

## Comparação de métodos de espacialização da precipitação na bacia do alto rio Negro, Santa Catarina

Ana Clara Lazzari Franco<sup>1</sup>  
[anaclara@grad.ufsc.br](mailto:anaclara@grad.ufsc.br)

Patricia Kazue Uda<sup>1</sup>  
[patricia.kazue@posgrad.ufsc.br](mailto:patricia.kazue@posgrad.ufsc.br)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

**Abstract.** The objective of this work is to compare the performance of the following interpolation methods: Spline, Thiessen, inverse of the distance's weight (IDW) and kriging methods (ordinary kriging, Empirical Bayesian kriging and cokriging) for the annual precipitation average in the upper Negro river watershed. The study area consists of a hydrological basin provided with a school catchment network, where several other hydrological studies were developed, with special focus on natural disasters. This watershed is located in the Santa Catarina and Paraná states, between latitudes 25°55'73''S and 26°14'17''S; and between longitudes 48°56'34''W and 49°23'12''W, and the climate is subtropical humid. The used data were acquired through the National Water Agency (ANA) information system, called Hidroweb, which consists of an online platform for acquiring hydrological data. To assess which one of the methods presented the more accurate result, the mean square error were calculated for each method, using the cross validation methodology, and then compared. The kriging methods showed the smaller errors, being the Bayesian ordinary kriging method the more precise one. The Spline method presented the second worst results, being the Thiessen polygons estimation the method with the bigger mean square error, although it is not a method used for spatial estimations, but for mean precipitation estimations in watersheds.

**Palavras-chave:** spatial interpolation methods, kriging, inverse of the distance's weight, Spline, métodos de interpolação espacial, krigagem, inverso do quadrado da distância.

### 1. Introdução

Sendo a água importante recurso natural, seu gerenciamento procura direcionar o uso racional, sustentável e democrático da água, devendo manter controle de seus usos e proteger os recursos hídricos disponíveis. A compreensão da disponibilidade hídrica temporalmente e espacialmente constitui importante subsídio para o gerenciamento dos recursos hídricos de uma região. Sendo a precipitação importante parcela do balanço hídrico, objetivo do presente estudo é determinar o método mais adequado para descrição do comportamento espacial da chuva na bacia em questão. Em estudos hidrológicos faz-se necessário o uso de ferramentas/funções que auxiliem a determinação das intensidades dos fenômenos hidrológicos. Tais funções podem ser expressas em relação ao tempo, ao espaço ou a ambos, e em escalas geográficas que vão desde a local até a global. Naghettini (2007). Comumente, os registros meteorológicos, incluindo os de precipitação, são realizados de maneira pontual, sendo necessária a sua interpolação para geração de superfícies contínuas de dados.

Considerando uma variável contínua, representada por  $n$  valores amostrados, a interpolação é a estimativa do valor desta variável, em um ponto ou instante intermediário aqueles amostrados. Entre os métodos de interpolação, existem os locais e globais. Os métodos locais são aqueles que consideram somente as variáveis próximas àquela que se procura estimar, como o inverso do quadrado da distância (IQD), enquanto que os métodos globais utilizam todos os dados disponíveis, como por exemplo, os interpoladores por superfície de tendência. Existem ainda métodos estatísticos de efeitos locais e globais, como a krigagem, onde os valores são estimados pela interpolação das amostras mais próximas e utilizam um estimador estatístico (SURFER, 1999; DRUCK, 2004; HUISMAN, 2009).

Os métodos baseados na ponderação por distância são algoritmos de interpolação do tipo local, considerados aproximados e determinísticos. O valor em uma dada coordenada é

calculado por uma média ponderada dos valores das amostras vizinhas, e a ponderação mais comumente aplicada utiliza o inverso do quadrado da distância (IQD). (DRUCK, 2004; HUISMAN, 2009).

