

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA EM RELAÇÃO À TOPOGRAFIA NO ESTADO DO PARÁ

**MARCOS ANTONIO CORREA MATOS DO AMARAL¹; JEFFERSON VIEIRA
JOSÉ²; MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI³; RUBENS DUARTE COELHO³ E
TIMÓTEO HERCULINO DA SILVA BARROS¹**

¹ Doutorando, Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, Avenida Pádua Dias, 11, CEP: 13418-900, Piracicaba, SP, e-mail: marcosamaral@usp.br, timoteo@usp.br
CEP: 13418-900, Piracicaba, SP,

² Pós-doutorando, Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, e-mail: jfvieira@usp.br

³ Professor Titular, Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, e-mail: mvfolega@usp.br, rdcoelho@usp.br

1 RESUMO

São poucas as informações técnicas sobre as características climáticas da região amazônica, especialmente o Estado do Pará. O uso da Geoestatística, neste caso, pode ser uma solução, pois apresenta-se como uma ferramenta importante para fornecer suporte ao planejamento da agricultura e de obras de engenharia. O objetivo deste trabalho foi investigar a contribuição da longitude, da latitude e a covariável altitude, como variáveis auxiliares na obtenção de estimativas da distribuição espacial da precipitação anual média no Estado do Pará. Foram utilizados dados pluviométricos de 126 estações distribuídas no Estado do Pará e também, estações vizinhas ao Estado, com uma série histórica de 36 anos (1970 a 2006). Verificou-se que o modelo exponencial melhor se ajustou aos dados, e as tendências altitude, longitude apresentaram forte dependência espacial e estão diretamente correlacionadas com a precipitação média anual.

Palavras-chave: Cokrigagem, Amazônia, Geoestatística

**AMARAL. M. A. C. M. do; JOSÉ, J. V.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO, R. D.;
BARROS, T. H. da S.**

**SPATIAL DISTRIBUTION OF RAINFALL IN RELATION TO TOPOGRAPHY IN
STATE OF PARÁ, BRAZIL**

2 ABSTRACT

Some technical information on the climatic characteristics of the Amazon region, especially of the State of Pará. The use of geostatistics, in this case, can be a solution as it presents itself as an important tool to support the planning agriculture and public works of engineering. The objective of this study was to investigate the contribution of longitude, latitude and the covariate altitude as auxiliary variables for obtaining estimates of the spatial distribution of mean annual rainfall in the State of Pará. Rainfall data from 126 stations distributed in the State of Pará was used, in addition to neighboring stations in the State, with a historical series

of 36 years (1970-2006). It was found that the exponential model fits the data best, and the covariates altitude, longitude have strong spatial dependence and are directly correlated with the average annual rainfall.

Keywords: Cokriging, Amazon, geostatistics

3 INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas do Estado do Pará, como em muitas regiões do país, estão em processo de degradação. Entretanto, poucas são as informações técnicas disponíveis sobre as características climáticas dessas regiões, que possam oferecer a engenheiros e agricultores os subsídios para o manejo adequado destas bacias e, conseqüentemente, para a redução da sua degradação (SOUZA et al., 2012).

No planejamento ambiental e agrícola é indispensável dispor de informações relacionadas às variáveis climáticas, tais como temperatura, umidade, radiação e especialmente a precipitação pluvial. Os dados de precipitação são necessários na elaboração de projetos hidráulicas, na escolha das culturas a serem implantadas, na organização do calendário de plantio a colheita, além do planejamento e manejo adequado da irrigação.

Quando a quantidade de dados é insuficiente para se obter o mapeamento de uma variável climática, como a precipitação pluvial, torna-se imprescindível o uso de métodos de interpolação que possam estimar esses valores por meio das séries de dados disponíveis na região de estudo.

Há relatos na literatura de diversos métodos de interpolação, univariados e multivariados, com diferentes níveis de complexidade (CARVALHO & QUEIROZ, 2002; CARVALHO & ASSAD, 2005; DIODATO & CECCARELLI, 2005; DI PIAZZA et al., 2011; CARVALHO et al., 2012).

