

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO POR ANO HIDROLÓGICO NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE: uma abordagem Geoestatística dos quadrimestres mais críticos

*João H. P. de B. Salgueiro*¹; *Suzana M. G. L. Montenegro*² & *Geber B. de A. Moura*³.

RESUMO – Considerando a água um elemento importante à manutenção da vida, e que sua ocorrência no Planeta é função da precipitação, o conhecimento da distribuição espacial e temporal deste fenômeno hidrológico deve ser reconhecido como um recurso imprescindível ao eficiente planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Este artigo investigou o quadrimestre mais úmido e o mais seco por ano hidrológico no Estado do Rio Grande do Norte, em seguida elaborou os mapas das isolinhas que delinearão a distribuição espacial da precipitação nestes períodos críticos. Para isto, utilizou metodologia Geoestatística, especificamente o interpolador kriging, a partir das séries pluviométricas medidas nas bacias hidrográficas do Estado. Espera-se com isso, contribuir com os órgãos gestores em suas ações públicas, no controle dos excessos ou escassez do recurso hídrico, segundo utilização de metodologia de precisão.

ABSTRACT – Water is an important element in the maintenance of life, and its occurrence in the Planet is dependent on rainfall. Thus, the knowledge of its spatial and temporal distribution is of fundamental importance to the efficient planning and management of water resources. This paper aimed to identify the most humid and the most dry four months period (yearly averaged) in *Rio Grande do Norte* state and to complete spatial distribution maps of these variables. The Geostatistic Method together with kriging technique, based on observed rainfall series. The results of the analysis may contribute to public actions on water scarcity and water excess critical situations.

Palavras chaves: Precipitações, distribuição espacial e temporal, geoestatística.

1 Eng. Hidrólogo da CPRM / SGB; Av. Sul, 2291, Afogados, Recife; PE; CEP: 50750-011; E-mail: j.salgueiro@re.cprm.gov.br

2 Prof^o Associado da UFPE; Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n; Recife; PE; Brasil; CEP: 50670-901; E-mail: suzanam@ufpe.br

3 Prof^o Adjunto da UFRPE; Av. Dom Manuel de Medeiros s/n; CEP 52171-900; E-mail: geber@ufrpe.br

INTRODUÇÃO

A água é um bem indispensável à manutenção da vida na Terra e a sua circulação ocorre sob um processo natural conhecido como ciclo hidrológico. A precipitação é a fase desse ciclo responsável pelo transporte das águas da atmosfera à superfície terrestre. O conhecimento da sua variabilidade espacial e temporal sobre as regiões, ou bacias hidrográficas, deve ser entendido como um recurso imprescindível ao eficiente planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

No caso da escassez prolongada, geralmente imposta pelas longas estiagens, ou pelos baixos registros pluviométricos, os órgãos gestores têm recorrido às ações prioritárias que visam a mitigação do cenário, utilizando medidas alternativas de suprimentos, algumas vezes em avançados estágios de emergências ou calamidades, principalmente nos locais onde o clima é seco. Por outro lado, os excessos dos volumes precipitados, historicamente revelam situações de sinistros, com constatações de graves prejuízos à vida da população e ao patrimônio público e privado. Neste segundo caso, os órgãos responsáveis pelas defesas civis devem ser acionados em tempo hábil, para assim garantir a segurança da população e a integridade física destes patrimônios.

Por tratar de um fenômeno natural aleatório, a distribuição espacial e temporal da precipitação não se repete exatamente a cada período anual sob o aspecto quantitativo e cronológico, embora aponte com certo grau de certeza, os locais onde e quando será mais provável que se espere que chova mais ou menos. Além disso, os locais onde ocorrem as disponibilidades hídricas nem sempre coincide com os locais que no momento demandam os maiores consumos.

Para isto, a Engenharia Hidrológica desenvolve modelos que visam otimizar as tomadas de decisão para o controle mais eficaz do manejo hídrico. Sendo assim, estes conhecimentos passam então a constituírem uma ferramenta importante, desde que utilizada séries pluviométricas com qualidades, densidades de rede que atendam adequadamente aos limites satisfatórios, métodos de interpolação de precisão comprovada e, finalmente, uso de programas computacionais avançados.

Diante deste contexto, esta pesquisa identificou os quadrimestres mais úmidos e mais secos por ano hidrológico utilizando a precipitação média de longo período, no Estado do Rio Grande do Norte, partindo de séries pluviométricas medidas nas bacias hidrográficas que formam o Estado. Em seguida, foram elaborados em mapas com isolinhas, a distribuição espacial das precipitações quadrimestrais que justificaram estes períodos críticos, utilizando interpolador geoestatístico.

Espera-se com isto, contribuir com os órgãos gestores do Estado e dos Municípios do Rio Grande do Norte em suas ações públicas, no tocante ao controle do excesso ou escassez do recurso hídrico, segundo metodologia de acurácia comprovada.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A geoestatística dispõe de interpoladores eficientes capazes de estimar valores de variáveis em pontos que não foram amostrados. Pode então consagrar-se uma ferramenta poderosa para mapear com segurança as superfícies interpoladas, uma vez que permite conhecer os resíduos dos erros. A sua aplicação pode ser de grande valia, desde que as variáveis utilizadas satisfaçam às condições que determinam uma “variável regionalizada”, e que entre outras exigências, tenham também uma estacionaridade estatística de segunda ordem e dependência espacial entre os pontos medidos, inferida através de semivariogramas. A função denominada semivariograma, estima a dependência espacial através do modelo experimental da expressão (1):

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (1)$$

Onde $\gamma^*(h)$ caracteriza a dependência espacial, $Z(\chi_i)$, $Z(\chi_i + h)$ são pares de valores medidos em locais afastados entre si da distância “ h ” e $N(h)$ é o número desses pares para cada “ h ”. Os valores das diferenças $Z(\chi_i) - Z(\chi_i + h)$ em geral decrescem à medida que a distância “ h ” diminui. A figura 1 apresenta o modelo geral de um semivariograma.

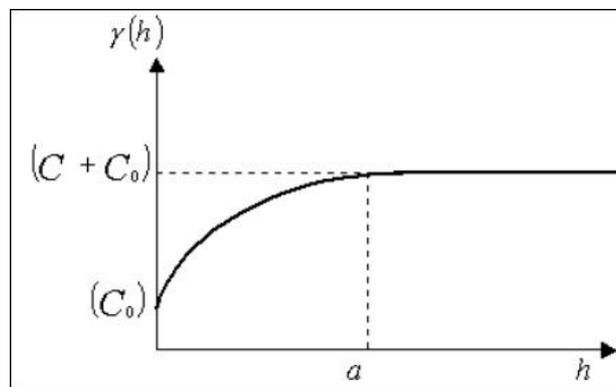


Figura 1 - Modelo de semivariograma.

Assim, $\gamma^*(h)$ aumenta com “ h ” e se anula quando $h = 0$, conforme a expressão (1). Entretanto, quando “ h ” tende para zero, $\gamma^*(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado “efeito pepita” (C_0). Este valor revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras, e pode ser atribuído em parte aos erros de medição ou efeitos de escala. O crescimento do $\gamma^*(h)$ em função de “ h ” ocorre até um certo limite máximo no qual se estabiliza tomando a denominação de “patamar” ($C + C_0$). Essa distância “ h ” pela qual $\gamma^*(h)$ atinge o patamar é o alcance (a), o qual assume a distância limite de dependência espacial.

