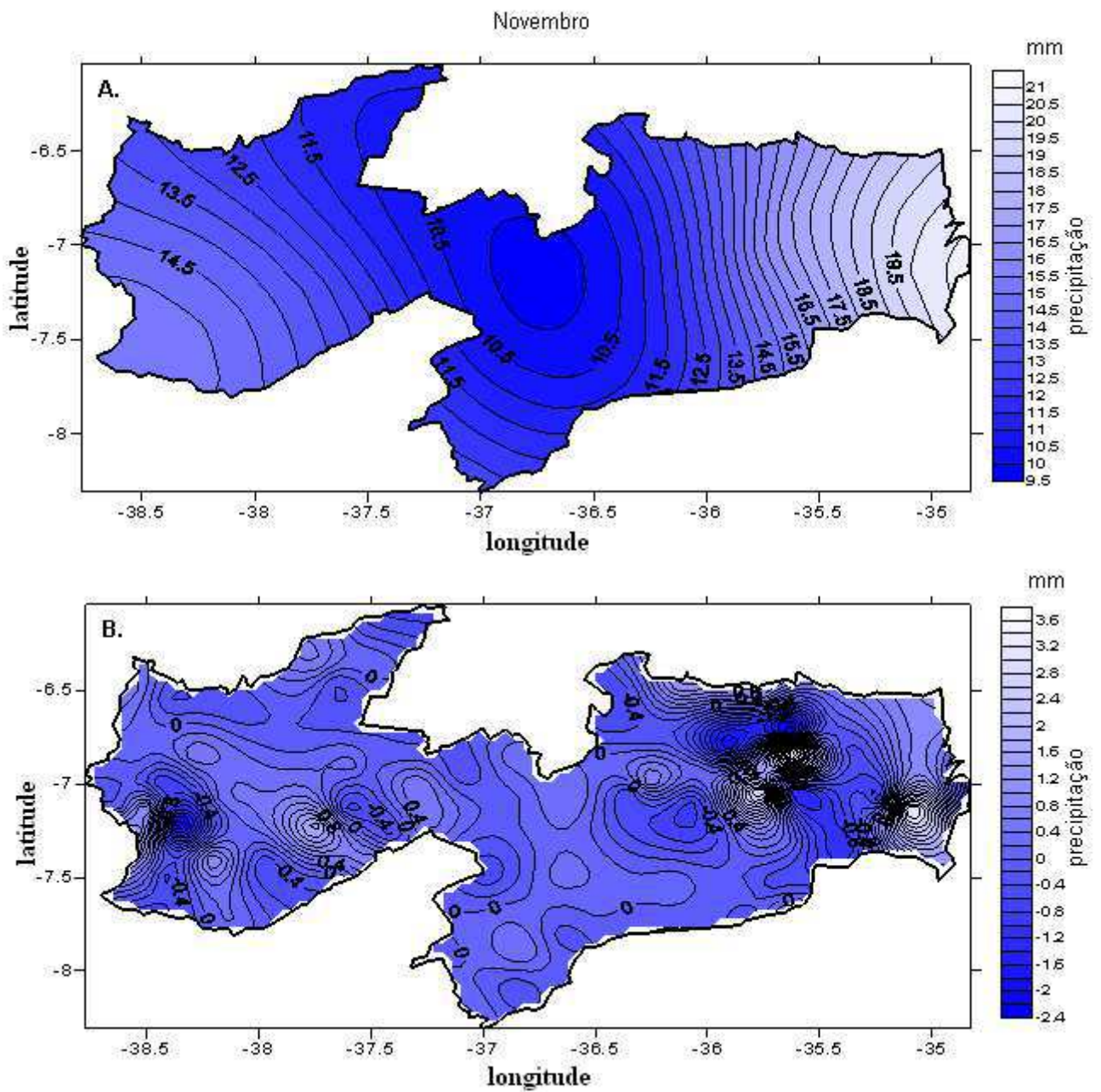


Figura 12: Interpolação por krigagem ordinária dos valores, ajustados pelo modelo (A.) e dos resíduos (B.) das médias mensais da precipitação pluviométrica no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2001.

4.0.25 Vetores da precipitação pluvial média mensal dos meses de janeiro a dezembro

Durante os meses de junho a setembro ocorre forte tendência das chuvas, entre o Litoral e Agreste como mostrado na Tabela 3. Esses vetores mostram o resultado da atuação dos sistemas meteorológicos nessa região, nessa época do ano como: sistemas de leste, Linhas de instabilidade, Brisas Marítimas dentre outros. Na Região do Sertão ocorre forte tendência das chuvas durante os meses de dezembro a abril, influenciadas por outros sistemas meteorológicos que atuam naquela Região como: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtices ciclônicos da Alta Troposfera (VCAS) dentre outros durante esses meses. As Figuras 13 e 14 mostram o mapa de vetores das chuvas em todo território Paraibano durante todo ano.