Para os geoestatísticos, o termo krigagem consiste em uma adaptação para a família de algoritmos de regressão de mínimos quadrados generalizados (GOOVAERTS, 1997). Os métodos de krigagem usam a dependência espacial expressa no semivariograma entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima, o que os torna ótimos estimadores no estudo da distribuição espacial das chuvas (MACHADO et al., 2010).

Pesquisas tem mostrado resultados satisfatórios com o uso da altitude como covariável na estimativa de uma variável (CARVALHO & QUEIROZ, 2002; DIODATO & CECCARELLI, 2005; BRITO et al., 2010; VIOLA et al., 2010; DI PIAZZA et al., 2011). Todavia, quantificar sua influência em relação aos interpoladores espaciais, neste aspecto, precisa ser melhor compreendida.

O objetivo deste trabalho foi realizar o zoneamento da distribuição da precipitação pluvial no Estado do Pará relacionando aos dados de altitude do terreno, com o auxílio da ferramenta geoestatística, a fim de fornecer suporte à agricultura de precisão, aplicações agroambientais e projetos de engenharia.

4 MATERIAL E MÉTODOS

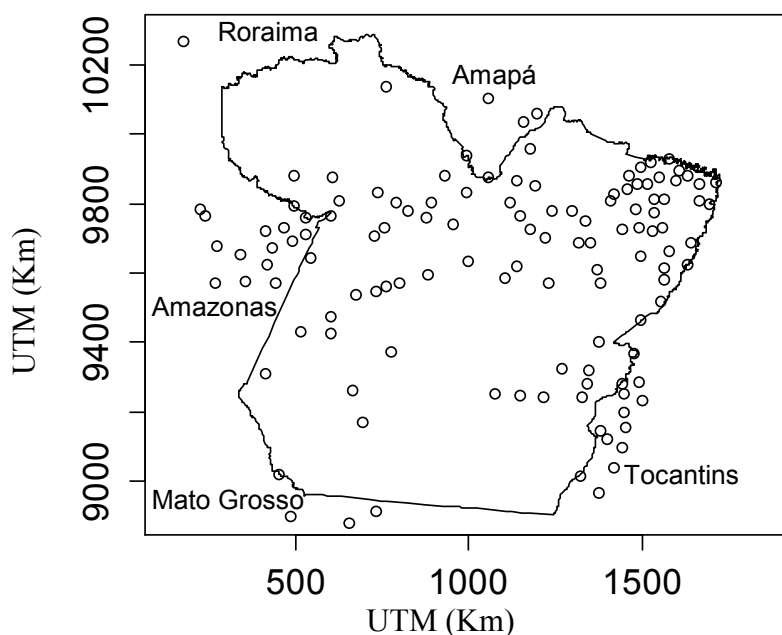
4.1 Área de estudo

O Estado do Pará que possui uma área de aproximadamente 1247954,66 km²; está localizado entre as longitudes -46,07 E e -58,90 W', e entre as latitudes -2,59 N, e -9,84 S'; tem 58% de sua superfície entre 0 e 200 m de altitude. A região é dominada pelo clima tropical úmido, influenciada pela ZICT, que determina precipitações pluviométricas de 2500-3000 mm entre os meses de janeiro a abril e um período de estiagem característico entre os meses de julho a dezembro, caracterizado por baixas precipitações e temperaturas relativamente altas, em torno de 27,7 °C (média anual), (SUDAM, 1984). A umidade relativa do ar situa-se entre 80-85% (média anual), associada ao regime de chuvas (MARTORANO et al., 1993).

4.2 Amostragem

A etapa inicial do estudo constituiu na escolha das estações meteorológicas a serem utilizadas. Para uma melhor amostragem dos dados, foram selecionadas estações com períodos de dados superiores a 36 anos, compreendidas no período de 1970 a 2006, a partir do banco de dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Para evitar a incerteza ocasionada pela extrapolação de valores, entre as estações do Estado do Pará, utilizaram-se, também, estações vizinhas ao Estado; essas localizam-se, respectivamente, nos Estados de Amapá, Roraima, Amazonas, Mato Grosso e Tocantins. Os dados de altitude das estações meteorológicas foram obtidos a partir do modelo digital do terreno oriundo de imagens SRTM com resolução espacial de 90 metros. Na Figura 1 estão dispostas as 126 estações pluviométricas utilizadas.

