

ANÁLISE DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO PARA O MAPEAMENTO DA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DO RESERVATÓRIO DE NOVA PONTE/MG

Ana Luisa Sales Pereira¹
Diego Rodrigues Macedo²

Resumo

A chuva é a entrada efetiva de água no ciclo hidrológico, por isso, estudar a sua distribuição espacial é fundamental para a gestão dos recursos hídricos. O objetivo desse trabalho é interpolar a precipitação para a bacia da usina de Nova Ponte no estado de Minas Gerais, por meio dos interpoladores Inverso da Distância Ponderada (IDW), Cokrigagem e Mínima Curvatura (Spline). Essa bacia é uma sub bacia do Rio Araguari, que por sua vez compõe a bacia do Rio Paranaíba. Foram selecionadas para esse estudo 34 estações pluviométricas e a série histórica utilizada compreendeu os anos de 1975 a 2016. A validação cruzada realizada apontou que o Spline usando a altitude como variável independente apresenta os melhores resultados de interpolação para área em estudo, entretanto os outros dois métodos também tiveram ajustes aceitáveis.

¹UFMG, graduada em Engenharia Ambiental e Sanitária (analuisa.salesep@hotmail.com)

²UFMG, doutor em Ecologia - Conservação e Manejo da Vida Silvestre (rodriguesmacedo@gmail.com)

1- INTRODUÇÃO

A chuva é a entrada efetiva de água no ciclo hidrológico e sua distribuição espaço-temporal, de forma conjunta com fatores como uso e tipo de solo, condicionam a resposta hidrológica da bacia. Por isso, estudar a distribuição espacial das chuvas é fundamental para a gestão dos recursos hídricos (VIOLA et al., 2010).

A maneira utilizada com mais frequência para obter dados de chuva é através dos postos pluviométricos localizados em pontos específicos (CONTI, 2002). Para esse tipo de medida os aparelhos mais utilizados são o pluviômetro e o pluviógrafo. A acurácia na estimativa da distribuição espacial da chuva requer uma densa rede pluviométrica e um alto custo operacional (SILVA, 2011).

Como a coleta de dados de chuva é pontual, muitas vezes, é necessário supor o valor de um “ponto” de chuva não registrado ou de localizações de valores circunvizinhos (GOOVAERTS, 2000). A interpolação é um procedimento útil nesses casos, pois é capaz de estimar valores de locais não amostrados, baseando-se em valores de dados observados em locais conhecidos (BURROUGH, 1986). Dessa forma, ela contribui para a compreensão espacial de atributos, sem a necessidade de levantar dados em toda a área de interesse.

Nesse contexto, o objetivo desse estudo é interpolar a precipitação para a bacia da usina de Nova Ponte no estado de Minas Gerais, por meio dos interpoladores Inverso da Distância Ponderada (IDW), Cokrigagem e Mínima Curvatura (Spline), e posteriormente usar da validação cruzada para testar a eficiência destes.

2- METODOLOGIA

O presente estudo contempla a bacia hidrográfica do Reservatório de Nova Ponte, no estado de Minas Gerais, que é uma sub bacia do Rio Araguari, que por sua vez compõe a bacia do Rio Paranaíba.

A bacia do rio Araguari, localiza-se na porção oeste do estado, abrangendo as regiões de planejamento do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Com área de 22091 km² e população de 1163718 habitantes, dividi-se em 20 municípios, sendo a nascente localizada no município de São Roque de Minas, em 1180m de altitude e foz na divisa dos municípios de Araguari e Tupacigura, em 510m de altitude (PDRH ARAGUARI, 2011). A sazonalidade na região é bem definida: estação seca entre maio e setembro e chuvosa entre outubro e abril (BRASIL, 1992). Sobre a ocupação do solo na bacia, pastagem, agricultura e savana gramínea lenhosa correspondem a mais

de 90% da área. Sendo as áreas urbanas restritas a menos de 1% da área total (PDRH ARAGUARI, 2011).

A bacia hidrográfica do Reservatório de Nova Ponte possui área de 15358 km², e altitudes variando de 796m a 1392m. Sua localização dentro de Minas Gerais e na bacia do Rio Araguari, bem como sua rede de drenagem e superfície de elevação são mostradas na Figura 1.