A variabilidade espacial, caracterizada através do semivariograma, pode ser classificada com relação à dependência espacial em três níveis, a partir da relação especificada na equação (2), de acordo com os seus graus de dependência espacial. Esta expressão pode resultar em valores percentuais inferiores a 25%, entre 25 e 75% e superiores a 75%, para “r”. Estes intervalos enquadram os semivariogramas nas classificações de forte, moderada e fraca dependência espacial, conforme Cambardella *et al.* (1994).

$$r = \left[\frac{C_0}{C + C_0} \right] \times 100 \% \quad (2)$$

O semivariograma é chamado isotrópico quando é idêntico em todas as direções e anisotrópico quando há variações de comportamento em diferentes direções. Também é dito experimental, quando obtido a partir das amostras colhidas no campo, e teórico, após o ajuste do semivariograma experimental a um modelo. Os teóricos mais usados são os modelos esférico, exponencial e gaussiano. Para definição do ajuste do modelo teórico a ser usado torna-se necessário que vários modelos sejam testados. Para a escolha do melhor semivariograma teórico é preciso que todos os erros sejam avaliados, em processo denominado validação cruzada, conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Critérios para escolha do semivariograma teórico através da validação cruzada

Estimativas de erros	Valores ideais
Erro médio	Valores pequenos
Erro médio quadrático	Valores pequenos e próximos dos erros padrões médios
Erro padrão médio	Valores pequenos e próximos dos erros médios quadráticos
Erro médio normalizado	Valores próximos de 0 (zero)
Erro médio quadrático normalizado	Valores próximos de 1 (um)

No caso de amostra que apresente tendência espacial, esta pode ser representada por uma expressão matemática e ser removida dos dados. Após a remoção, a análise geoestatística é efetuada nos resíduos. Após a análise, a tendência é novamente adicionada aos dados para o seu mapeamento. O detalhamento deste processo pode ser encontrado em Johnston *et al.* (2001).

A krigagem é um método de interpolação geoestatística utilizado para estimar valores distribuídos no espaço a partir de valores adjacentes, enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma. Sua utilização serve para previsão de uma variável regionalizada dentro de um determinado campo geométrico, através de um procedimento exato de interpolação que leva em conta todos os valores observados. O método fornece além dos valores estimados o erro associado a tal estimação, o que o distingue das demais metodologias de interpolação. O método kriging poderá ser usado também em sua forma de extensão, sob a denominação de co-kriging. Este interpolador

tem a capacidade de associar simultaneamente outras variáveis à variável principal, para serem estimadas, desde que confirmem suas dependências espaciais.

Vieira (2000) afirma que as informações a partir do semivariograma são usadas para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras. O método utiliza também a dependência espacial entre os pontos vizinhos expressos no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Essas duas últimas características fazem de kriging um interpolador ótimo. Trata-se de uma série de técnicas de análises de regressão que procuram minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio que leva em conta a dependência espacial entre os dados distribuídos no espaço.

A krigagem pode ser dividida em ordinária, simples e universal. Na krigagem ordinária, a estimativa de uma variável regionalizada pode ser efetuada sem o conhecimento da média. A expressão (3) define matematicamente este interpolador:

$$Z^*(\chi_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(X_i), \text{ com } \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (3)$$

Onde:

$Z^*(\chi_0)$ são valores estimados para qualquer local χ_0 ;

N é o número de valores medidos;

λ_i são os pesos associados a cada valor medido, $Z(X_i)$.

REVISÃO DA LITERATURA

Oliveira & Chaudrhy (1995) abordaram o problema da estimativa de isoietas com base em dados pluviométricos utilizando os métodos geoestatísticos de kriging e co-kriging. A partir desta abordagem foi possível comparar estes métodos, considerando efeito orográfico na precipitação da Bacia do Rio Camanducáia em São Paulo, local onde se desenvolveu o trabalho. A influência orográfica foi detectada através de um estudo preliminar que envolveu a dependência da precipitação em relação às altitudes dos postos selecionados

Ferreira Filho *et al.* (2000) aplicaram a metodologia kriging à rede pluviométrica do Estado do Ceará. Para isso foi necessário dividirem a área do Estado em três partes, quer sejam: Serra do Ibiapava, Litoral e Interior. Os autores enfatizaram a importância da precipitação como variável necessária ao estudo dos recursos hídricos, ressaltando que para o efetivo monitoramento dessa variável seriam imprescindíveis a instalação, operação e manutenção dos pluviômetros.

Gomes & Silans (2000), considerando que a precipitação nas bacias hidrográficas do Nordeste do Brasil apresenta uma grande variabilidade espacial, investigaram o efeito desta variabilidade

sobre o cálculo da precipitação média na Bacia do Rio Gramame, localizada no Litoral paraibano, onde a densidade de pluviômetros é bastante elevada. Os autores tiveram como objetivo comparar o cálculo do valor médio da precipitação com diversos métodos, sendo esses: o método dos polígonos de Thiessen; o método da interpolação pelo inverso do quadrado da distância; o método de Shepard e o método da krigagem ordinária. Entre outras conclusões importantes, destacaram que desde 1911, o método clássico de Thiessen estima bem a precipitação média, entretanto os resultados mostram que erros significativos poderão surgir em algumas bacias. A bacia do rio Gramame foi considerada exemplar por dispor de uma rede pluviométrica bastante densa.

Almeida *et al.* (2004) efetuaram análise da variabilidade espacial da precipitação anual média na Bacia do Rio Ipanema em Pernambuco utilizando metodologia geoestatística. Foi incluído também na avaliação o processo de formação de chuvas visto através da distribuição espacial dos coeficientes de irregularidade. Os autores afirmaram que a geoestatística se revela uma forte ferramenta de análise espacial, que ainda permite a compreensão e distribuição de confiabilidade, do processo de espacialização da variável.

Salgueiro & Montenegro (2004) analisaram a variabilidade espacial da precipitação média e seus padrões de ocorrências na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco. Os autores utilizaram para análise a metodologia geoestatística de krigagem ordinária. As precipitações médias e os coeficientes de irregularidade meteorológica foram mapeados através das isolinhas, identificando as maiores ocorrências de precipitações e os tipos frontais, convectivos e orográficos. O processo foi considerado anisotrópico e os erros de estimativas para as duas variáveis foram calculados.

Salgueiro *et al.* (2006) comprovaram o atual conhecimento sobre o comportamento pluviométrico em Pernambuco através da análise da variabilidade espacial das precipitações máximas e seus padrões frontais, orográficos e convectivos em relação aos diversos patamares altimétricos do Estado, como a Baixada litorânea, o Planalto da Borborema e a Depressão sertaneja. Para isto, utilizaram as séries pluviométricas da Rede Hidroclimática da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE e o interpolador Geoestatístico kriging. O método forneceu os mapas de isolinhas e as estimativas de erros resultantes das interpolações.

Salgueiro *et al.* (2008) destacaram a bacia do rio Capibaribe entre as demais de Pernambuco pela necessidade de um controle mais contínuo dos níveis dos seus rios, devido as grandes variações sazonais e suas consequências danosas. Foi então analisado a distribuição espacial da precipitação média e seus tipos de ocorrências, nos diversos patamares altimétricos da bacia, utilizando metodologia geoestatística e imagem de radar. Foram utilizados os dados da Rede Pluviométrica da SUDENE. Os resultados comprovaram, através de método de precisão, os conhecimentos contidos no Plano Estadual de Recursos Hídricos e outros documentos.