Figura 1. Localização das estações pluviométricas analisadas no Estado do Pará.



4.3 Análise estatística exploratória dos dados

A análise exploratória espacial da precipitação média anual foi investigada em relação às suas coordenadas por meio de gráficos. A análise exploratória não espacial da precipitação média anual, mensal e altitude foram realizadas por meio de teste de normalidade de Shapiro-Wilk e gráfico de box-plot. Entretanto, para os dados que não tenderam a distribuição de normalidade, estes permaneceram na análise sem sua transformação, pois sua grandeza é significativa na interpretação precipitação média anual.

4.4 Análise geoestatística

Os dados foram analisados sob a abordagem de modelos geoestatísticos (DIGGLE & RIBEIRO JUNIOR, 2007) sob o paradigma frequentista da estatística. Buscou-se, desta forma, ajustar os parâmetros do modelo (Equação 1) pelo método da máxima verossimilhança.

$$Y(X_i) = \beta + S(X_i) + \varepsilon_i \quad (1)$$

Em que, $Y(X_i)$ é a precipitação média anual na linha i da matriz de coordenadas X , β é a média geral de uma área específica; $S(X_i)$ é um processo gaussiano com função de um modelo matemático com parâmetro de variância σ^2 e parâmetro de alcance ϕ , ε_i é o ruído aleatório normalmente distribuído com média zero e variância τ^2 .

Os modelos matemáticos foram, o exponencial, o esférico e o gaussiano, estes foram ajustados pelo método da máxima verossimilhança. Com a finalidade de estudar a variabilidade espacial foi considerado as tendências com as coordenadas, longitude e latitude, e a covariável altitude. Foram considerados oito tipos de tendência espacial, combinando algebricamente a longitude, latitude e altitude.

Na avaliação do desempenho dos modelos, foi utilizado o critério da classificação do grau da dependência espacial (GDE). A GDE foi feita por meio da razão entre o efeito pepita e o patamar $[\tau^2/((\sigma^2 + \tau^2))]$, sendo considerada forte se a razão for $< 25\%$, moderada quando estiver entre 25% e 75% e fraca se $> 75\%$ (CAMBARDELLA et al., 1994).