A krigagem, por sua vez, compreende um conjunto de técnicas de interpolação, sendo um método estocástico e exato, aplicável de maneira local e global. A krigagem assemelha-se à IQD, pois utiliza amostras próximas para estimar um valor desconhecido. Porém, considera um estimador estatístico, desenvolvido a partir de todos os valores de amostras disponíveis na região estudada. Ela se baseia na hipótese de que a variação espacial de uma variável pode ser expressa como função da distância entre pontos. (DRUCK, 2004; HUISMAN, 2009). Esta técnica diferencia-se das demais principalmente pelo seu comportamento em relação à redundância de dados e por fornecer estimativas não tendenciosas e com variância mínima. Druck (2004)

A Cokrigagem é uma versão de método multivariado da krigagem, que permite incluir outros parâmetros na estimativa, sendo útil na estimativa de precipitação pela possibilidade de incluir a altitude e declividade do terreno como covariáveis. Schroeder (2013).

O método de interpolação spline consiste no ajuste de uma função matemática coincidente aos pontos disponíveis, de modo a minimizar a curvatura total da superfície gerada. Esse método é adequado para gerar superfícies que variam suavemente, como elevação, nível de água ou concentração de poluição. ESRI (2010).

O método de Thiessen é bastante utilizado para espacialização de dados de chuva e consiste em dar diferentes pesos aos totais precipitados, de acordo com a área que cada aparelho de amostragem abrange. Deste modo, o método assume que a precipitação em um ponto da bacia será sempre igual àquela registrada no posto pluviométrico mais próximo. Pinto (1976).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) possibilitam a espacialização de dados obtidos pontualmente sobre a superfície terrestre, bem como, a realização de análises espaciais de dados, e constitui uma importante ferramenta no campo das geociências. Druck (2004).

Nesse sentido o objetivo desse estudo foi comparar a performance de diferentes métodos de interpolação por meio de SIGs, e estabelecer qual o método mais adequado para interpolação de dados pluviométricos na bacia do alto rio Negro. Para avaliação dos métodos utilizou-se como indicador o erro quadrático médio.

## **2. Metodologia de Trabalho**

### **2.1 Área de estudo**

A bacia hidrográfica do alto Rio Negro encontra-se distribuída nos estados de Santa Catarina, no Planalto Norte Catarinense, e Paraná, no Primeiro Planalto Paranaense, entre as longitudes 49°55'15"W e 48°56'55"W e latitudes 25°55'06"S e 26°42'16"S possuindo uma área de drenagem aproximada de 3453 km<sup>2</sup>. A economia da região encontra-se fortemente estabelecida nos setores moveleiro e madeireiro, além da participação da agricultura.

Segundo a classificação climática de Köppen, a região é de clima Cfb, clima temperado com a temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, constantemente úmido, sem estação seca definida, com verão fresco com temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C. EMBRAPA(2012).

A altitude na bacia varia de 780 m, no ponto do exutório, até 1.519 m, no ponto onde se encontra a nascente do rio principal, na área mais acidentada da bacia. A altitude média da bacia é 885 m e 80% da área da bacia se encontra em altitudes de 780 a 1.215 m, como pode ser visualizado na figura 2.

Na bacia em estudo encontram-se 14 sub-bacias, que estão sendo monitoradas e que fazem parte de uma rede de bacias-escola do projeto "Hidrologia Florestal", uma atividade

desenvolvida pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em cooperação com a companhia Battistella. O objetivo final dessa rede de monitoramento de bacias é o auxílio na prevenção e redução de desastres relacionados à água, como enchentes e inundações, que são frequentes na região. Além disto, a complexidade ecológica e hidrológica da região e a existência de grandes barragens na bacia do rio Iguaçu (70.800 km<sup>2</sup>), trazem a necessidade de melhor compreender a dinâmica hidrológica e climática da região, de modo que as atividades científicas são um objetivo primário do projeto. Kobiyama *et al* (2009).