Salgueiro & Montenegro (2008), considerando a importância da água e a necessidade de se conhecer os locais de suas maiores ocorrências, para o eficiente gerenciamento dos recursos hídricos, analisaram a distribuição espacial da precipitação média na bacia do rio Pajeú em Pernambuco. Para isto, utilizaram o método geostatístico de krigagem, a partir das séries pluviométricas na bacia. Confeccionados os mapas de interpolação e estimativas de erros, as conclusões confirmaram a suficiente precisão apresentada pelo interpolador kriging, a influência das altitudes em relação aos valores precipitados e o conhecimento climático do Estado de Pernambuco.

ÁREA DE ESTUDO

Localização e caracterizações

O Estado do Rio Grande do Norte fica localizado no Nordeste do Brasil e corresponde a uma área de 52.796.791 km², a qual comporta uma população de 3.013.740 habitantes, recenseada e estimada segundo os municípios no ano 2007, conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2009). A situação limítrofe é definida do seguinte modo: ao norte e leste encontra-se a região costeira banhada pelo oceano Atlântico, ao oeste o Estado do Ceará e ao sul o Estado da Paraíba. A divisão político-administrativa compõe-se de 167 municípios, sendo a cidade de Natal a capital potiguar. A divisão geográfica é formada por quatro Mesorregiões e dezenove Microrregiões. As figuras 2 e 3 apresentam a localização do Estado do Rio Grande do Norte.



Figura 2 – Localização do Estado do Rio Grande do Norte em relação ao Brasil.

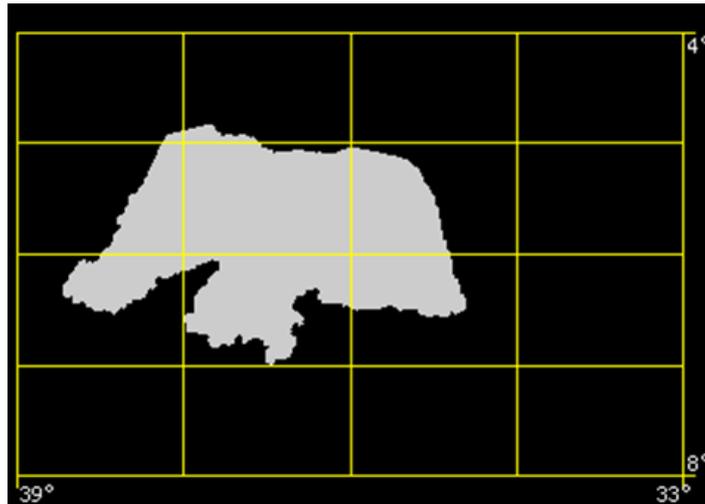


Figura 3 – localização georeferenciada do Estado do Rio Grande do Norte (Embrapa, 2009).

Economicamente o Estado do Rio Grande do Norte se destaca na produção agropecuária e exploração mineral, onde a extração e processamento do petróleo e sal marinho são as principais atividades. O Índice de desenvolvimento Humano – IDH é de 0,738 em 2005, considerado médio, e 23% da população ainda permanece no analfabetismo, segundo (IDEMA, 2009).

Dividido em planície litorânea, com depressão na maior parte, e planaltos ao sul, o relevo é considerado modesto. Mais de 80% do território fica abaixo de 300 m de altitude, chegando a ultrapassar 800 m na Serra do Coqueiro, ponto culminante do Estado, como mostra a figura 4.

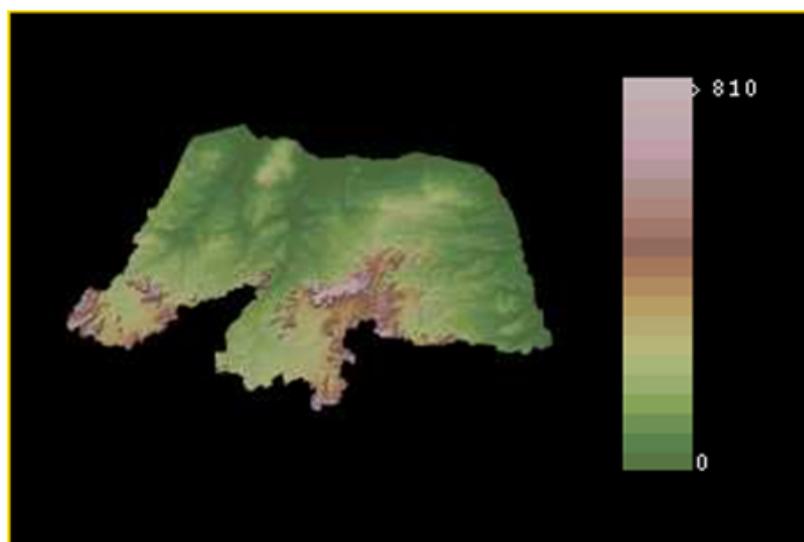


Figura 4 – Altitude em metros do relevo do Rio Grande do Norte (Embrapa, 2009).

É possível encontrar ecossistemas de manguezais, floresta tropical e caatinga. No litoral e na porção oeste, o clima é tropical, enquanto no centro predomina o semi-árido. Entre outros sistemas atmosféricos produtores de chuvas, atuantes na região Nordeste, pode-se destacar as frentes frias, os sistemas vindo do leste e a zona de convergência intertropical, responsáveis pela maior parte das chuvas na região do semi-árido.

Do ponto de vista hidrográfico, o Estado do Rio Grande do Norte é formado por dezesseis bacias hidrográficas, são elas: 01 - Apodi-Mossoró, 2 - Piranhas-Assu, 3 - Boqueirão, 04 – Punaú, 05 – Maxaranguape, 06 – Ceará Mirim, 07 – Doce, 08 – Potengi, 09 – Pirangi, 10 - Trairi, 11 – Jacu, 12 - Catu, 13 - Curumatau, 14 – Guaju, 15 – Faixa litorânea norte de escoamento difuso, 16 - Faixa litorânea leste de escoamento difuso.

Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte - PERH-RN (1999), o Estado apresenta condições de oferta natural de água desfavoráveis, decorrentes da associação de um regime pluviométrico irregular com um meio físico, que dificulta a existência de disponibilidade hídrica. Além disso, há que se considerar a crescente demanda hídrica a ser ainda incrementada com os programas de irrigação atualmente em fase de estímulo, que certamente agravará os conflitos de mobilização e uso d'água.

MATERIAIS E MÉTODOS

Seleção das estações pluviométricas e formação do banco de dados

O banco de dados pluviométricos utilizado nesta pesquisa teve como base duas fontes de informações: as séries históricas produzidas pela Rede Hidrometeorológica Básica Nacional e as séries históricas produzidas pela Rede Pluviométrica do Estado do Rio Grande do Norte.

A Rede Hidrometeorológica Básica Nacional é operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (Serviço geológico do Brasil) em parceria entre a Agência Nacional de Águas – ANA, com finalidade de gerar e armazenar dados hidrológicos no Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos - SINRH disponível a qualquer usuário, atendendo a Lei 9.433 que trata da Política Nacional de Recursos Hídricos no Brasil. A CPRM é uma Empresa Pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia – MME.

A Rede Estadual é operada pelo Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN. Com o apoio do Centro de Previsão do Tempo e Clima - CPTEC e outras instituições internacionais, a previsão climática do Estado é realizada através de modelos oceânicos e atmosféricos globais. A EMPARN é uma Empresa Pública vinculada à Secretaria da Agricultura, da Pecuária e da Pesca do Estado do Rio Grande do Norte – SAPE-RN.