Figura 1. Localização e delimitação dos limites geográficos da bacia hidrográfica do Reservatório de Nova Ponte



Fonte: A autora, 2017

Foram selecionadas para esse estudo 34 estações pluviométricas, sendo 12 estações localizadas dentro dos limites da bacia hidrográfica do Reservatório de Nova Ponte, e 22 estações no seu entorno. Os dados das estações foram obtidos junto ao Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWEB) da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo 29 delas mantidas pela ANA, e as outras 5 o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é órgão responsável.

A série histórica utilizada compreendeu os anos de 1975 a 2016. Os interpoladores espaciais foram aplicados à precipitação média anual e as precipitações médias do período chuvoso e seco. Através da observação do comportamento gráfico da série histórica e de estudos anteriores, definiu-se o período chuvoso de abril a outubro e o seco de maio a setembro.

A normalidade dos dados de chuva foi testada através do método de Kolmogorov - Smirnov, utilizando o software Action Stat 3 Trial. Este teste observa a máxima diferença

absoluta entre a função de distribuição acumulada assumida para os dados, no caso a Normal, e a função de distribuição empírica dos dados (PORTAL ACTION, 2017). Como critério, comparamos esta diferença com um valor crítico, para um dado nível de significância. Nesse trabalho adotou-se o nível de significância de 95%.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) da área em estudo foi obtido através da plataforma Earth Explorer mantida pela instituição United States Geological Survey (USGS). Utilizou-se as imagens da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM) com resolução espacial de 30 metros.

Os dados de altitude retirados das imagens do SRTM foram usados como variável independente no método de Mínima Curvatura e como variável secundária no processo de Cokrigagem (VIOLA et al., 2010).

Entre os métodos de interpolação utilizados está o Inverso da Distância Ponderada (IDW). Esse método faz parte dos modelos determinísticos de efeito local, que usam de critérios geométricos para determinar a influência das amostras, isto é, a maior ou menor proximidade (uma distância euclidiana) dos valores observados ao ponto que se deseja estimar. Ele é considerado o método mais simples de interpolação (SOARES, 2000).

O IDW é baseado na média ponderada, sendo atribuído peso maior ao ponto mais próximo. Assim, o peso diminui com o aumento da distância e em função do coeficiente potência α . Por isso, esse método é indicado quando a variável apresenta correlação com a distância em relação à amostra local (RIGHI; BASSO, 2016).

Segundo Watson e Philip (1985) e Mello et al. (2003), usa-se largamente esse método com o expoente 2, obtendo-se bons resultados. Nesse caso, ele recebe a denominação de inverso do quadrado da distância (IQD), sendo representado pela seguinte fórmula:

$$Pest_y = \frac{\sum_{i=1}^{15} Pobs_i \cdot d_i^{-2}}{\sum_{i=1}^{15} d_i^{-2}}$$

O cálculo do IDW foi realizado através do software ArcGis 10.1. Adotou-se como parâmetros para a realização do método que o expoente da interpolação seria 2, o número mínimo de vizinhos 10 e o máximo 15, e o setor igual 1 ou full.

A Krigagem é um método de interpolação estocástico que utiliza a geoestatística para efetuar a interpolação, e por isso, em muitos casos, tem uma grande vantagem sobre outros métodos. É utilizado o conceito de autocorrelação espacial dos pontos para estimar o valor de áreas não amostradas. A definição do grau de dependência ou correlação espacial entre as amostras é feita através de semivariogramas (CRESSIE, 1991).

O estimador da krigagem ordinária é baseado na fórmula da média ponderada, onde os ponderadores dependem da informação estrutural fornecida pelo variograma. A determinação dos ponderadores associados a cada um dos pontos estimadores baseia-se na ideia que quanto maior a covariância entre uma amostra e o local que está sendo estimado, mais essa amostra deve contribuir para a estimativa. Num método geométrico, como o do inverso do quadrado da distância, o peso entre a amostra e o local estimado também diminui à medida que a amostra fica mais distante, entretanto, as distâncias utilizadas são euclidianas. O sistema de krigagem leva em consideração tanto a distância entre amostras como o seu agrupamento (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Quando a variabilidade espacial de um fenômeno em estudo não é a mesma em todas as direções, diz-se que o fenômeno é anisotrópico. Uma vez modelado o semivariograma, é possível verificar esse nível de anisotropia dos dados, e então definir os melhores pesos para as amostras. (MAZZINI; SCHETTINI, 2009).

A determinação experimental do semivariograma para cada valor de h considera todos os pares de amostras $z(x)$ e $z(x+h)$, separadas pelo vetor distância h, a partir da equação:

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

Onde $\gamma(h)$ é o semivariograma estimado, $N(h)$ é o número de pares de valores medidos, $z(x)$ e $z(x+h)$, separados pelo vetor h (RIGBY, 2016).