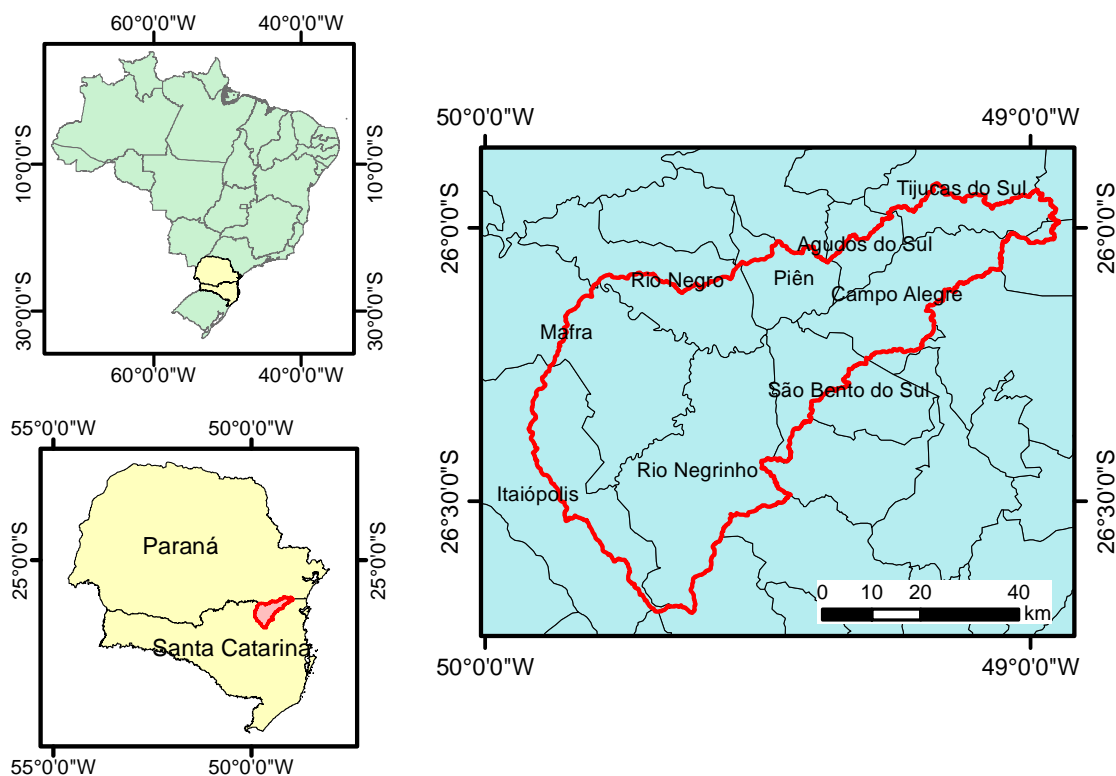


Figura 1: Localização da área de estudo.

## 2.2 Materiais

Para análise e compreensão da dinâmica da precipitação da bacia, foram utilizadas as séries históricas de chuva, obtidas no site da Agência Nacional de Águas (ANA) por meio da plataforma *online* Hidroweb, disponível para acesso em <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. As localizações das estações escolhidas, bem como o período de dados disponível, podem ser verificadas na Figura 2, e suas descrições se encontram na Tabela 1.

No total foram selecionadas 18 estações, sendo 4 dentro da bacia, uma no seu exutório e as demais nas proximidades da bacia. Após realizada uma exaustiva análise de consistência, foram calculadas as médias de precipitação anual para cada estação com os dados consistidos disponíveis. Para a espacialização dos dados de chuva foi utilizado um sistema de informações geográficas (SIG), mais especificadamente o *software* ArcGIS 10, no qual as precipitações médias calculadas e a localização das estações foram inseridas como dados de entrada para os cálculos de espacialização.