A CPRM monitora 25 estações no Estado do Rio Grande do Norte, das quais 16 foram selecionadas, por serem as mais antigas em operação, com período de observação compreendido entre os anos de 1977 a 2006, intervalo escolhido para a pesquisa. As séries foram adquiridas no aplicativo *Hidroweb*, à disposição no site da ANA, totalmente consistidas em programa computacional *Hidroplu*.

A EMPARN monitora 180 estações, das quais 79 foram escolhidas. Como critério seletivo priorizou-se a qualidade das séries e a extensão dos períodos de observação. Em seguida, selecionaram-se as estações cujas localizações preencheram áreas não cobertas pela Rede Hidrometeorológica Básica Nacional, determinando com isso a melhor configuração espacial possível, além de aperfeiçoar a densidade pluviométrica do Estado.

A Organização Mundial de Meteorologia – OMM em sua publicação WMO (1984), afirma que o objetivo de uma rede é permitir a interpolação entre os dados provenientes de estações distintas, a fim de determinar com suficiente precisão para fins práticos, as características desses elementos hidrológicos em qualquer lugar da região, com quantidades suficientes para definir a distribuição estatística do elemento em estudo.

Por este motivo a mesma organização recomendou os limites de densidades mínimas para três categorias fisiográficas diferentes, podendo o Estado do Rio Grande do Norte integrar-se a primeira delas, como sendo uma região plana de zona temperada, mediterrânea e tropical, cujo limite superior de densidade pode variar de 600 a 900 km² por estação. Para avaliação da densidade pluviométrica foram utilizados a área de 52.796.791 km² e o total de 95 estações selecionadas. Para visualização da configuração espacial da rede definida foi confeccionado, em *ArcGis 9.2* e coordenadas geográficas, um mapa contendo a localização de cada estação.

Determinação dos quadrimestres críticos

Os quadrimestres críticos compreendem os quatro meses consecutivos mais chuvosos do ano e os quatro meses consecutivos mais secos, ou seja, com baixa pluviosidade. Estes períodos poderão ser considerados de riscos, tanto nos meses de abundância hídrica como nos meses caracterizados pelas estiagens. Para definições de tais períodos partiu-se para investigação das frequências de ocorrência das precipitações nas séries históricas, em cada estação pluviométrica operada no Estado.

Através dos somatórios dos dados diários ficaram conhecidos os totais mensais para cada estação e as médias mensais para todos os anos do período estabelecido. Em seguida calcularam-se as médias gerais de todas as estações distribuídas espacialmente para cada mês de observação. Para a identificação dos períodos críticos foi elaborado um gráfico de blocos representando os intervalos quadrimestrais segundo valores mensais acumulados em cada intervalo testado utilizando o período

de 1977 a 2006 e o ano hidrológico, com início em outubro e término em setembro. A partir daí foi possível identificar os quadrimestres mais úmidos e mais secos.

Análise estatística das variáveis

Dispondo dos recursos oferecidos pelo *ArcGis 9.2*, foi testado o ajuste da distribuição de frequências à distribuição normal e log-normal para cada variável, sendo a seleção do melhor ajuste feita por análise visual, a qual resultou na transformação log-normal para os dois quadrimestre: o mais úmido e o mais seco. Esse teste do ajuste à distribuição normal, ou sua transformação logarítmica, é necessário quando se pretende aplicar metodologia geoestatística segundo Johnston *et al.* (2001). As opções dos ajustes às distribuições de frequência escolhidas foram apresentadas sob forma de histogramas. Em seguida foram determinados os valores das tendências centrais e outros parâmetros estatísticos importantes à análise.

Análise de tendência das variáveis

As análises das tendências espaciais das duas variáveis foram também realizadas com recursos oferecidos pelo *ArcGis 9.2*. A elaboração de gráficos tridimensionais para análise dos comportamentos espaciais foi a ferramenta principal para decisão. Durante as análises observaram-se tendências nas duas variáveis. As fortes semelhanças com as funções parabólicas descritas nos planos tridimensionais indicaram em primeira instância de se tratar de tendência de segundo grau. Isto não impediu que as outras tendências fossem testadas. Os valores dos erros resultantes das validações cruzadas foram os indicadores da necessidade de remoção destas tendências na estrutura de correlação espacial.

Análise da distribuição espacial da precipitação média nos quadrimestres críticos

Determinado os quadrimestres críticos coube agora investigar os locais onde se distribui as maiores chuvas anuais responsáveis pelo período chuvoso, assim como, as poucas chuvas que caracterizam o período seco no Estado do Rio Grande do Norte.

Sendo assim, partiu-se para elaboração do mapeamento dos quadrimestres mais úmido e mais seco, interpolando as suas precipitações representativas sob forma de isolinhas, utilizando o método geoestatístico de krigagem ordinária, a partir das inferências de suas estruturas de correlação espacial. Em seguida foram mapeados também os erros de estimativas resultantes destas interpolações, como também foram elaborados gráficos contendo regressões lineares dos pontos medidos e estimados durante as interpolações das duas variáveis.

Para isso, as duas variáveis tiveram seus semivariogramas experimentais testados, a partir dos ajustamentos aos semivariogramas esférico, exponencial e gaussiano, tendo o modelo esférico

apresentado os melhores ajustes para as duas situações. A avaliação dos erros resultantes das validações cruzadas foi o critério da escolha. Os graus de dependência espacial das variáveis foram analisados segundo Cambardella *et al.* (1994). A direção dos sistemas meteorológicos produtores de chuvas no Estado do Rio Grande do Norte, em relação à estrutura de correlação espacial, também foi investigada durante as validações cruzadas, através da realização de processos anisotrópicos. As informações referentes à aplicação da metodologia constituíram o relatório de parâmetros e validação cruzada.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação da densidade pluviométrica teve resultado favorável uma vez que o valor obtido foi inferior ao limite mínimo recomendado pela OMM, ou seja, 555,75 km² por estação. A figura 5 apresenta o esboço da configuração espacial da rede da CPRM e EMPARN em operação simultânea.

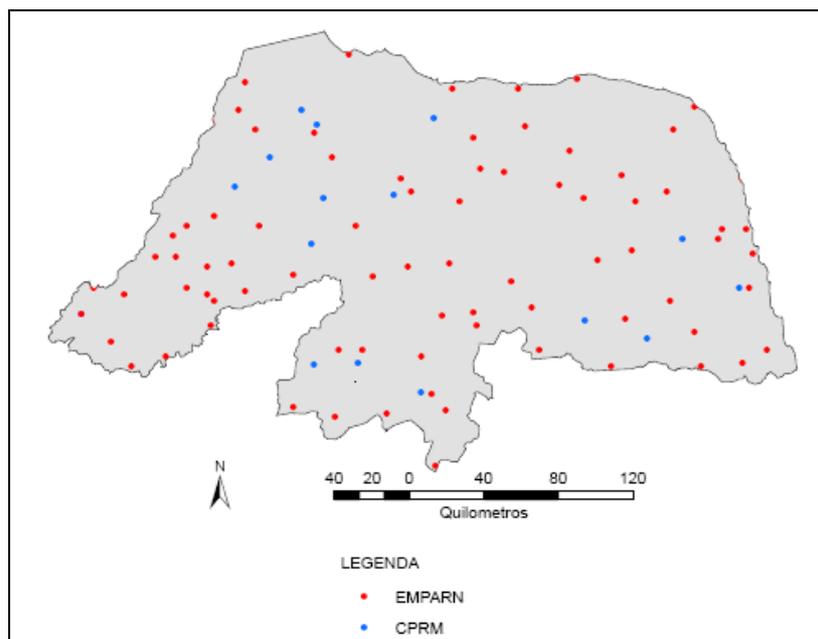


Figura 5 – Definição da configuração espacial da rede pluviométrica.