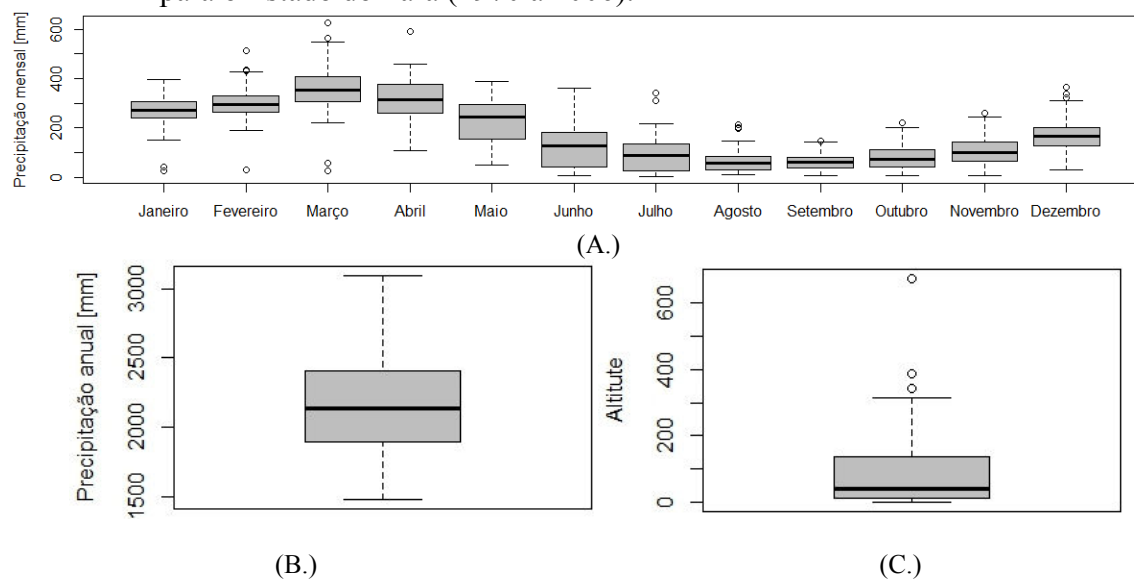
4.5 Análise dos dados

Os métodos geoestatísticos foram implementados mediante uso de funções disponíveis nas bibliotecas geoR (RIBEIRO & DIGGLE, 2001) e MASS (VENABLES & RIPLEY, 2002), utilizando o software R, versão 2.2.1 (R. DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados do Boxplot dos dados de precipitação média mensal e anual para o Estado do Pará (Figura 2A), verificou-se, de maneira geral, que os maiores valores de precipitação pluvial mensal (mm) são observados no mês de março, apresentando os maiores índices pluviais. O bimestre mais seco ocorre nos meses de agosto e setembro, nos quais foram detectados os menores valores de chuva no Estado.

Figura 2. Boxplot da precipitação média mensal (A), precipitação anual (B) e (C) altitude para o Estado do Pará (1970 a 2006).



Nos meses que apresentaram os maiores valores de precipitações, a amplitude média mensal foram as maiores, desde estações que registraram valores máximo de 627,72 mm e mínimos de 26,47 mm, por exemplo, no mês de março. Nos meses de menores índices pluviométricos, essa amplitude é menor, com valores de aproximadamente 145,71 mm até registros com 6,73 mm como no mês de setembro. Os valores de amplitude demonstram que o Estado do Pará apresenta diversidade climática, possuindo regiões de maior precipitação pluvial (Figura 2A).

A análise exploratória e padrão espacial dos dados de precipitação anual considerando oito tendências espaciais estão apresentadas na Figura 3. Observa-se uma tendência de aglomeração de cores no mapa. Na Figura 2B e Figura 2C pode-se também inferir sobre uma possível tendência afetando a quantidade de precipitação anual à medida que desloca nos eixos y e x, indicando duas possíveis covariáveis que interferem na distribuição da precipitação média anual. A correlação linear de Spearman entre a precipitação e a altitude foi de -0,60 ($p < 0,01$), no qual indica uma possível adequação do uso da altitude como covariável auxiliar na distribuição espacial da precipitação média anual.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados das estimativas dos parâmetros (τ^2 , σ^2 e ϕ) da função de verossimilhança para os modelos exponencial, esférico e gaussiano. Considerando a variável precipitação média anual e a covariância altitude e as tendências das coordenadas.

Dos três modelos estudados, o modelo exponencial apresentou bons ajustes ao semivariograma, podendo ser recomendado para representar as precipitações pluvial anual no Estado do Pará. O grau de dependência espacial médio do modelo exponencial foi de 17,96% variando de 17,25 a 18,76%, apresentando-se, portanto, no nível forte de estrutura de dependência espacial. O modelo exponencial que leva em consideração as tendências da longitude; da latitude e longitude com a covariável altitude podem ser usadas como variáveis auxiliares na obtenção de estimativas, em lugares que não possuem dados climatológicos, para a precipitação anual média.

Nos estudos de Mello & Viola (2013) os quais estudaram o comportamento da dependência espacial de precipitações pluvial intensas no Estado de Minas Gerais, também foi observado o melhor desempenho com o modelo exponencial. No caso de precipitações pluvial

média anual, Melo et al. (2008) observaram o modelo de semivariograma exponencial como o melhor.

Entre a escolha dos modelos exponencial com tendências y (3); z (4) e $x + z$ (5), conclui que o modelo com menor número de parâmetros é o mais adequado. Ou seja, os modelos y (3) e z (4) que levam em consideração a tendência da longitude e da altitude, respectivamente, são os que melhor explicam a variabilidade espacial da precipitação média anual no Estado Pará (Tabela 3). Como discutido por Diggle & Ribeiro Junior (2007), idealmente o modelo de uma tendência deve ter uma interpretação física natural. Assim a escolha de um modelo simples e que explique a maior da parte variabilidade espacial, seria o ideal. Modelos mais complexos são de modo geral mais difíceis de interpretar.