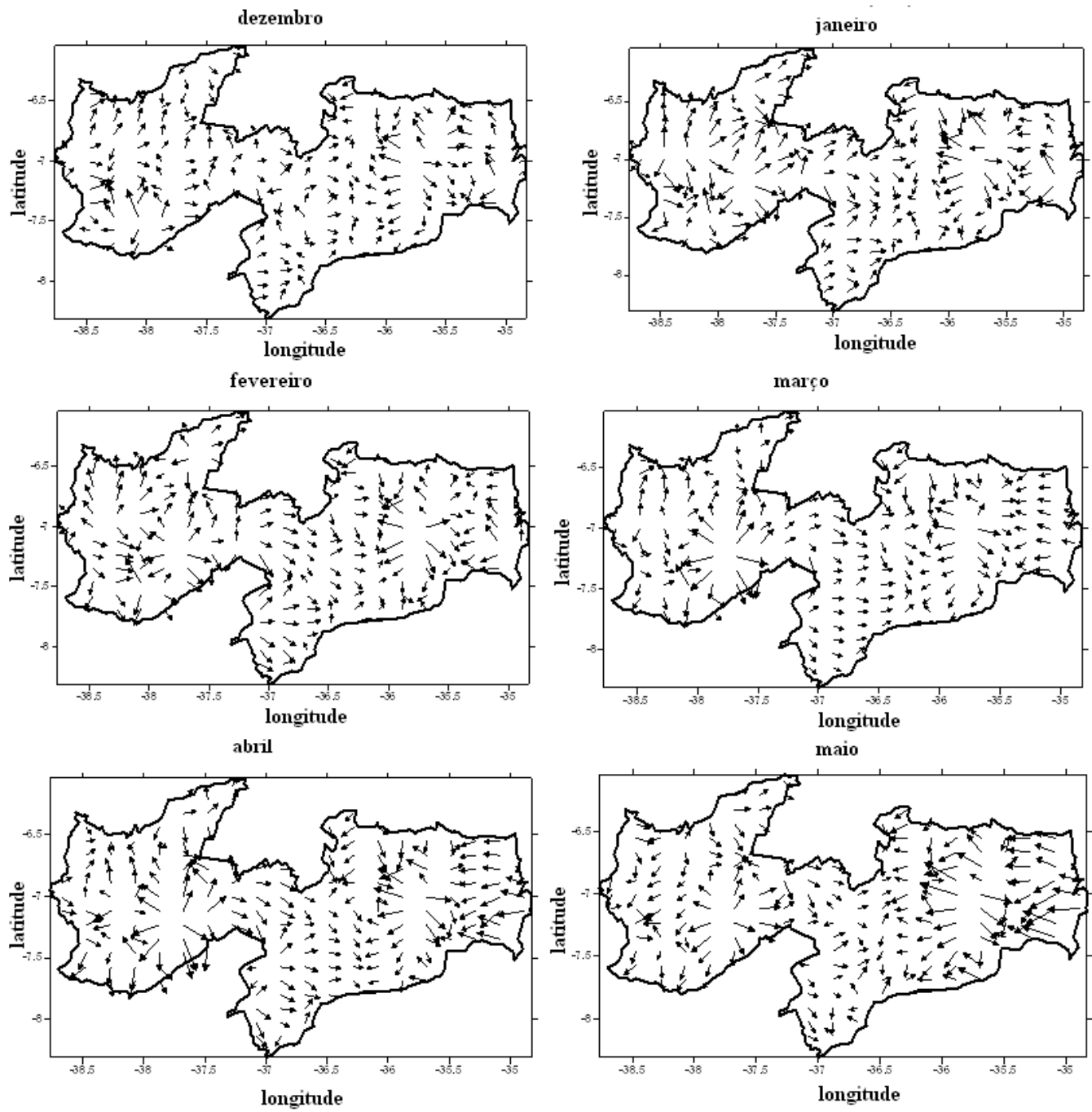


Figura 13: Mapa de vetores da precipitação pluvial dos meses de dezembro a maio no estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)