Durante a investigação dos quadrimestres críticos observou-se no hietograma que os meses de Fevereiro, março, abril e maio representaram o quadrimestre mais úmido do ano hidrológico, com precipitações médias mensais acumuladas correspondentes a 500 mm, enquanto os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, representaram o quadrimestre mais seco, com 40 mm. A figura 6 mostra o histograma da distribuição de frequência quadrimestral.

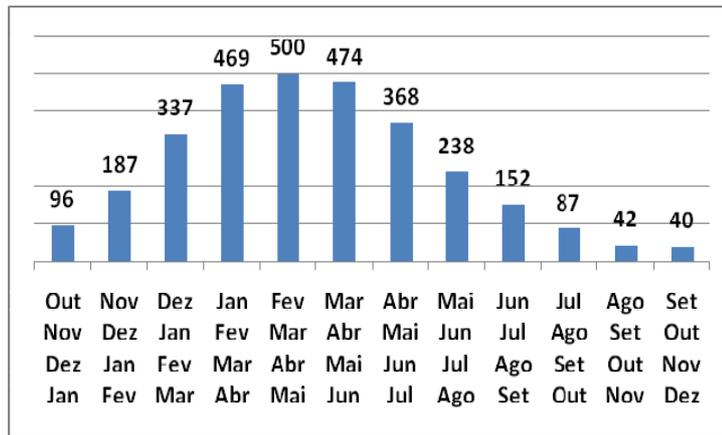


Figura 6 – Hietograma dos totais quadrimestrais das médias das precipitações mensais médias no período de 1977 a 2006 em (mm).

Neste caso as freqüências quadrimestrais de ocorrência da precipitação média se mostraram normalmente distribuídas segundo análise visual. No caso das análises do quadrimestre mais úmido e mais seco, observou-se a necessidade de transformação estatística em distribuição log-normal, quando analisados separadamente os histogramas também sob o processo visual.

As figuras 7 e 8 apresentam os histogramas das distribuições log-normais para os dois quadrimestres. Os valores das tendências centrais e outros parâmetros estatísticos importantes à análise estatística estão apresentados na tabela 2. O comportamento das duas funções espaciais está mostrado na figura 9. A tabela 3 apresenta o relatório dos parâmetros utilizados e validação cruzada. As figuras 10 e 11 mostram os semivariogramas ajustados para cada quadrimestre. Os gráficos das regressões lineares entre os valores medidos e estimados foram apresentados nas figuras 12 e 13. As figuras 14 e 15 exibiram os mapas das superfícies interpoladas para cada quadrimestre enquanto as figuras 16 e 17 os mapas das estimativas dos erros de interpolação.

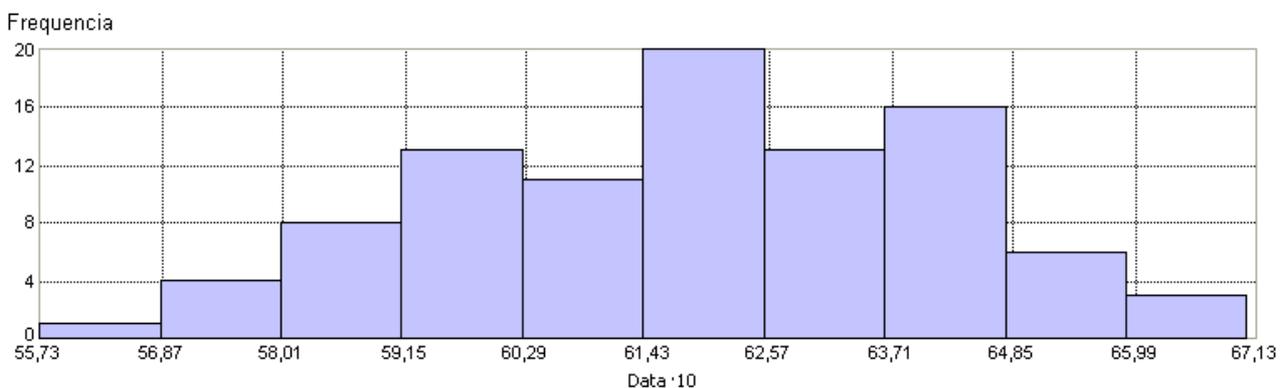


Figura 7 – Histograma da distribuição log-normal do quadrimestre mais úmido em (mm).

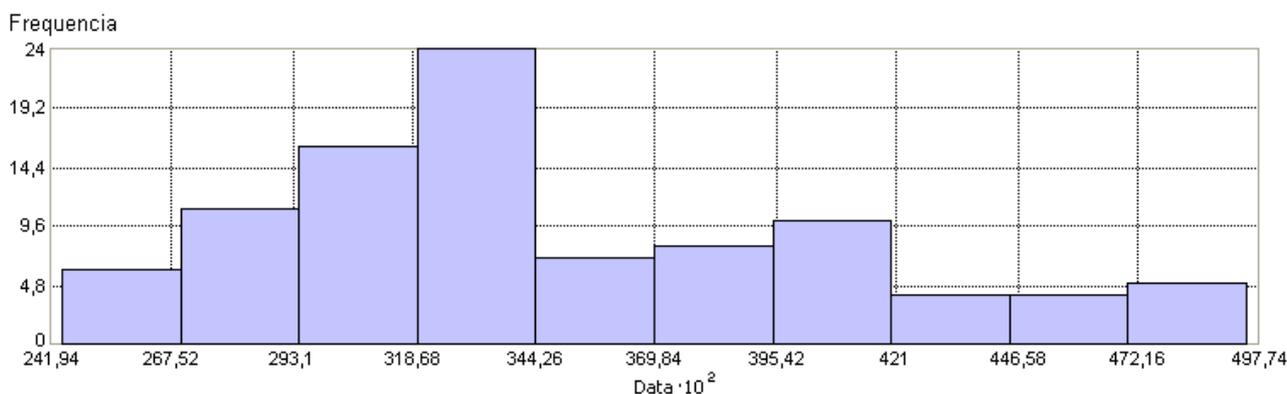


Figura 8 – Histograma da distribuição log-normal do quadrimestre mais seco em (mm).

Tabela 2 – Estatísticas obtidas na distribuição log-normal.

Parâmetros da distribuição de frequências	Variáveis hidrológicas	
	Precipitações do quadrimestre mais úmido (mm)	Precipitações do quadrimestre mais seco (mm)
Mínima	5,5731	2,4447
Máxima	6,7044	4,9525
Média	6,1872	3,4806
Desvio padrão	0,23657	0,61002
Variância	0,056	0,3721
Assimetria	-0,13841	0,65572
Curtose	2,5028	2,7515
1° Quartil	6,0155	3,0619
Mediana	6,2102	3,3219
3° Quartil	6,3825	3,9153

Tabela 3 – Relatório dos parâmetros e validação cruzada das variáveis.