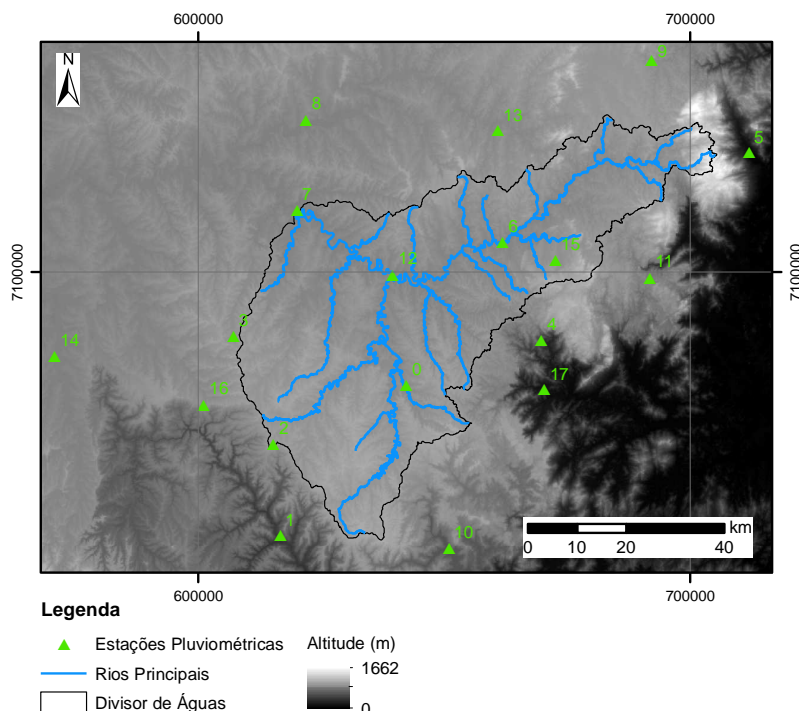


Figura 2: Localização das estações pluviométricas utilizadas no estudo e hipsometria da região.

Tabela 1: Características das estações pluviométricas utilizadas no estudo.

| Identificador | Código            | Nome                       | Período   | Latitude | Longitude | Altitude | Operador    |
|---------------|-------------------|----------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-------------|
| 0             | 2649055           | Corredeira                 | 1/7/1976  | -26,4194 | -49,5731  | 750      | ANA         |
| 1             | 2649058           | Barra do Prata             | 1/11/1977 | -26,6975 | -49,8281  | 450      | ANA         |
| 2             | 2649054           | Moema                      | 1/7/1976  | -26,5306 | -49,8436  | 950      | ANA         |
| 3             | 2649056           | Itaiópolis                 | 1/7/1976  | -26,3328 | -49,9272  | 990      | ANA         |
| 4             | 2649033           | Rio Natal                  | 1/9/1939  | -26,3333 | -49,3     | 300      | ANA         |
| 5             | 2548020           | Pedra Branca do Araraquara | 1/5/1962  | -25,9833 | -48,8833  | 150      | SUDERHSA    |
| 6             | 2649018           | Fragosos                   | 1/5/1967  | -26,1547 | -49,3806  | 790      | COPEL       |
| 7             | 2649006 e 2649021 | Rio Negro                  | 1/12/1922 | -26,1    | -49,8     | 770      | COPEL e ANA |
| 8             | 2549000           | São Bento                  | 1/4/1938  | -25,9333 | -49,7833  | 750      | ANA         |
| 9             | 2549008           | Vossoroca                  | 1/1/1941  | -25,8167 | -49,0833  | 805      | ANA         |
| 10            | 2649017           | Doutor Pedrinho            | 1/12/1953 | -26,7172 | -49,4831  | 250      | ANA         |
| 11            | 2649060           | Primeiro Salto do Cubatão  | 1/11/1951 | -26,2158 | -49,0806  | 790      | ANA         |
| 12            | 2649016           | Rio Preto do Sul           | 1/1/1951  | -26,2161 | -49,6033  | 780      | ANA         |
| 13            | 2549003           | Rio da Várzea dos Lima     | 1/9/1940  | -25,95   | -49,3931  | 810      | ANA         |
| 14            | 2650000           | Salto Canoinhas            | 1/7/1951  | -26,3706 | -50,2908  | 765      | ANA         |
| 15            | 2649057           | Campo Alegre               | 1/7/1976  | -26,1864 | -49,2733  | 870      | ANA         |
| 16            | 2650022           | Iracema                    | 1/1/1983  | -26,4586 | -49,9864  | 1000     | ANA         |
| 17            | 2649013           | Corupá                     | 1/10/1945 | -26,4239 | -49,2925  | 200      | ANA         |

### 2.3 Métodos

Os mapas de chuva espacializada da bacia do alto rio Negro foram gerados com o auxílio de ferramentas de análises geoestatísticas disponíveis no *software* ArcGIS 10. Foi elaborada uma tabela contendo a localização das estações em coordenadas UTM, Datum SAD69, e os dados de cada estação referentes à precipitação média anual calculada anteriormente.