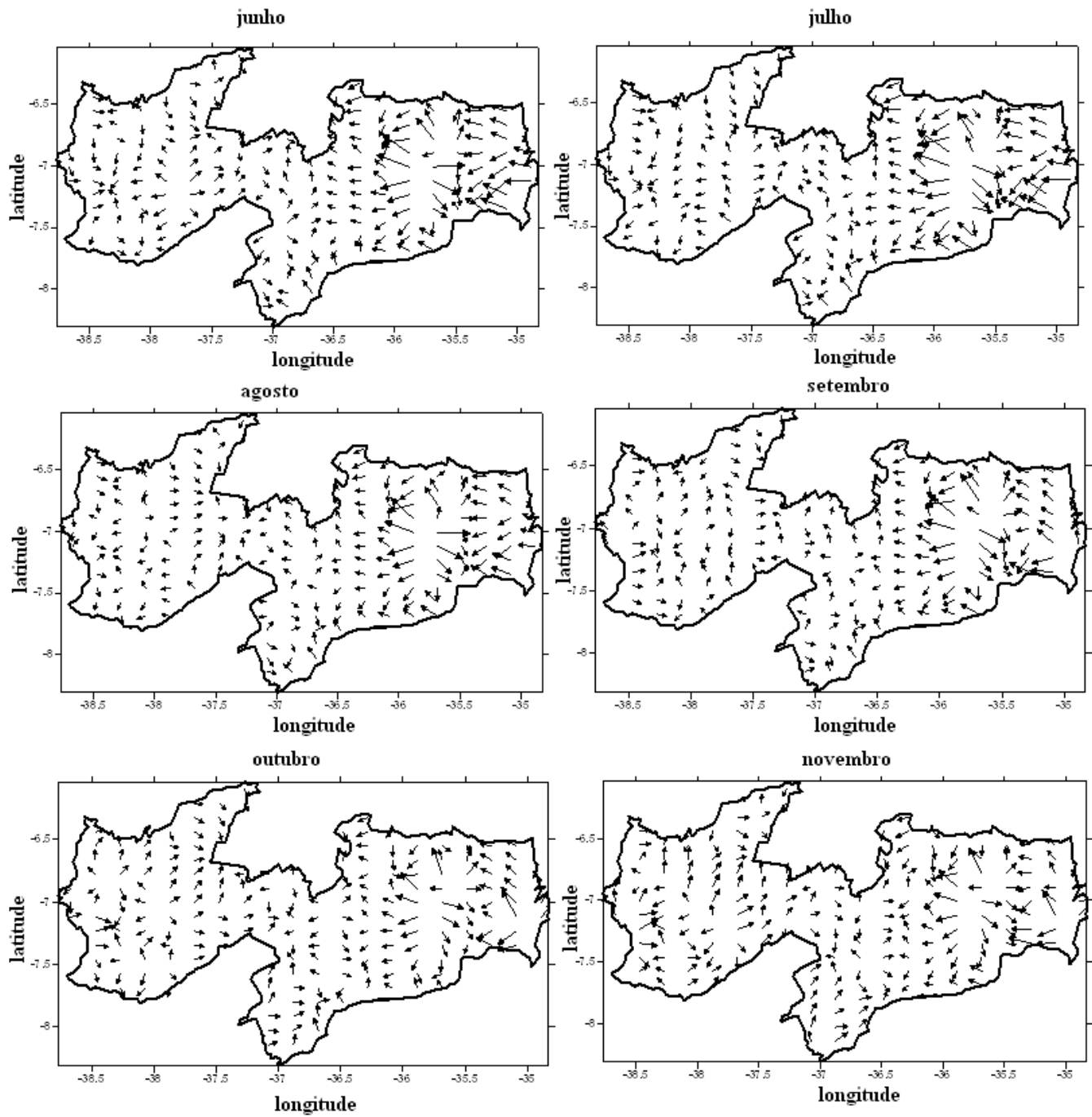


Figura 14: Mapa de vetores da precipitação pluvial dos meses de junho a novembro no estado da Paraíba (período: 1962 a 2001)

4.0.26 Superfície de 4ª ordem da precipitação pluvial média mensal

As Figuras 15, 16, 17 e 18 mostram os mapas dos valores estimados pelo modelo de superfície de 4ª ordem e o dos resíduos para os meses que apresentaram as tendências mais significativas (junho a setembro). Como pode ser visto, as regiões do Litoral e Agreste apresentaram alta variabilidade das chuvas. Nessas regiões, os valores variam de 300mm no mês de junho a 50mm no mês de setembro. O mapa dos resíduos mostra a flutuação da precipitação pluvial em torno da média histórica no período estudado.

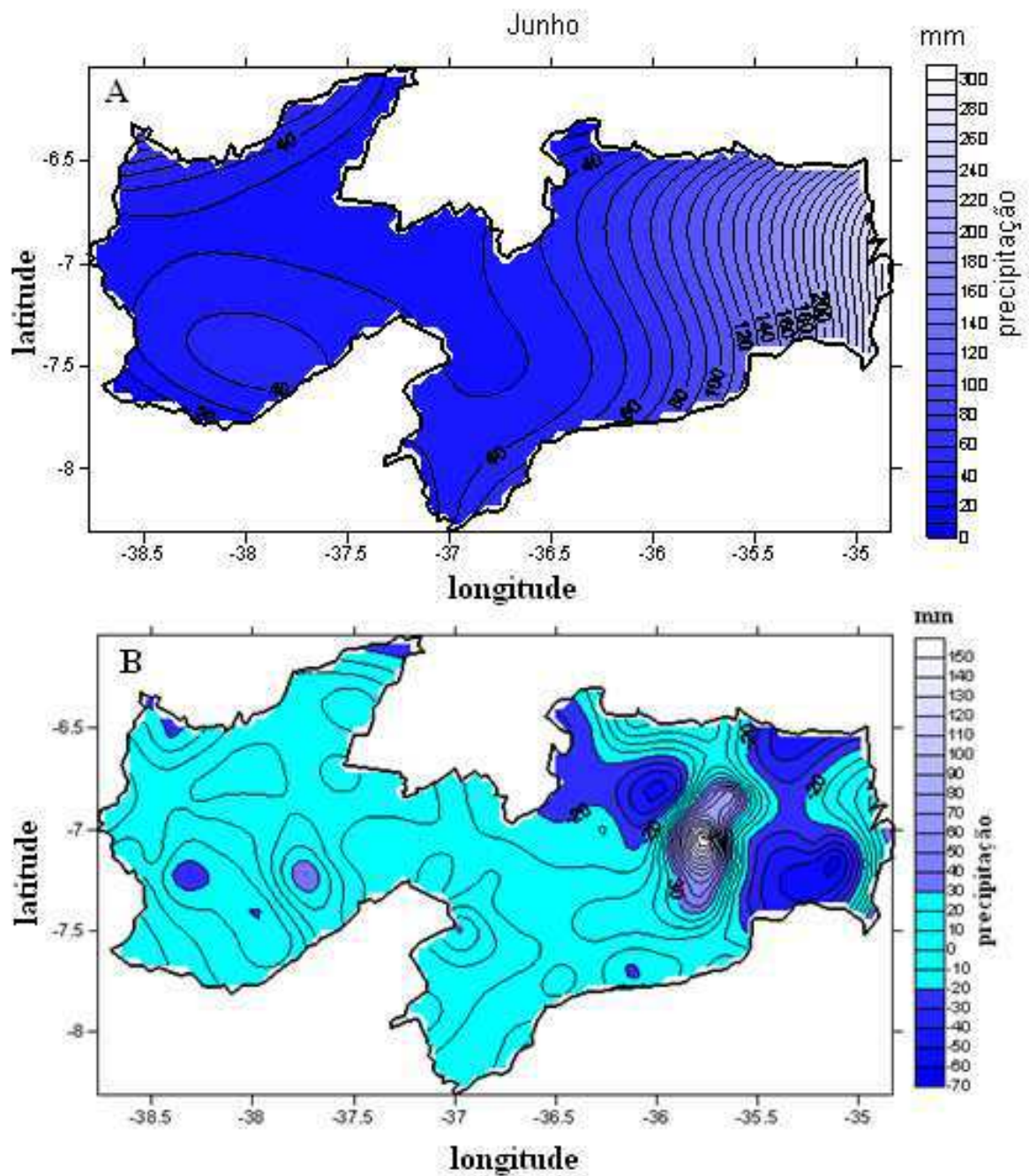


Figura 15: Mapa de superfície de 4º ordem (A) e o mapa dos resíduos (B) da precipitação média mensal do estado da Paraíba do mês de junho (período: 1962 a 2001)