Após obter o semivariograma, o valor da variável de interesse em um ponto não amostrado (x_0) pode ser calculado através da combinação linear dos pontos de dados vizinhos ($Z(x_i)$, $i=1, n$), conforme segue:

Onde λ é o peso atribuído a cada valor conhecido.

O amplo uso da krigagem se deve à simplicidade do método (média ponderada), que usa a informação estrutural fornecida pelo modelo de variograma e também porque proporciona a incerteza associada à estimativa, por meio da variância de krigagem (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A cokrigagem é uma extensão multivariada da krigagem, que permite a utilização de variáveis secundárias densamente amostradas na espacialização de uma variável primária. No mapeamento da precipitação sua importância se fundamenta na conhecida correlação existente entre esta variável e demais outras, como por exemplo, a altitude (CARVALHO; QUEIROZ, 2002; ANGÉLICO, 2006; VIOLA et al., 2010).

Nesse estudo, realizou a cokrigagem através do software ArcGis 10.1. Adotou-se como parâmetros: número mínimo de vizinhos igual a 2 e máximo igual a 5, e o setor adotado foi o tipo 8. Após analisar o semivariograma de superfície, considerou-se que os dados possuem anisotropia. Para definir qual modelo usar no semivariograma, observou-se os resultados da validação cruzada, através da comparação do valor do RMSE e do RMSE padronizado (quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste do modelo). Assim, selecionou-se o modelo esférico para construção dos semivariogramas, que é um modelo usado de forma recorrente nesse tipo de análise (MAGALHÃES et al., 2013; VIOLA et al., 2010).

A Mínima curvatura ou Spline é um método de interpolação muito aceito e utilizado atualmente. Distinto de outros métodos de interpolações polinomiais, não utiliza apenas um polinômio de grande ordem para interpolação de todo o conjunto de dados, mas sim divide a série de dados em subconjuntos e utiliza polinômios de pequenas ordens para cada subconjunto (MAZZINI; SCHETTINI, 2009).

Os polinômios são usados para criar uma superfície que minimize a curvatura da mesma, resultando numa superfície suavizada que passa através de todos os pontos da amostra (ANDRIOTTI, 2009). Devido a isso, ele se caracteriza por ser um interpolador não exato e como consequência os dados nem sempre são apresentados com seus valores reais. Existem diferentes splines e parâmetros que podem ser testados para melhor se ajustar aos pontos da amostra, mas de forma geral, o método gera um novo grid de pontos aplicando sucessivamente o modelo de regressão por mínimos quadrados sobre a grade de modo iterativo, de forma que a cada passagem consiga-se atingir um melhor nível de suavização (MEDINA, 2008).

Para a execução do método foi utilizado o software R, que possui um ambiente de desenvolvimento integrado para cálculos estatísticos.

Para verificar o ajuste dos modelos, realizou-se a validação cruzada dos dados de todos os interpoladores com o objetivo de identificar qual apresentou melhores resultados para a área em estudo. Para isso, dividiu-se de forma aleatória a amostra de postos pluviométricos em dois grupos com a mesma quantidade de amostras em cada um. E executou-se a interpolação com os três métodos para cada amostra separadamente. Assim, quando se usou os dados da amostra 1 para interpolar, os dados da amostra 2 serviram para validar, e vice e versa.

Para medir os desvios entre os valores estimados e observados calculou-se o root mean square error (RMSE) que é a raiz quadrada do erro médio quadrático (MSE). Ele mostra as diferenças individuais entre a previsão do modelo e as observações. Elevando as diferenças ao quadrado força a tratar igualmente os resultados negativos e positivos. É utilizado para medir a

magnitude do erro. Seus resultados são apresentados na mesma unidade das variáveis que estão sendo testadas (FERREIRA, 2011).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (p_n - o_n)^2}$$

Onde, N é o número de comparações, p_n é a previsão do modelo e o_n as observações.

Além disso, desenvolveram mapas de precipitação média anual, no período seco e no período chuvoso de acordo com as metodologias aplicadas, utilizando-se o programa ArcGis 10.1. A análise visual dos mapas gerados, embora seja uma análise subjetiva, é importante, uma vez que possibilita a visualização do gradiente de variação do fenômeno no espaço, propiciado pelas distintas metodologias (VIOLA et al., 2010).