Para espacialização de chuva foram aplicados quatro métodos geoestatísticos: krigagem ordinária, krigagem bayesiana empírica, cokrigagem ordinária e o inverso do quadrado da

distância, além de dois métodos mais simples de interpolação espacial, Thiessen e Spline. A cokrigagem foi realizada utilizando como covariáveis a altitude e a declividade do terreno.

A avaliação dos métodos foi feita através da análise do erro relativo médio da raiz quadrada (ERMRQ), calculado pelo método da validação cruzada, que consiste em realizar a interpolação deletando uma estação de cada vez e avaliando os resultados em respeito aos valores medidos na estação em questão. O erro total para cada método de interpolação é calculado através da seguinte equação:

$$ERMRQ = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{est} - x_{real})^2} \quad (1)$$

onde N representa o número de estações;  $x_{est}$  o valor estimado para a estação e  $x_{real}$  o valor real da precipitação na estação. Os métodos de krigagem e inverso do quadrado da distância fornecem estimativas de erros diretamente por meio da ferramenta do ArcGIS 10, entre os quais, o erro relativo médio da raiz quadrada, sendo todos calculados através do método da validação cruzada. Para os métodos de Thiessen e Spline o erro foi calculado manualmente, também pelo método de validação cruzada e, posteriormente, o erro foi calculado com auxílio de planilhas eletrônicas.

### 3. Resultados e Discussão

A figura 3 apresenta o mapa de precipitação gerado pelo método da krigagem bayesiana empírica, muito similar aquele gerado pelo método da krigagem ordinária, apresentada na figura x. Conforme a Tabela 2, é possível observar que o menor erro quadrático médio corresponde ao do método da Krigagem Bayesiana Empírica ( $ERMRQ = 275,7 \text{ mm.ano}^{-1}$ ), o que sugere uma melhor representação espacial da precipitação na bacia do alto rio Negro, em relação aos outros métodos. Especificamente em comparação à krigagem ordinária, que apresentou erro de  $293,1 \text{ mm.ano}^{-1}$ , a krigagem bayesiana apresentou menor erro provavelmente em função da sua metodologia empírica de cálculo, que procura o menor erro possível por meio de uma série de iterações automáticas.

A superfície gerada pelo método da cokrigagem apresenta um padrão espacial diferente das demais, sendo muitas vezes o inverso do apresentado pelos demais métodos. Isto indica, por exemplo, uma precipitação média anual menor na cabeceira da bacia e maior na região do exutório, em contraste com o padrão apresentado pelos demais métodos, onde a maior precipitação ocorre na cabeceira, e, o menor índice pluviométrico, na região próxima ao exutório. O erro apresentado pelo método da cokrigagem ( $ERMRQ=322,5 \text{ mm.ano}^{-1}$ ) foi superior àquele apresentado pela krigagem bayesiana empírica e krigagem ordinária, e inferior aos três demais métodos.

O método do inverso do quadrado da distância apresentou uma superfície similar àquela estimada pelo método Spline, porém, com o erro consideravelmente menor, sendo  $333,6 \text{ mm.ano}^{-1}$  para o método do inverso do quadrado da distância e  $443,6 \text{ mm.ano}^{-1}$  para o método spline.

O método Spline superestimou a influência da estação Rio Natal, localizada na região centro sul da bacia, em relação a dos demais métodos, sugerido pela região circular de cor mais clara na parte central do mapa apresentado na figura 3.e), que também pode ser visualizado na superfície gerada pelo mapa do inverso do quadrado da distância, figura 3.d), porém com menor dimensão.

As médias de precipitação anual para toda a bacia variaram de  $1528,1 \text{ mm.ano}^{-1}$  para o método da cokrigagem, até  $1599,1 \text{ mm.ano}^{-1}$  para a krigagem ordinária, sendo  $1576,2 \text{ mm.ano}^{-1}$  para o método de Thiessen. Esta variação de pequena escala ( $72 \text{ mm}$ ), sugere que a utilização do método de Thiessen apresenta resultados coerentes para o cálculo da precipitação média na bacia.