Método geoestatístico	Kriging	
Programa computacional	ArcGis	
Variável	Quadrimestre mais úmido	Quadrimestre mais seco
Transformação estatística	Log-normal	Log-normal
Remoção de tendência	Segundo ordem	Segundo ordem
Direção	350,5° - anisotrópica	351,3° - anisotrópica
Modelo do semivariograma teórico	Esférico	Esférico
Alcance máximo (a)	159,948 km	136,04 km
Alcance mínimo (a)	51,8816 km	78,5763 km
Patamar (C + C0)	0,0183 mm ²	0,060626mm ²
Efeito Pepita (C0)	0,015461 mm ²	0,067944mm ²
Dependência espacial [C0 / (C + C0)] x 100%	85% (fraca)	112,07% (fraca)
Validação cruzada:		
Erro médio	0,04802 mm	0,1886 mm
Erro médio quadrático	69,69 mm	11,46 mm
Erro médio padrão	73,13 mm	15,72 mm
Erro médio normalizado	-0,0027 mm	-0,01892 mm
Erro médio quadrado normalizado	0,9996 mm	1,085 mm

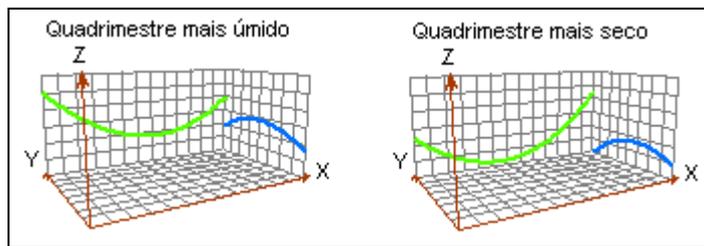


Figura 9 – Comportamento espacial das variáveis

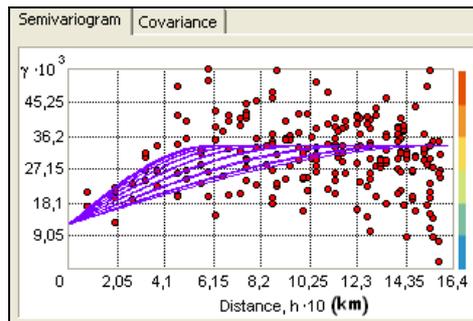


Figura 10 – Ajustamento do semivariograma esférico ao quadrimestre mais úmido.

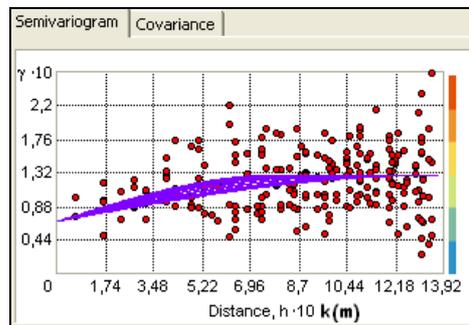


Figura 11 – Ajustamento do semivariograma esférico quadrimestre mais seco.

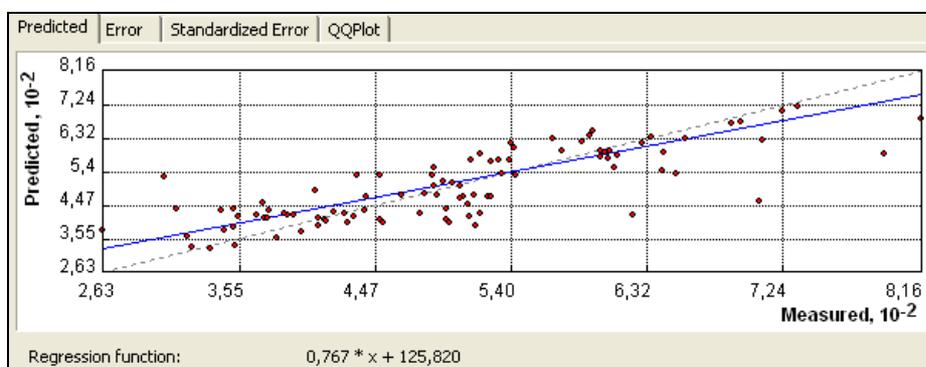


Figura 12 - Regressão linear entre os valores medidos e estimados na interpolação do quadrimestre mais úmido.

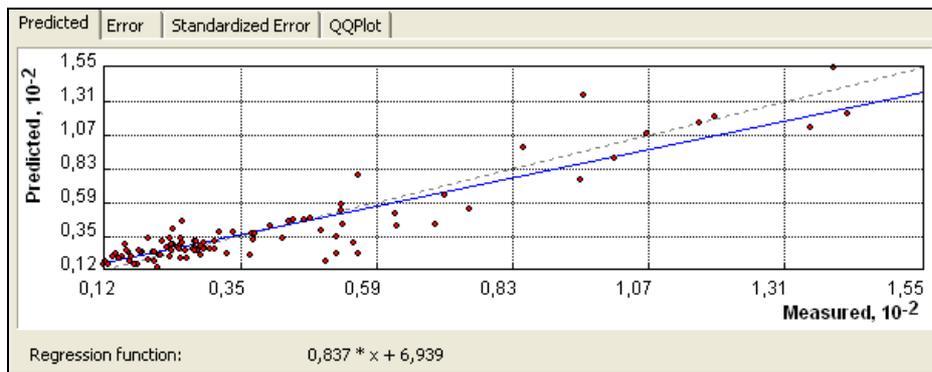


Figura 13 - Regressão linear entre os valores medidos e estimados na interpolação do quadrimestre mais úmido.