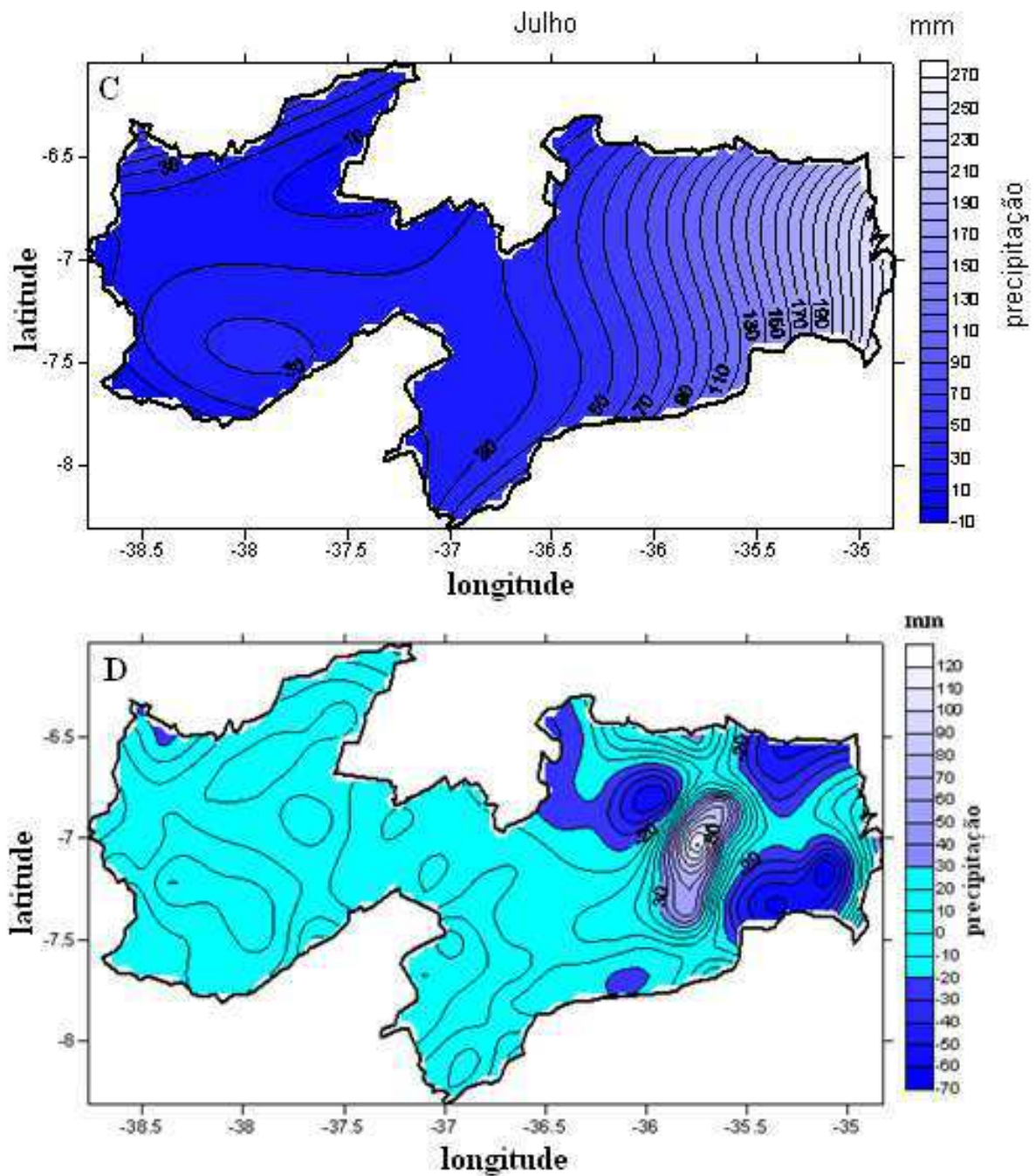


Figura 16: Mapa de superfície de 4º ordem (C) e o mapa dos resíduos (D) da precipitação média mensal do estado da Paraíba do mês de julho (período: 1962 a 2001)