3- RESULTADOS

Inicialmente, calculou-se as estatísticas associadas à precipitação média anual, no período seco e no período chuvoso (Tabela 1). É possível notar que o maior coeficiente de variação foi registrado no período seco. Os valores de média e desvio padrão para a precipitação anual e o período chuvoso foram próximos, por consequência os seus coeficientes de variação também tiveram valores aproximados.

Tabela 1. Estatísticas básicas associadas às precipitações anual, no período chuvoso e seco

Estatística	Precipitação anual	Precipitação chuvoso	Precipitação seco
Média	1526,75	1386,31	147,68
Desvio padrão	105,98	87,29	25,15
CV%	6,94%	6,30%	17,03%

Fonte: A autora, 2017

Verificou-se também se os dados de precipitação média anual, e precipitações médias no período seco e chuvoso possuem distribuição normal. Os resultados obtidos através do teste de Kolmogorov – Smirnov são mostrados na Tabela 2:

Tabela 2. Resultados do teste de normalidade de Kolmogorov – Smirnov

Precipitação	P-valores
Anual	0,4296
Seco	0,3915
Chuvoso	0,1963

Fonte: A autora, 2017

Como todos os valores P foram superiores a 0,05, com nível de confiança de 95%, temos evidências de que os dados seguem uma distribuição normal. Observar esse comportamento dos dados é importante, pois a presença de distribuição assimétrica, com muitos valores anômalos pode prejudicar os resultados da interpolação.

A validação cruzada foi executada para cada um dos métodos e para cada período estudado, os valores de RMSE encontrados são mostrados na Tabela 3:

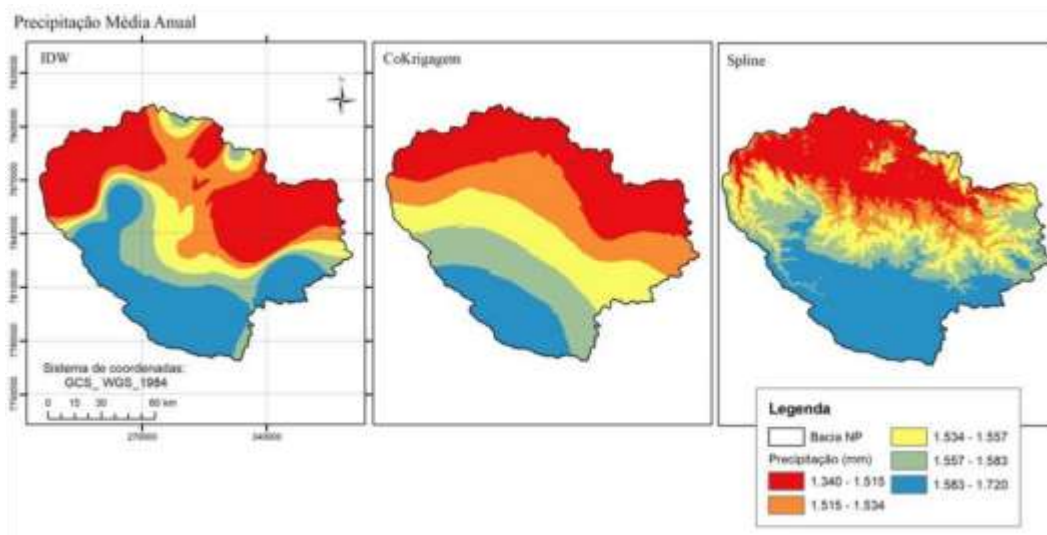
Tabela 3. Resultados da validação cruzada para precipitação média anual, período chuvoso e período seco

Métodos	Anual			Chuvoso			Seco		
	Teste 1	Teste 2	Média	Teste 1	Teste 2	média	Teste 1	Teste 2	média
IDW (x,y)	104,74	92,12	98,43	104,92	89,24	97,08	12,97	9,15	11,06
Cokrigagem (x,y)+z	92,56	96,51	94,54	90,84	82,42	86,63	11,01	9,30	10,15
Spline (x,y,z)	87,36	68,55	77,96	84,42	66,39	75,40	9,62	9,74	9,68