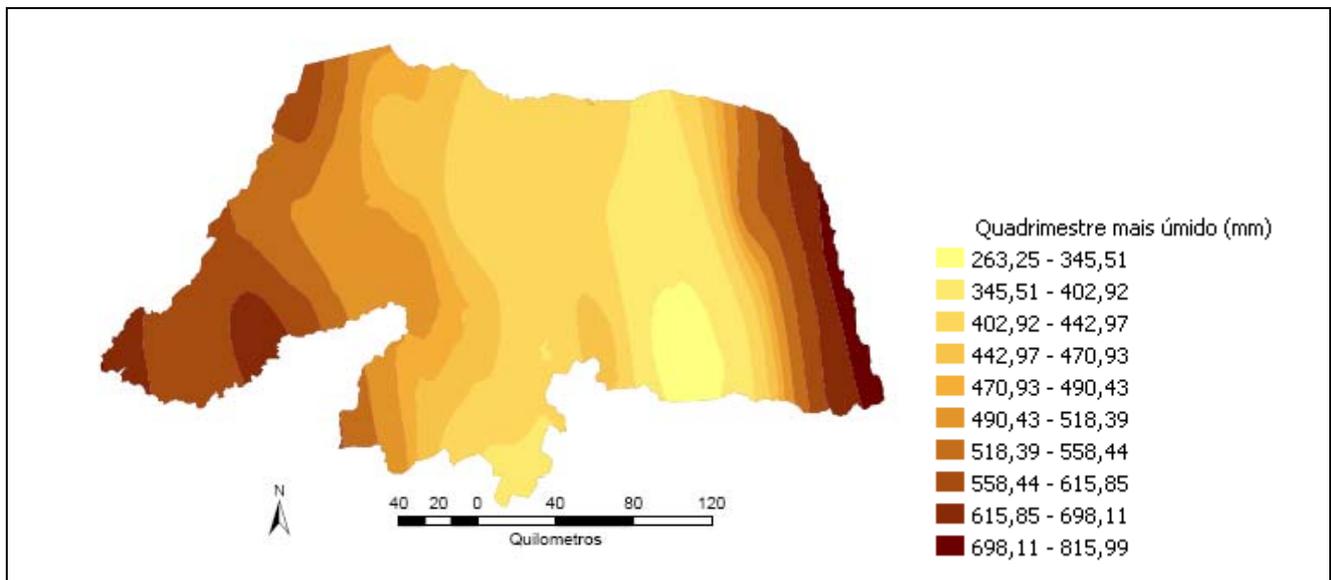


Figura 14 – Mapas da distribuição espacial do quadrimestre mais úmido

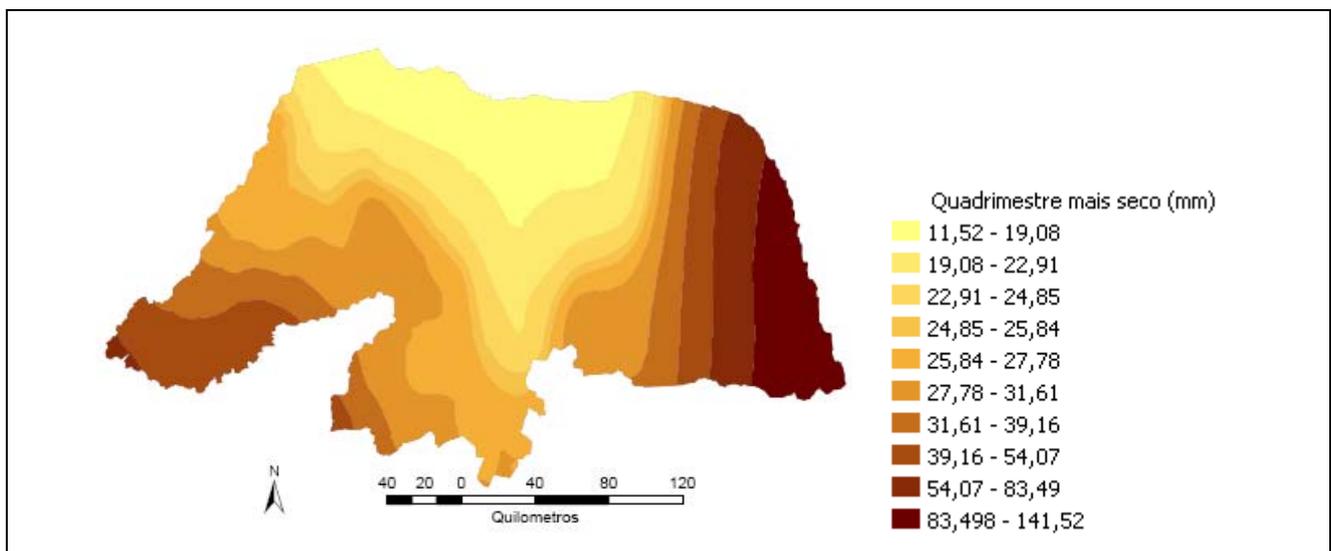


Figura 15 - Mapa da distribuição espacial do quadrimestre mais seco.

Os mapas da distribuição espacial da precipitação média para ambos os quadrimestres indicaram duas regiões climaticamente bem definidas: a de clima úmido, constituída pelo litoral leste e a porção oeste do Estado, e o clima seco, correspondente ao litoral norte e porção central, local onde se concentra a região semi-árida potiguar.

Segundo as identificações em milímetros nos intervalos da legenda de cores, no quadrimestre mais úmido, as chuvas do litoral leste atingiram um máximo de 815,99 mm e a porção oeste um máximo de 698,11 mm, enquanto a porção central teve um mínimo de 263,25 mm. No quadrimestre mais seco, as chuvas do litoral leste atingiram um máximo de 141,52 mm e a porção oeste um máximo de 54,07 mm, enquanto a porção central teve o mínimo de 11,52 mm.

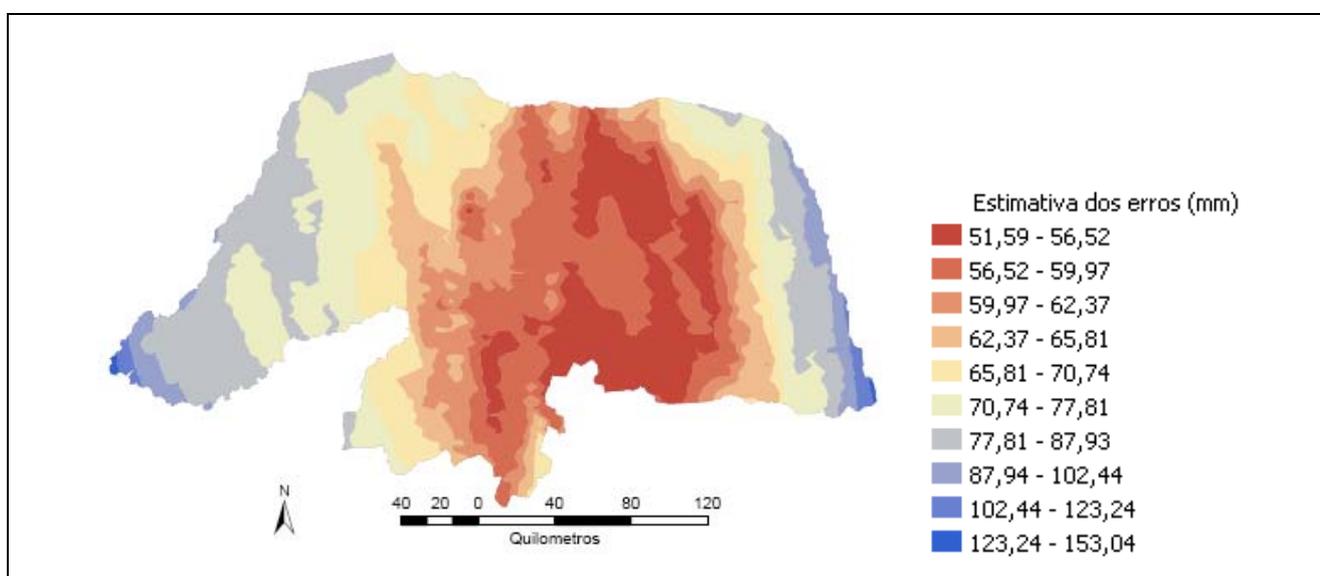


Figura 16 – Mapa das estimativas dos erros de interpolação do quadrimestre mais úmido

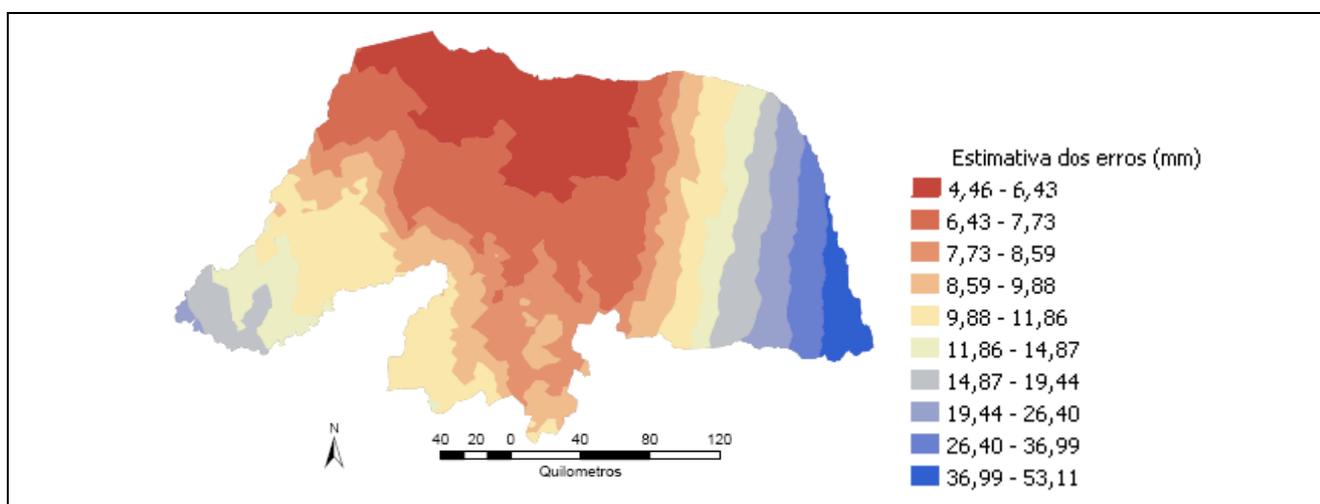


Figura 17 – Mapas das estimativas dos erros do quadrimestre mais seco.