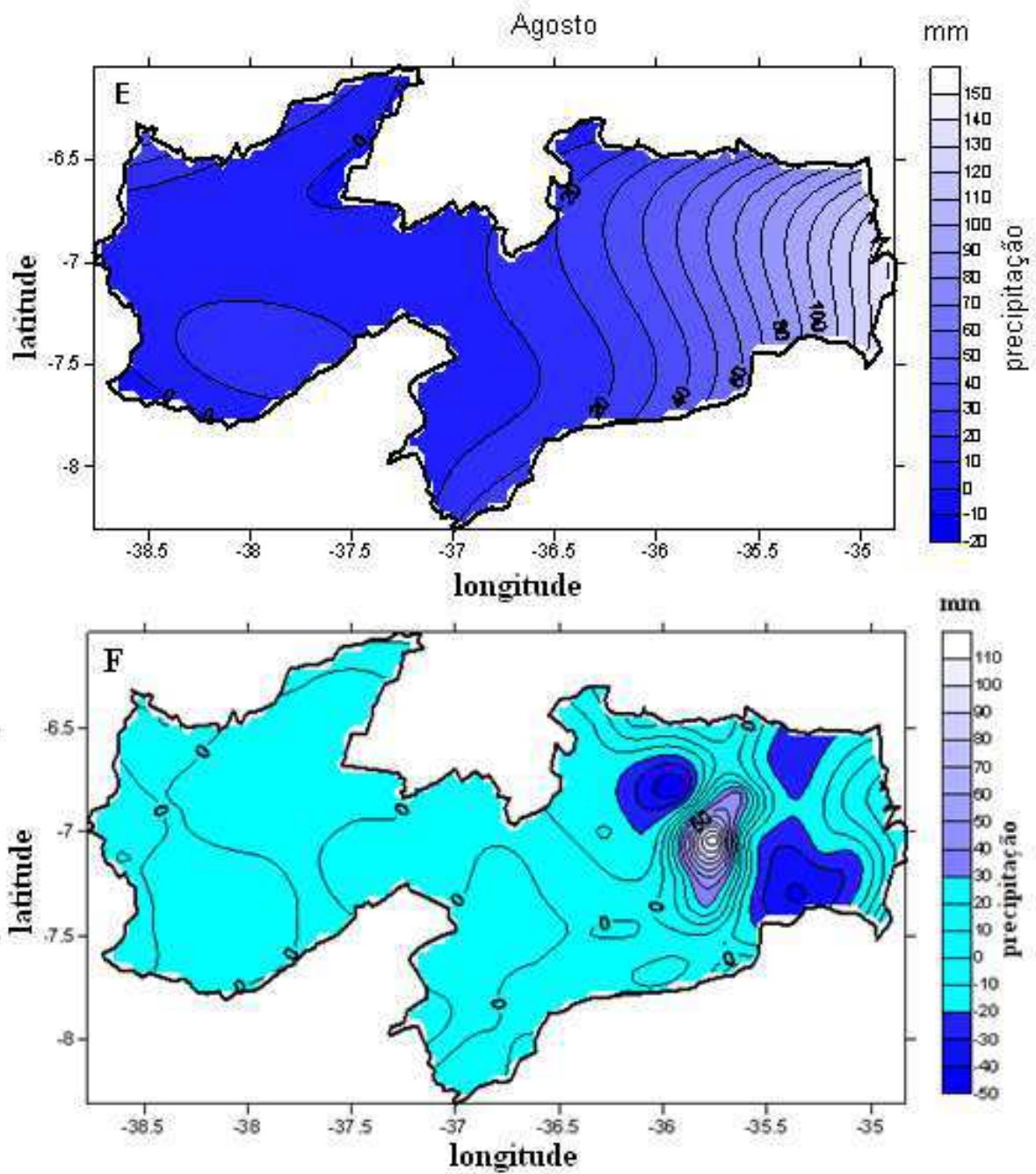


Figura 17: Mapa de superfície de 4º ordem (E) e o mapa dos resíduos (F) da precipitação média mensal do estado da Paraíba do mês de agosto (período: 1962 a 2001)