Fonte: A autora, 2017

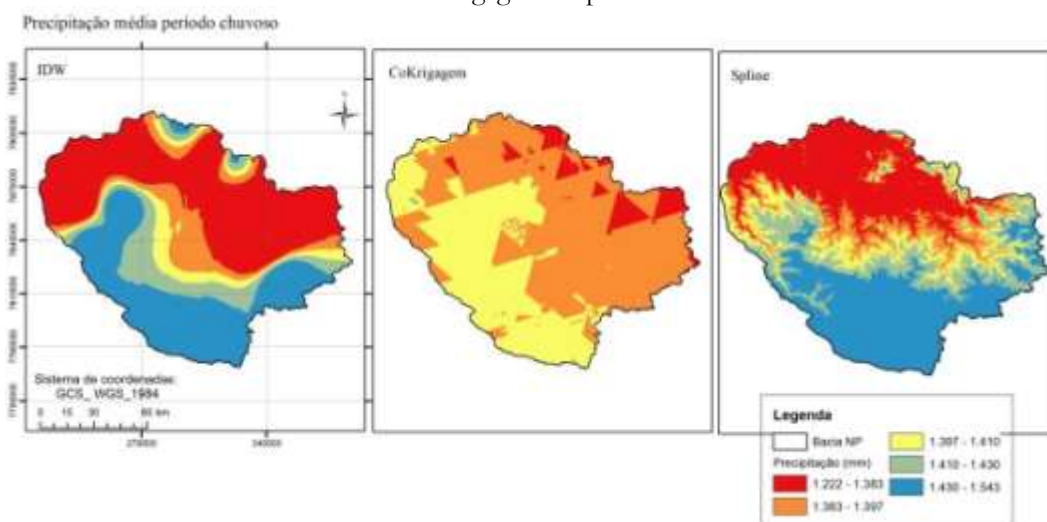
Os valores de RMSE encontrados indicam que o interpolador Spline forneceu a melhor predição da chuva tanto anual, quanto nos períodos chuvoso e seco. A Cokrigagem teve resultados intermediários e o IDW os piores ajustes. Esses resultados evidenciam que o uso da altitude como covariável, no caso da Cokrigagem, e como variável independente (Spline) gerou valores interpolados com menor desvio em relação aos valores reais. Construiu-se cartogramas com os resultados da interpolação gerados pelos três métodos de interpolação para os três períodos estudados (Figuras 2, 3 e 4). Apesar da observação dos mapas ser uma avaliação subjetiva, ela é de grande importância, pois permite analisar como ficou a distribuição espacial da precipitação após ser interpolada.

Figura 2. Interpolação da precipitação média anual através do IDW, Cokrigagem e Spline



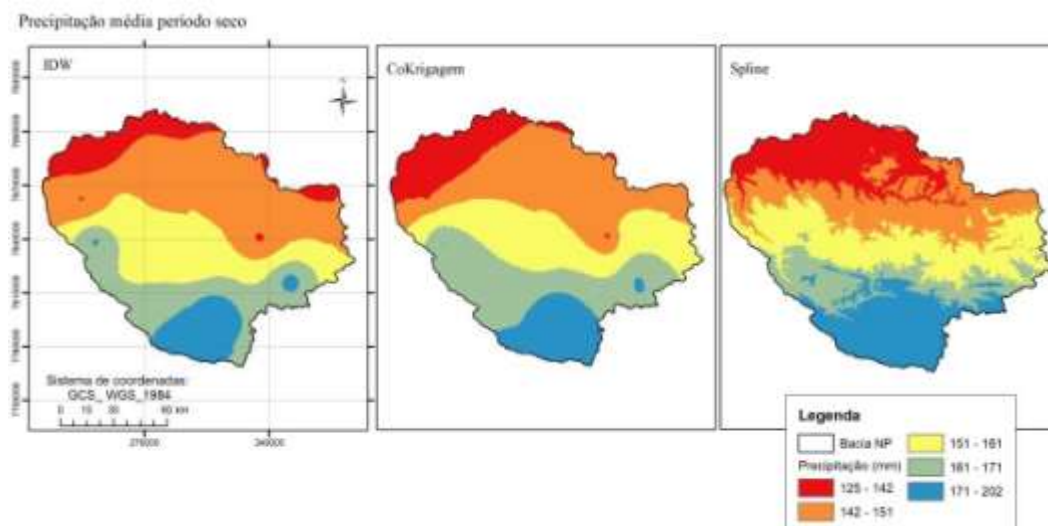
Fonte: A autora, 2017

Figura 3. Interpolação da precipitação média no período chuvoso através do IDW, Cokrigagem e Spline



Fonte: A autora, 2017

Figura 4. Interpolação da precipitação média no período seco através do IDW, Cokrigagem e Spline



Fonte: A autora, 2017

Ao comparar a precipitação no período chuvoso com a anual nota-se grande semelhança na forma de distribuição da chuva, com os valores diminuindo à medida que se aproxima da região mais ao Norte, com exceção da interpolação realizada através da krigagem que teve um comportamento para o período chuvoso muito diferente do período anual. Esse padrão também foi em parte observado no período seco, mas a simetria da distribuição espacial, nesse caso, não foi tão marcante.