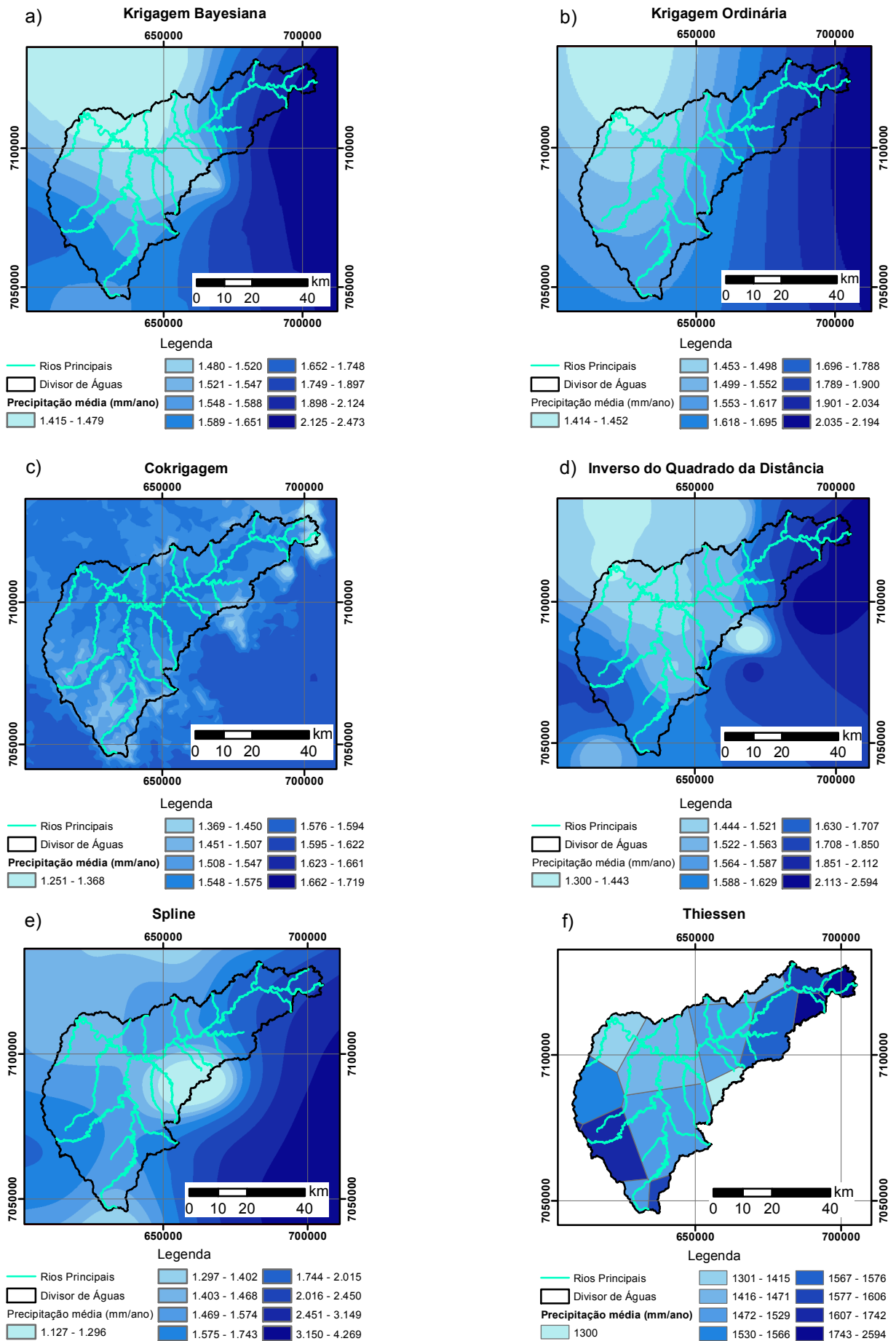


Figura 3: Precipitação média anual.