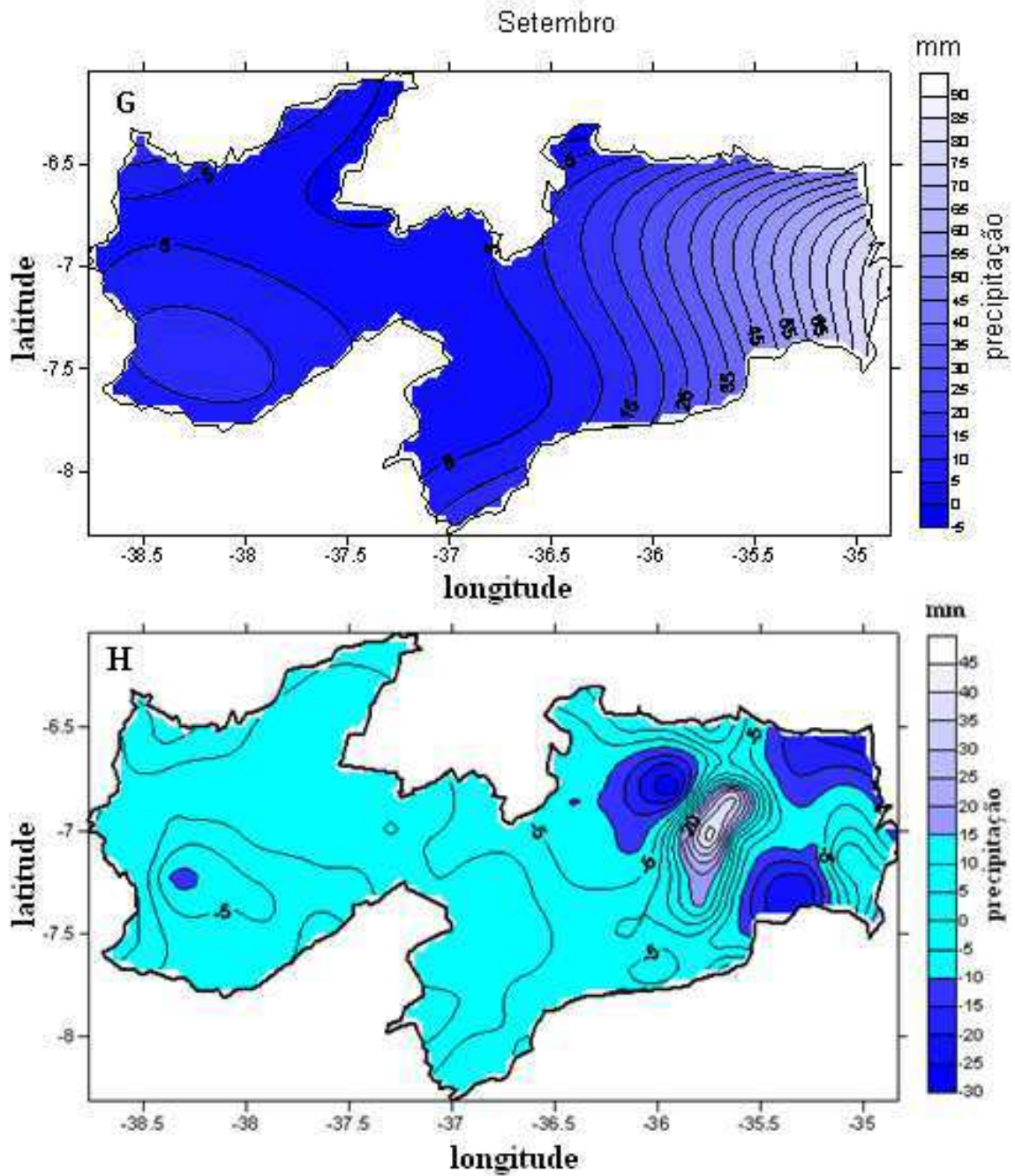


Figura 18: Mapa de superfície de 4º ordem (G) e o mapa dos resíduos (H) da precipitação média mensal do estado da Paraíba do mês de setembro (período: 1962 a 2001)

A Figura 19 mostra a representação gráfica da comparação dos valores observados e estimados pela superfície de 4ª ordem, de acordo com os gráficos os valores estimados se aproximaram muito dos valores observados, isso mostra que os valores estimados pela superfície de 4ª ordem se ajustaram bem aos valores observados. A Figura 20 mostra a representação gráfica dos resíduos da precipitação pluvial entre os valores observados e os estimados pela superfície de 4ª ordem, dos meses de junho a setembro.

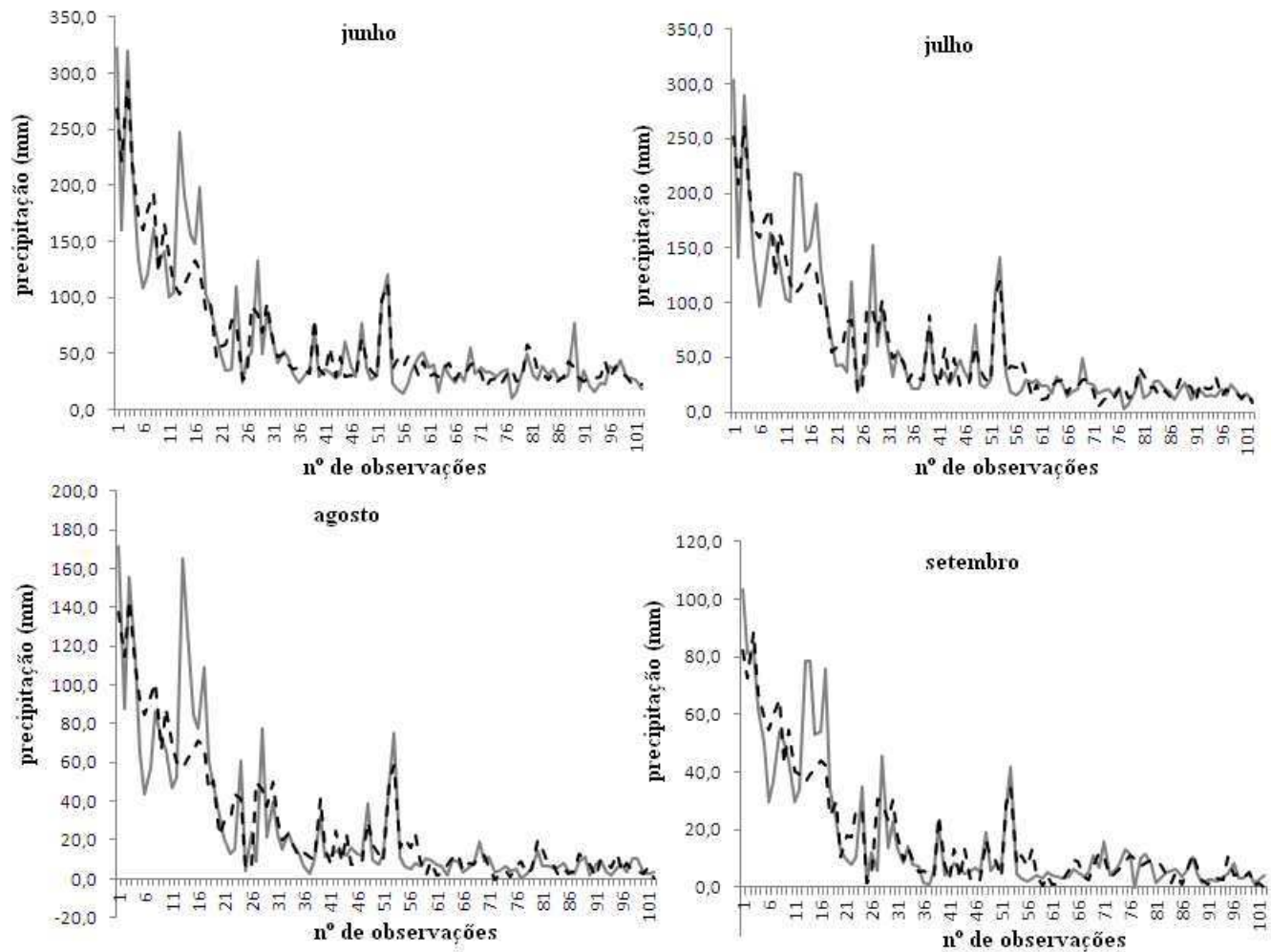


Figura 19: Comparação entre os valores observados e os estimados pela superfície de 4ª ordem (onde a linha cinza corresponde aos valores observados e a linha preta pontilhada os valores estimados).