Figura 3. Análise exploratório e padrão espacial dos dados de precipitação anual (1970 a 2006) considerando oito tendências espaciais.

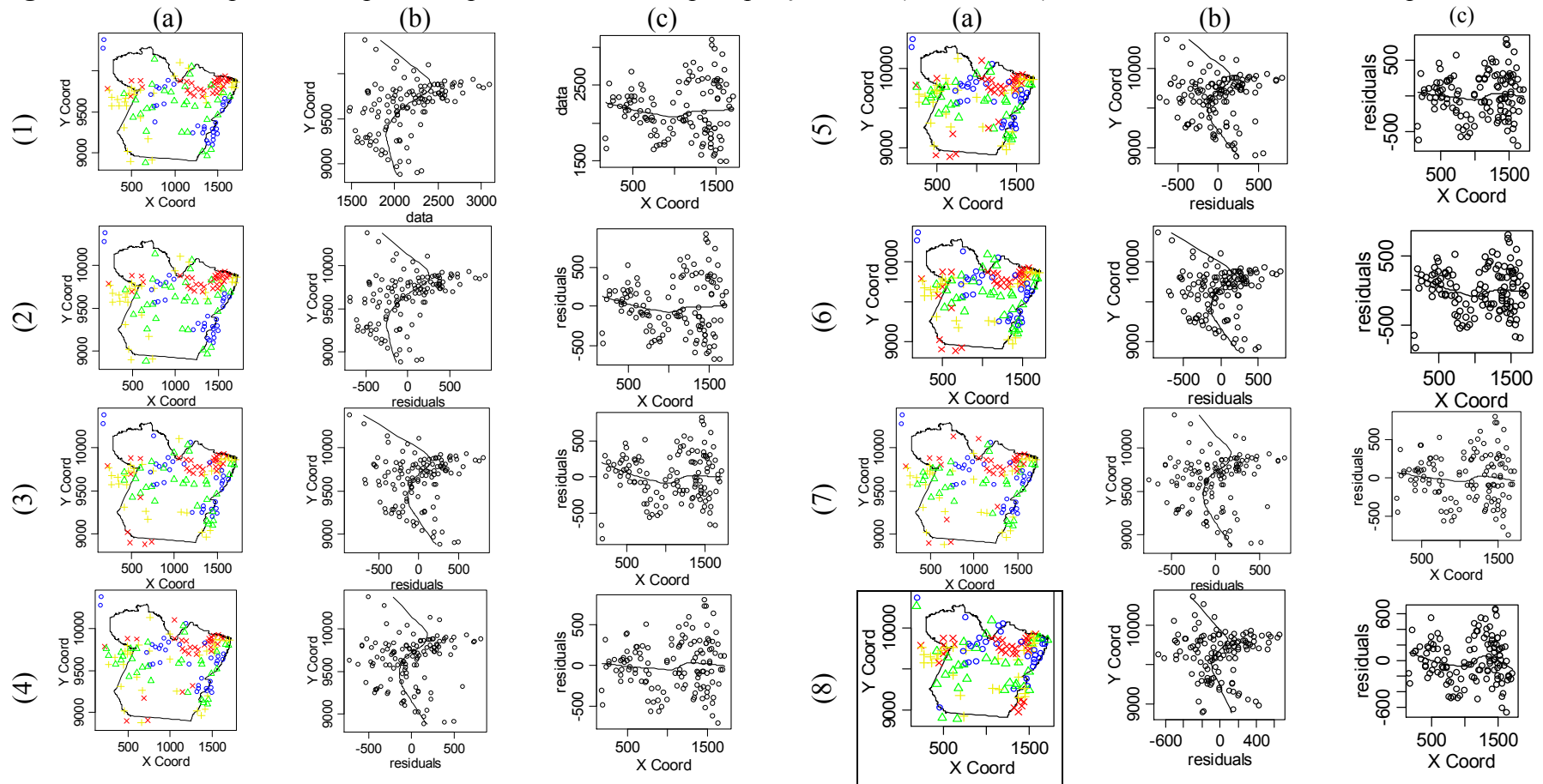


Tabela 3. Estimativas de parâmetros dos semivariogramas para os modelos exponencial, esférico e gaussiano considerando a variável precipitação média anual e a covariância altitude e as tendências das coordenadas.