Tabela 2: Erro quadrático médio para os diferentes métodos de espacialização de chuva.

| Método                           | Erro Quadrático Médio (mm/ano) | Média (mm/ano) |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------|
| Krigagem Bayesiana Empírica      | 275,7                          | 1594,7         |
| Krigagem Ordinária               | 293,1                          | 1599,1         |
| CoKrigagem                       | 322,5                          | 1528,1         |
| Inverso do Quadrado da Distância | 333,6                          | 1588,3         |
| Spline                           | 443,6                          | 1577,9         |
| Thiessen                         | 447,5                          | 1576,2         |

#### 4. Conclusões

O método de interpolação que apresentou menor erro quadrático médio foi a krigagem bayesiana empírica. Tal fato deve-se possivelmente ao método de cálculo iterativo. O método da cokrigagem apresentou maior erro, e tendências espaciais inversas aos demais métodos indicando, por exemplo, precipitação média anual menor na cabeceira da bacia e maior na região do exutório, em contraste com o apresentado pelos demais métodos, onde a maior precipitação ocorre na cabeceira e o menor índice pluviométrico na região próxima ao exutório. Sugere-se um estudo mais detalhado do método da cokrigagem, já que este é o único capaz de considerar o relevo e outras covariáveis nas estimativas da precipitação.

Os métodos de interpolação simples, Thiessen e Spline, apresentaram os maiores erros quadráticos médios. O método de Thiessen, apesar de apresentar o maior erro nas estimativas, consiste em um método comumente utilizado para cálculo da precipitação total média dentro de uma bacia. Sua análise foi realizada no sentido de validar seu uso para estimativa da precipitação média total sobre a bacia em outro estudo. Apesar da considerável diferença apresentada nos erros apresentados por cada método, os valores apresentados para estimativa de precipitação média total foram similares, inclusive dos métodos de Thiessen e Spline. Desse modo, o método de Thiessen apresenta-se adequado para estimativa de precipitação média total sobre a bacia, mas não como método de avaliação espacial dos dados pluviométricos.

#### Agradecimentos

As autoras agradecem a Agência Nacional de Águas pelas séries históricas de dados de precipitação disponibilizados. As autoras agradecem também à CAPES e ao CNPQ pelo fomento que possibilitou a realização deste trabalho.

#### Referências Bibliográficas

- Naghetini, M., PINTO, E. J. A., Hidrologia Estatística, 552p., Belo horizonte, CPRM, 2007.
- Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M. (eds) "Análise Espacial de Dados Geográficos". Brasília, EMBRAPA, 2004. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br> Acesso em Março de 2014.
- Surfer, User's Guide. Golden Software Inc. USA. 1999. Disponível em [http://www.wi.zut.edu.pl/gis/Surfer\\_8\\_Guide.pdf](http://www.wi.zut.edu.pl/gis/Surfer_8_Guide.pdf) Acesso em 17/05/2014.
- Huisman, O., de BY, R. A., Principles of Geographic Information Systems. The International Institute for geo-Information Science and Earth Observation - ITC, Paises Baixos. 540 p. 2009.
- Schroeder, J. F. Surface representation of rainfall at small extents: a study of rainfall mapping based on volunteered geographic information in Kona, Hawaii. Master thesis, university of southern California, 2013.
- Pinto, N. L. S. et al. Hidrologia Básica. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.
- EMBRAPA: Atlas climático da região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.
- Wrege, M. S. et al. Editores técnicos. - Brasília, DF: 2012.
- Kobiyama, M.; Chaffe, P.L.B.; Rocha, H.L.; Corseuil, C.W.; Malluta, S.; Giglio, J.N.; Mota, A.A.; Santos, I.; Ribas, U.; Langa, R. Implementation of school catchments network for water resources management of the Upper Negro River region, southern Brazil. From Headwaters to the Ocean: Hydrological Change and Watershed Management. London: Taylor & Francis Group, p. 151-157, 2009.
- SEMA – PR. Bacias hidrográficas do Paraná. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Curitiba, 2010. Disponível em: <http://www.meioambiente.pr.gov.br>. Acesso em Junho de 2014.