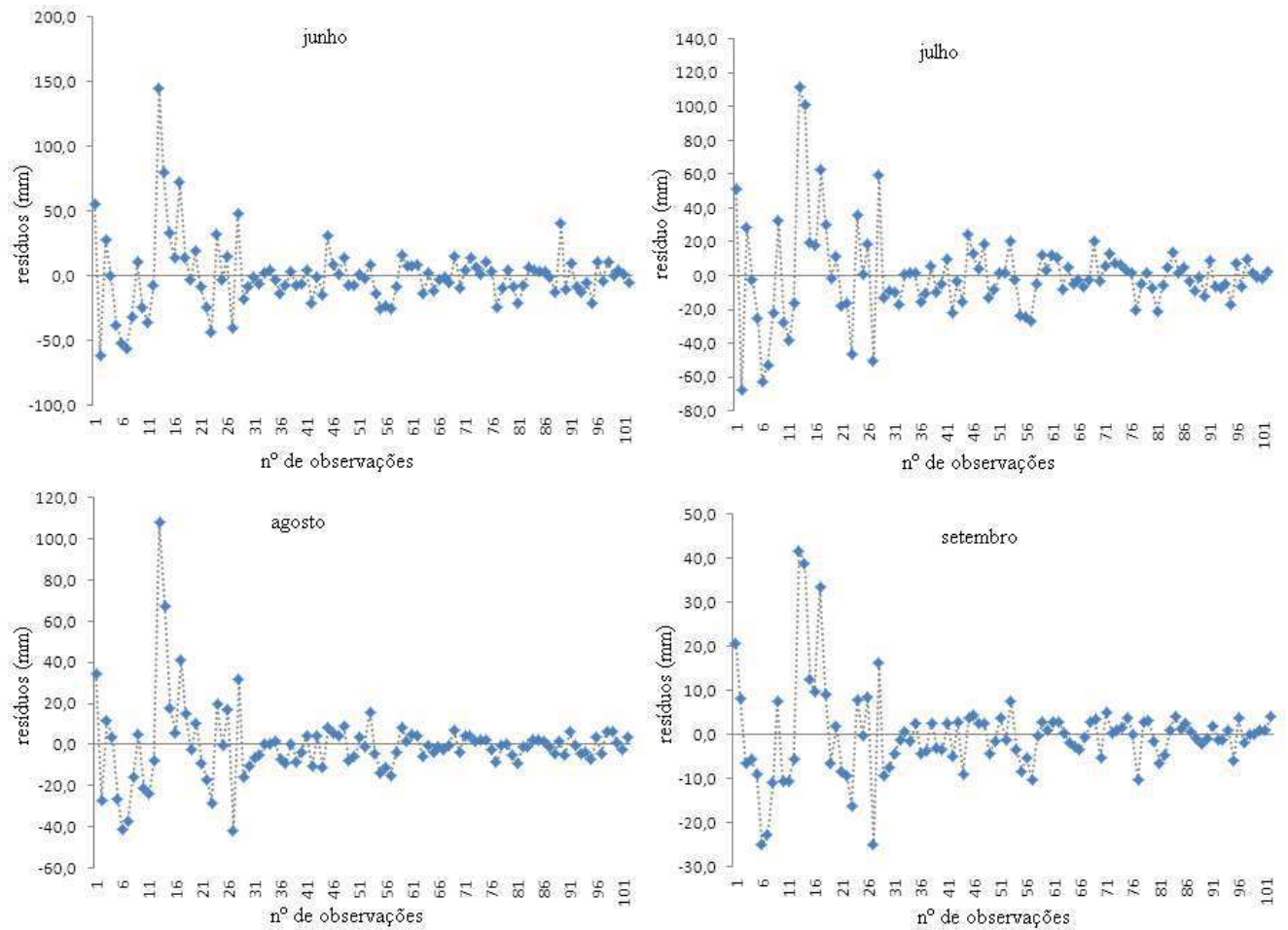


Figura 20: Resíduos das diferenças entre os valores observados e os valores estimados pela superfície de 4º grau das médias mensais da precipitação dos meses de junho a Setembro no Estado da Paraíba no período de 1962 a 2001

De acordo com a Figuras 20 podemos observar que alguns locais não foram bem estimado pelo modelo de superfície, isso se deve a grande variabilidade de chuva na região que vai do Litoral ao Agreste, essa região apresenta um relevo bastante diversificado, constituído de vales e serras favorecendo a formação de nuvens, conseqüentemente, chuvas convectivas, além da influência de Sistema de leste e outros fenômenos meteorológicos que atuam na região em diferentes épocas do ano.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÃO

Após a aplicação da geoestatística para estudar a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial mensal e estimar seus valores em locais com ausência de dados observados. Este trabalho obteve as seguintes conclusões:

A metodologia foi fundamental para analisar a presença de tendências nos dados utilizando o teste de Mann-Kendall e regionalizar a distribuição espacial da precipitação pluvial no estado da Paraíba com boa precisão. Os ajustes dos semivariogramas mostraram tanto o comportamento espacial da variável, quanto o alto grau de dependência espacial da variável (IDE) e o alcance (A_0) correspondente a cada um dos meses analisados. A análise descritiva dos dados foi importante haja vista que facilitou a compreensão numérica do comportamento espacial da variável. O método de interpolação por krigagem ordinária foi importante para a confecção dos mapas: ajustados pelo modelo e dos resíduos. A análise de superfície de tendência foi utilizada para estimar os valores de precipitação e verificar as diferenças entre os valores observados e estimados através dos resíduos. A análise de variância justificou o ajuste da regressão polinomial, de acordo com os resultados, a superfície de quarta ordem foi escolhida por apresentar valores de F calculados maiores do que os tabelados para os níveis de significâncias, $\alpha = 1\%$ e $\alpha = 5\%$. Para reforçar a aceitação desses ajustes os coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 75%.