Tendência		Exponencial				GDE
		Parâmetros			β_0	
		Efeito pepita	Patamar	Alcance	β_0	
1	Constante	18306,7	102810,3	309,2	2099,8	17,81%
2	X	16745,0	89240,1	224,3	2104,5	18,76%
3	Y	18647,4	108050,5	339,9	2098,1	17,26%
4	Z	18647,3	108049,2	339,9	2098,1	17,26%
5	X + Z	18647,4	108050,7	339,9	2098,1	17,26%
6	X + Y	18306,7	102810,6	309,2	2099,8	17,81%
7	Y + Z	16743,6	89243,1	224,3	2104,5	18,76%
8	X + Y + Z	16744,5	89241,1	224,3	2104,5	18,76%

Tendência		Esférico				GDE
		Parâmetros			β_0	
		Efeito pepita	Patamar	Alcance	β_0	
1	Constante	21492,0	105018	685,0	2095,0	20,47%
2	X	20688,4	86956,4	480,6	2111,6	23,79%
3	Y	21492,0	105018	685,0	2095,0	20,47%
4	Z	19818,0	84298,2	436,5	2110,1	23,51%
5	X + Z	20689,1	86958,9	480,7	2111,6	23,79%
6	X + Y	20689,1	86958,9	480,7	2111,6	23,79%
7	Y + Z	20689,1	86958,9	480,7	2111,6	23,79%
8	X + Y + Z	20688,9	86959,9	480,7	2111,6	23,79%

Tendência		Gaussiano				GDE
		Parâmetros			β_0	
		Efeito pepita	Patamar	Alcance	β_0	
1	Constante	30084,9	103418,1	285,7	2105,0	29,09%
2	X	30084,9	103418,1	285,7	2105,0	29,09%
3	Y	30084,7	103418,1	285,7	2105,0	29,09%
4	Z	30085,0	103412,4	285,7	2105,0	29,09%
5	X + Z	30084,6	146659,4	285,7	2105,0	20,51%
6	X + Y	30084,6	103418,7	285,7	2105,0	29,09%
7	Y + Z	30084,7	103417,2	285,7	2105,0	29,09%
8	X + Y + Z	30084,9	103418,2	285,7	2105,0	29,09%

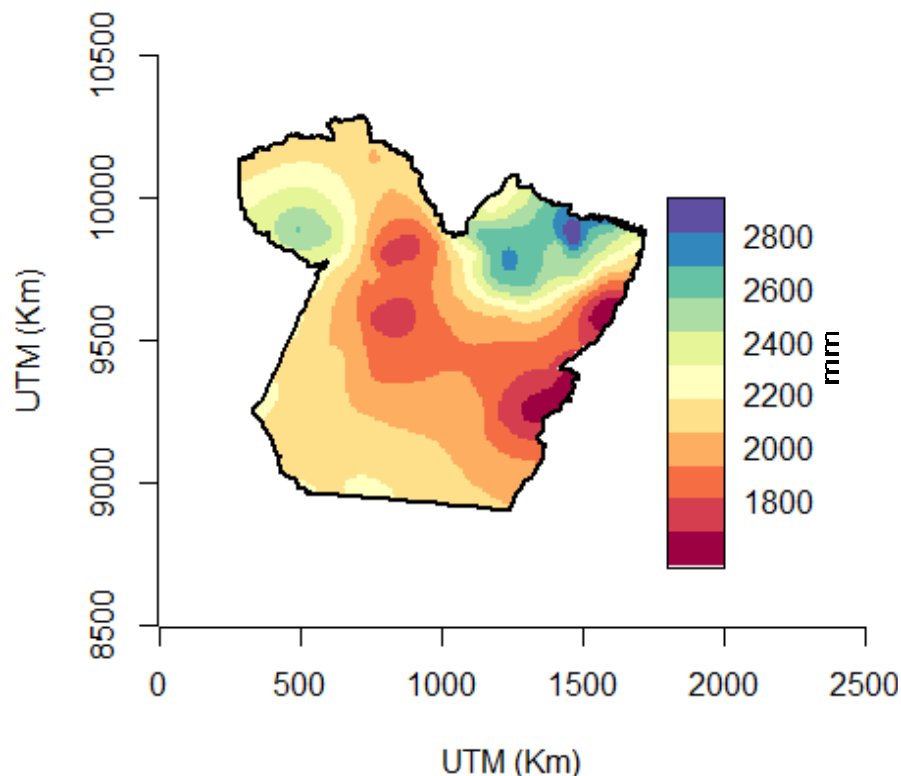
X - longitude; Y - latitude; Z - altitude; GDE - grau de dependência espacial; β_0 - média geral de uma área específica;