Observa-se analisando os mapas de interpolação e a Figura 1, que os maiores valores de precipitação ocorreram nas áreas de maior altitude, e os menores valores nos locais mais baixos, essa relação é facilmente notada pelos mapas gerados através do Spline, mas também pode ser percebida nos cartogramas dos demais métodos. Uma possível explicação para isso é que quando uma massa de ar se aproxima de uma montanha ela é forçada a subir atingindo temperaturas mais baixas, o que ocasiona a precipitação (FARIA, 2017).

4- CONCLUSÕES

Todos os valores de RMSE encontrados foram considerados aceitáveis, entretanto, o Spline ou mínima curvatura utilizando a altitude como variável independente foi o método com melhor desempenho na estimação da precipitação na bacia do Reservatório de Nova Ponte em todos os períodos estudados, anual, médio e seco. O IDW foi o método com piores resultados, e a Cokrigagem teve uma performance intermediária.

A análise dos mapas mostrou que a intensidade de chuvas na região é decrescente no sentido Sul-Norte, e que as regiões de maiores altitudes possuem maior precipitação média, e o inverso ocorre nas regiões mais baixas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOTTI, J. L. S. Fundamentos de Estatística e Geoestatística. São Leopoldo, RS: Unisinos. 2ª reimpressão, 2009.

ANGÉLICO, J. C. Desempenho da cokrigagem na determinação da variabilidade de atributos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, n.6, p.931-936, 2006.

BRASIL, 1992. Normais Climatológicas (1960-1990). Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação Departamento Nacional de Meteorologia, Brasília, Brasil.

BURROUGH, P. A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Oxford: Clarendon Press, 1986. 193 p.

CARVALHO, J. R. P. DE; QUEIROZ, E. F. de. Uso de cokrigagem colocalizada na determinação da distribuição espacial de precipitação. Campinas: EMBRAPA, 2002. 4p. Boletim Técnico.

CONTI, G.N. Estimativa da precipitação através de técnicas de sensoriamento remoto: Estudo de caso para o estado do Rio Grande do Sul. Dissertação de mestrado, IPH, UFRGS, 2002.

CRESSIE, N. Statistics for spatial data. New York: John Wiley and Sons Inc., 1991.

FARIA, C. Clima de altitude. Disponível em: <www.infoescola.com/geografia/clima-dealtitude>. Acessado em: 01 dez. 2017.

FERREIRA, S. P. Estudo comparativo do pós-processamento estatístico aplicado ao modelo BRAMS. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

GOOVAERTS, P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology, Michigan*, v.228, n.2, p. 113-129, 2000.

MAGALHÃES, I. A. L.; ALMEIDA K. L.; LIMA, R.; GARDIMAN B. S. J. ZANETTI, S. Z.; CECÍLIO, R. A. Análise de métodos de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na região Norte do estado do Espírito Santo, Brasil. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu*, p.5651-5657, 18 abr. 2013.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v. 13, n. 1, p. 53-64, 2009.

MEDINA, A.S; QUINTAS, M.C.L. O Método de Interpolação de Curvatura Mínima. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 8-11 set. 2008.

MELLO, C. R. DE; VIOLA, M. R.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M. Continuidade espacial de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. *Ciência Agrotecnologia*, v.32, n.2, p.532-539, 2008.

PDRH ARAGUARI. Resumo executivo Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Araguari. 2011.

PORTAL ACTION. Teste de Kolmogorov-Smirnov. 2017.

RIGHI, E. BASSO, L. A. Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas. *Ambiência Guarapuava, Paraná*, v.12 n.1 p. 101 - 117, 2016.

SILVA, V. S. V. Estimativa de precipitação pontual em diferentes escalas para uso em modelo concentrado chuva-vazão. Dissertação de Mestrado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SOARES A. Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2006.

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.

WATSON, D. F.; PHILIP, G. M. A Refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geoprocessing*, v.2, p.315-327, 1985.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M, B. Geoestatística: Conceitos e Aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.