Os mapas dos vetores identificaram as regiões que apresentaram as maiores tendências de precipitação pluvial. Portanto, a geoestatística revelou-se como uma importante ferramenta para analisar e estimar dados de precipitação pluvial mensal. Como sugestão pode ser utilizada para auxiliar no planejamento e gerenciamento de redes de observações pluviométricas em geral.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. Porto Alegre: Unisinos, 2003. 165p. ISBN 85-7431-171-5.

BLAIN, G. C. Detecção de tendências monótonas em séries mensais de precipitação pluvial do estado São Paulo. **Bragantia**, vol. 69, n.4, pp. 1027 - 1033, 2010.

CAMARGO, E. C. G. **Desenvolvimento, Implementação e teste de procedimentos Geoestatísticos (Krigagem) no Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING)**.1997. 106f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos.

CARVALHO, J, R, P; ASSAD, E, D. Análise Espacial da Precipitação Pluviométrica no Estado de São Paulo: Comparação de Métodos de Interpolação¹, **Revista Engenharia Agrícola**, v.25, n.2, p.377-384, 2005.

DRUCK, S. A Geoestatística e os Sistemas de Informações Geográficas, **Revista Espaço & Geografia**, v.5, n.1, p. 1-15, 2002.

EMIDIO, Z. P. O; LANDIM, P. M. B ANÁLISE DE SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA APLICADA À CHUVA, MEDIDA POR RADAR METEOROLÓGICO, NAS REGIÕES DE ASSIS E PIRACICABA, SP. **Geociências**, v.27, n.4, p. 439 - 449, 2008.

GUERRA, P, A, G. **Geoestatística Operacional**. Departamento Nacional da Produção Mineral, 1988.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to Applied Geoestatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JÚNIOR, J. I. R. **Análises Estatísticas no EXCEL**. Viçosa-MG, 2004. 251p. ISBN 85-7269-175-8.

LANDIM, P. M. B. **Análise Estatística de Dados Geológicos**. São Paulo: Unesp, 2003. 253p. ISBN 85-7139-504-7.

LANDIM, P. M. B., STURARO, J.R. & MONTEIRO, R. C. Krigagem Ordinária para Situações com Tendência Regionalizada. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, **Texto Didático 06**, 12 pp. 2002. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 13 maio. 2011.

LANDIM. P. M. B; CORSI. A. C. Cálculo de superfície de tendência, por regressão polinomial, pelo SURFER 6. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, lab, Geomatemática, **Texto Didático 05**. Rio Claro: UNESP, 11p. 2001. Disponível em <<http://www.solos.ufmt.br/docs/geoestatistica/calctendsurfer.pdf> > Acesso em 03 de Outubro. 2011.

MANFRÉ. L. A et al Análise de superfície de tendência de variáveis de solo como subsídio ao planejamento ambiental de uma bacia hidrográfica rural, **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba - PR, Brasil, 2011.

MATOS, J, D. **Utilização de Semivariogramas Como Redutor de Dimensionalidade no Reconhecimento de Padrões em Imagens Digitais Hiperespectrais**: 2003. 116f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MENEZES, H. E. A et al. A Relação entre a temperatura da superfície dos oceanos tropicais e a duração dos veranicos no estado da Paraíba, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.2, p.152-161, 2007.

NIMER, E. **CLIMATOLOGIA DO BRASIL**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 422p. ISBN 85-240-0282-4.

OLIVEIRA, F.E.M. **Estatística e Probabilidade**. 2^a. ed. São Paulo: Atlas, 1999. 221p. ISBN 85-224-2103-X.

PAIVA. E. C. D; CLAKE. R. T Análise de tendência de precipitação da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.10, p. 37-41, 1995.

PEDROZA, I. C. B. **Estimativa da Climatologia Diária da Precipitação e Investigação de Possíveis Influências das Fases da Lua nas Chuvas no Estado da Paraíba**: 2009. 86f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

RODRIGUEZ, J. L. **Atlas Escolar da Paraíba**, 3ª Edição. João Pessoa-PB: Grafset, 2002. 112p. ISBN 85-85893-05-2.

SALGUEIRO, J, H, P, B; Montenegro, S, M, G, L. Análise da distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Pajeú em Pernambuco segundo método geoestatístico, **Revista Tecnologia**, v.29, n.2, p. 174-185, 2008.

SARTORI. A. A. C, et al. Variabilidade Temporal e Mapeamento dos dados Climáticos de Botucatu-SP, **Revista Irriga**,, v.15,n.2,p.131-139, 2010.

SIEGEL, S; CASTELLAN, N, J, Jr. **ESTATÍSTICA NÃO - PARAMÉTRICA PARA CIÊNCIAS DO COMPORTAMENTO**. Porto Alegre: Artmed, 2006. 448p. ISBN 85-363-0729-3.

SOUZA. G. S, et al. Krigagem Ordinária e Inverso do Quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo, **Revista Scientia Agraria**, v.11, n.1, p.073-081, 2010.

URBAN. R. C et al Análise de superfície de tendência de variáveis de solo prioritariamente urbano, **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba - PR, Brasil, 2011.

YUE, S; PILON, P; CAVADIAS, G. Power of Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series, **Journal of Hydrology**, v.259, n.2002, p.254-271, 2001.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114f. Tese (Livres-Docência em Levantamento do solo e Fotopedologia), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.