O parâmetro alcance, do semivariograma, indica a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si, ou seja, os pontos localizados em uma área cujo raio seja o alcance são mais semelhantes entre si do que os dos separados por distâncias maiores. O alcance de 339 km, para a variável precipitação, mostra que todos os vizinhos dentro desse raio podem ser usados na estimativa de valores em espaçamentos mais próximos (Tabela 3).

Para estimativa de valores de precipitação pluvial média anual nos locais não amostrados, foi gerado mapa de distribuição espacial (Figura 4), sendo esses obtidos por interpolação por meio da krigagem, a partir dos parâmetros do modelo exponencial ajustado aos semivariogramas, gerado pelo método da máxima verossimilhança.

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial da precipitação média anual, com valores variando de 3000 mm, a valores inferiores a 1600 mm. As maiores precipitações médias anuais ocorrem na porção norte do Estado do Pará, sendo: a região do Marajó, de Belém, do Nordeste Paraense e uma porção Nordeste do Baixo Amazonas. As menores precipitações médias anuais foram observadas na região Sudeste Paraense estendida até ao sudeste da região do Baixo Amazonas.

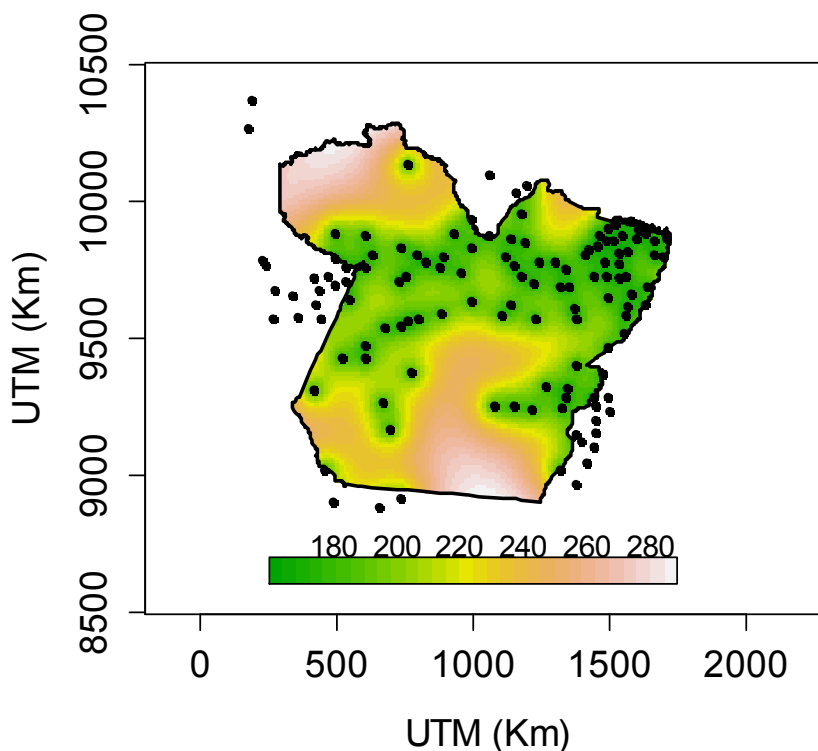
Figura 4. Mapa de distribuição da precipitação média anual do Estado do Pará.



Resultados semelhantes foram encontrados por Moraes et al. (2005) os quais utilizaram 31 postos pluviométricos para interpolar espacialmente a precipitação média anual no Estado do Pará; os autores utilizaram o método do inverso do quadrado da distância. Segundo Carvalho et al. (2012) as estimativas de precipitação média anual obtidas pelos interpoladores geoestatísticos são mais precisas do que as obtidas pelo interpolador do inverso do quadrado da distância.