Os mapas das estimativas dos erros de interpolação em ambos os quadrimestres apontaram os maiores erros nas regiões de ocorrência das maiores chuvas, os quais chegaram 153,04 mm no quadrimestre mais úmido e 53,11 mm no quadrimestre mais seco. O fato deve-se a grande variabilidade pluviométrica registradas nas suas séries históricas entre os locais mais e menos chuvosos, identificados com grandes dispersões estatísticas, e a conseqüente necessidade de uma ampliação da densidade pluviométrica. Na porção central constataram-se os menores erros, chegando a apontar o intervalo de 51,59 mm à aproximadamente 77,81mm no quadrimestre mais úmido e 4,46 mm a 14,87 mm no quadrimestre mais seco.

Salgueiro *et al.* (2006) analisaram as precipitações máximas sobre as diversas altitudes de Pernambuco e concluíram que a influência direcional ocorria a 35,8° em relação ao leste. Salgueiro (2005) analisou a variabilidade espacial da precipitação média na bacia do rio Ipojuca, e constatou um ângulo de 35,9° também em relação ao leste. Em ambos os casos, os movimento de circulação meteorológica vindo do leste, no sentido (nordeste – sudoestes) adentravam o continente do Litoral ao Sertão passando pela Zona da Mata e Agreste.

No caso do Rio Grande do Norte este comportamento pôde ser comparado com o litoral leste considerando o mesmo sentido. A presença de mais um litoral norte localizada na região do Sertão, onde predomina a zona de convergência intertropical, além da ocorrência de outra região tão úmida quanto o Litoral leste, os ângulos direcionais estimados pelo programa corresponderam respectivamente a 9,5° e 8,7° com o norte, ambos no sentido (sudeste – noroeste).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- Com a pesquisa realizada, os órgãos gestores de recursos hídricos e responsáveis pela defesa civil no Estado do Rio Grande do Norte, deverão intensificar suas intervenções no controle do excesso de água e na segurança da população, nos meses de: fevereiro, março, abril e maio;

- Com pesquisa realizada, os órgãos gestores de recursos hídricos e responsáveis pela defesa civil no Estado do Rio Grande do Norte, deverão intensificar suas intervenções no controle da escassez de água e na segurança da população, nos meses de: setembro, outubro, novembro e dezembro;

- Tanto no quadrimestre mais úmido como no mais seco, os mapas elaborados poderão identificar os locais onde os efeitos meteorológicos são mais intensos e agravantes, podendo utilizar-se como instrumento de avaliação de situações de emergência ou calamidade pública requeridas pelas Prefeituras dos municípios do Estado;

- Os resultados da pesquisa poderão contribuir com as instituições competentes nas definições de políticas públicas e tomadas de decisão, que envolvam projetos e programas de desenvolvimento socioeconômicos e investimentos, sejam na iniciativa privada ou em qualquer esfera de Governo;

- Recomenda-se a repetição desta metodologia para identificação das áreas de ocorrência das chuvas convectivas, substituindo a precipitação média pelo coeficiente de irregularidade meteorológica. As chuvas convectivas, apesar de abrangerem pequenas áreas, ocorrem com grandes intensidades e curta duração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CPRM/SGB–Serviço Geológico de Brasil, a UFPE–Universidade Federal de Pernambuco e a UFRPE–Universidade Federal Rural de Pernambuco.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, T. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A.A.A.; OLIVEIRA, O. F. (2004). “*Análise da Variabilidade Espacial da Precipitação na Bacia do Rio Ipanema, Pernambuco*”, in Anais do VII Simpósio de Recursos hídricos do Nordeste, ABRH, São Luis, Nov. 2004, CD-ROM.

BERTONI, J. C. & TUCCI, C. E. M. (1993). “*Precipitação*” in. TUCCI, C. E. M. Org. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, UFRGS, ABRH, Porto Alegre-RS, Cap 5, p177-200.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F., KORNOPKA, A. E. (1994). “*Fieldscale Variability of Soils Properties in Central Iowa Soils*”. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, V.58, p1501 – 1511.

EMBRAPA (2009). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível on-line em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>, 21/04/2009.

IBGE (2009). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível on-line em: <http://www.ibge.gov.br>, em 10/06/2009.

IDEMA (2009). Instituto de desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. Disponível on line em: <http://www.idema.rn.gov.br>, 21/04/2009.

JOHNSTON, K.; VER HOEF, J. M.; KRIVORUCHKO, K.; LUCAS, N. (2001). *Using ArcGis Geoestatistical Analyst*. Esri New York – USA, 300p.

LANDIM, P. M. B. (1998). *Análise Estatística de Dados Geológicos*. UNESP, Rio Claro, p156-183.

OLIVEIRA, J. N. & CHAUDRHY, F. H. (1995). *Uso de Métodos Geoestatísticos na Determinação de Isoietas a partir de dados Pluviométricos*. In: XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, São Paulo, p091-097, Nov. 1995.

- SALGUEIRO, J. H. P. B. & MONTENEGRO, S. M. G. L. (2004). *Geoestatística Aplicada à Variabilidade Espacial e Padrões de Precipitação na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco*. in Anais do VII Simpósio de Recursos hídricos do Nordeste, ABRH, São Luis, Nov. 2004, CD ROM
- SALGUEIRO, J. H. P. B. (2005). *Avaliação de Rede Pluviométrica e Análise de Variabilidade Espacial de Precipitação: Estudo de Caso na bacia do rio Ipojuca em Pernambuco*. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife – PE, 124p.
- SALGUEIRO, J. H. P. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L. & MOURA, G. B. A. *As Precipitações Máximas e seus Tipos de Ocorrências Sobre as Diversas Altitudes de Pernambuco: uma abordagem Geoestatística do atual conhecimento em Pernambuco*. In Anais do VIII Simpósio de Recursos hídricos do Nordeste, ABRH, Gravatá-PE, CD-ROM. 2006.
- SALGUEIRO, J. H. P. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L. SILVA, F. B.; FRANÇA, M. S. *Estudo da Distribuição Espacial da Precipitação e seus Tipos de Ocorrências na Bacia do Rio Capibaribe em Pernambuco*. In IX Simpósio de recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Salvador BA, CD-ROM. 2008.
- 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*. In Revista Tecnologia, Universidade de Fortaleza, V29, N 2, Fortaleza-CE. 2008, P.174-185.
- PERH-RN (2009). *Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte* - Secretaria de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. Disponível on line em: <http://semarh.rn.gov.br>, 21/04/2009.
- VIEIRA, S. R. (2000). *Geoestatística em Estudo de Variabilidade Espacial do Solo*. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. & SCHAEFER, C. E. G. R., eds. *Tópicos em Ciências do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa-MG, V 1, p1-54.
- WMO (1984). *Guia de Práticas Hidrológicas*. In: *Aquisición y Proceso de Datos*, 4º edição, N° 168, Genebra, Suíça, V1, p3-1, p3-20.