Na Figura 5 é apresentado o mapa de variância de krigagem, este mapa identifica as áreas com maior variância de previsão, que permite reforçar a amostragem futura, em ordem reduzir as incertezas de previsão. Foi observado que a variância da precipitação média anual espacial foi de ± 160 a ± 280 mm.

Figura 5. Mapa de variância da precipitação pluvial média anual (1970 a 2006) no Estado do Pará.



De maneira geral, por meio da análise visual do mapa de variância, as predições possuem boa precisão, onde estão concentradas as estações meteorológicas. Entretanto há necessidade de adensamento da rede de monitoramento para melhorar a qualidade dos dados e permitir uma caracterização climática mais pontual.

6 CONCLUSÕES

O modelo exponencial que leva em consideração as tendências; da longitude, da latitude e longitude com a covariável altitude pode ser usada como variável auxiliar na obtenção de estimativas, em lugares não amostrados, para a precipitação anual média.

7 REFERÊNCIAS

- BRITO, L. DE F.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; LAS SCALA JUNIOR, N. Spatial variability of soil CO₂ emission in different topographic positions. **Bragantia**, v.69, p.19-27, 2010.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B; NOVACK, J.M; PARKIN, T.B; KARLEN, D.L; TURCO R.F.; KNOPKA, A.E. Field-scale variability of soil proprieties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, Medison, v.58, p.1240-1248, 1994.

- CARVALHO, J. R. P. DE; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, v.25, p.377-384, 2005.
- CARVALHO, J. R. P. DE; ASSAD, E. D; PINTO, H. S. Interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.1235-1242, 2012.
- CARVALHO, J. R. P. de; QUEIROZ, E. F. de. **Uso da cokrigagem colocizada na determinação da distribuição espacial de precipitação**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2002. 4p. (Embrapa Informática Agropecuária. Comunicado técnico, 21).
- DI PIAZZA, A.; LO CONTI, F.; LOTO, L. V.; VIOLA, F.; LA LOGGIA, G. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.13, p.396-408, 2011.
- DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Model-Based geostatistics**. New York: Springer, 2007. 230p.
- DIODATO, N.; CECCARELLI, M. Interpolation processes using multivariate geostatistics for mapping of climatological precipitation mean in the Sannio Mountains (southern Italy). **Earth Surface Processes and Landforms**, v.30, p.259-268, 2005.
- GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University, 1997. 496p.
- MORAES, B.C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, p. 207-214, 2005.
- MACHADO, R. L.; CEDDIA, M. B.; CARVALHO, D. F. de; CRUZ, E. S. da; FRANCELINO, M. R. Spatial variability of maximum annual daily rain under different return periods at the Rio de Janeiro State, Brazil. **Bragantia**, v.69, p.77-84, 2010.
- MARTORANO, L.G.; PERREIRA, L.C.; CÉZAR, E.G.M.; PEREIRA, I.C.B. **Estudos Climáticos do Estado do Pará, Classificação Climática (Köppen) e Deficiência Hídrica (Thornthwhite, Mather)**. Belém, SUDAM/EMBRAPA, SNLCS, 1993. 53p.
- MELLO, C.R.; VIOLA, M.R.; MELLO, J.M. & SILVA, A.M. Continuidade espacial de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, 32:532-539, 2008.
- MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 37-44, Feb. 2013.
- SOUZA, R.O. R. DE M.; SCARAMUSSA, P. H. M., AMARAL, M. A. C. M. do; PEREIRA NETO, J. A.; PANTOJA, A. V.; SADECK, L. W. R. Equações de chuvas intensas para o estado do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 16, p.999-1005, 2012.

SUDAM – Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia. **Atlas climatológico da Amazônia brasileira**. SUDAM/PHCA. Belém, 1984. 125p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: **The R Project for Statistical Computing**. Vienna: R Development Core Team, 2013.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B.D. **Modern applied statistics with S**. New York: Springer, 2002. 493p.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. de; PINTO, D. B. F.; MELLO, J. M. de; ÁVILA, L. F. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.970-978, 2010.