



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO *DEL-REI*
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL
CAMPUS SETE LAGOAS**

RAFAEL GONÇALVES DE PAULA REIS

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES INTERPOLADORES ESPACIAIS EM
DADOS DE TEMPERATURA DO AR**

**SeteLagoas
2024**

RAFAEL GONÇALVES DE PAULA REIS

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES INTERPOLADORES ESPACIAIS EM
DADOS DE TEMPERATURA DO AR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Florestal da Universidade
Federal de São João del-Rei – *campus* Sete Lagoas,
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Eduardo Marcatti

**Sete Lagoas
2024**

RAFAEL GONÇALVES DE PAULA REIS

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES INTERPOLADORES ESPACIAIS EM
DADOS DE TEMPERATURA DO AR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Florestal da Universidade
Federal de São João del-Rei – *campus* Sete Lagoas,
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Florestal.

Sete Lagoas, 08 de Setembro de 2024

Prof. Dr. Gustavo Edurado Marcatti – UFSJ

Prof. Dr. Getulio Fonseca Domingues – UFMG

Prof. Dr. Renato Vinícius Oliveira Castro – UFSJ

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Vicente e Cinara pelo apoio e incentivo que serviram de alicerce para as minhas realizações.

A minha irmã Natália pela amizade e atenção dedicadas sempre que precisei.

A todos os professores do curso pelas várias contribuições dadas durante o curso.

RESUMO

A interpolação espacial é comumente aplicada no setor agroflorestal, visto que dificilmente pesquisadores e produtores conseguem ter controle das variáveis climáticas devido a extensa quantidade de áreas. O objetivo deste trabalho foi realizar uma avaliação comparativa da eficiência e precisão de diferentes métodos de interpolação espacial aplicados a uma variável climática específica, temperatura do ar. Foram utilizados dados de temperatura do ar da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET referentes à média dos anos 2000 até 2020 para todo o Estado de Minas Gerais. A avaliação dos interpoladores se deu pelos métodos do polígono de Voronoi, Interpolação por Peso de Distância Inversa – IDW e pela Krigagem Ordinária. Os diferentes interpoladores apresentam diferentes comportamentos entre si e permite a discriminação de diferentes áreas nos mapas gerados. Para a interpolação de temperatura médias do ar no estado de Minas Gerais, a Krigagem Ordinária pode ser recomendada em detrimento do IDW e dos polígonos de Voronoi.

Palavras-chave: Polígono de Voronoi. Peso de Distância Inversa. Krigagem Ordinária.

ABSTRACT

Spatial interpolation is commonly applied in agroforestry, as researchers and producers often struggle to control climatic variables due to the vast areas involved. The objective of this study was to conduct a comparative evaluation of the efficiency and precision of different spatial interpolation methods applied to a specific climatic variable, air temperature. Air temperature data from the National Institute of Meteorology (INMET) database, averaged from 2000 to 2020, for the entire state of Minas Gerais, were utilized. The evaluation of the interpolators was carried out using Voronoi polygons, Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation, and Ordinary Kriging. The different interpolators exhibit various behaviors and allow for the discrimination of different areas in the generated maps. For the interpolation of mean air temperatures in the state of Minas Gerais, Ordinary Kriging can be recommended over IDW and Voronoi polygons.

Keywords: Voronoi Polygon. Inverse Distance Weighting. Ordinary Kriging.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. MATERIAIS E MÉTODOS	9
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
4. CONCLUSÃO.....	12
5. REFERÊNCIAS.....	13

1. INTRODUÇÃO

A interpolação espacial é frequentemente utilizada e de grande importância no setor agroflorestal, visto que as áreas de cultivo são extensas e é praticamente impossível se obter informações precisas sobre toda a área, devido principalmente ao desprendimento de recursos e mão-de-obra específica que são necessários para tal fim (Gasparini et al., 2015). Neste sentido, a amostragem e posterior estimativa para área total fornece informações precisas e de confiança para que pesquisadores, bem como produtores rurais possam planejar suas decisões de forma mais assertiva (Sales et al., 2007; Da Silva et al., 2019).

Atualmente, existem vários tipos de interpoladores espaciais disponíveis, o que torna o processo de predição da distribuição espacial dinâmico, visto que o usuário pode lançar mão destes vários interpoladores e escolher o que melhor se aplica aos seus dados. Os métodos do polígonos de Voronoi, Inverso da Distância Ponderada (IDW), e Krigagem são os comumente utilizados. Os polígonos de Voronoi dividem o espaço em células que representam a região mais próxima de cada ponto de amostragem, permitindo a interpolação com base na proximidade espacial. O IDW atribui pesos inversamente proporcionais à distância dos pontos vizinhos, priorizando os pontos mais próximos na interpolação. Por sua vez, a Krigagem utiliza modelos estatísticos para estimar valores desconhecidos, considerando a variabilidade espacial e a covariância entre os pontos amostrais (Perin et al., 2015; Righi e Basso 2016).

Diante destes métodos, o monitoramento de dados climáticos pode se tornar indispensável no setor agroflorestal, visto que permite que tais elementos climáticos sejam avaliados constantemente, contribuindo para o planejamento e a gestão sustentável das atividades agrícolas e florestais. Portanto, estas ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto possibilitam a aplicação de modelos matemáticos que, por sua vez, permitem o estudo detalhado de extensas áreas com baixa densidade de estações meteorológicas. Através da interpolação de dados climáticos, como exemplo da precipitação pluvial, temperatura do ar e pressão atmosférica, é possível obter uma distribuição espacial e sazonal precisa desses elementos, essencial para a previsão e mitigação de riscos climáticos. Dessa forma, a modelagem climática não só auxilia na simulação de processos e predição de efeitos resultantes das mudanças climáticas, como também fornece informações para a tomada de decisão no manejo agroflorestal, bem como na gestão de recursos naturais (Martins, Santos Alves e Damasceno, 2019).

Assim, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma avaliação comparativa da eficiência e precisão de diferentes métodos de interpolação espacial aplicados a uma variável

climática específica, a temperatura do ar.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização desse estudo foram utilizados dados de temperatura do ar de 614 estações meteorológicas a partir da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, referentes à média dos anos 2000 até 2020 para todos os estados da federação. No processamento dos dados, utilizou-se a Triangulação de Delaunay inerentes a todos os pontos/estações. Subsequente, selecionou-se os pontos/estações da área de interesse (Estado de Minas Gerais) interseccionados ao polígono de Delaunay, e realizou-se o recorte.

As tarefas de interpolação foram realizadas a partir de plugins do software QGIS 3.22.5 específicos para cada tipo de interpolador. O polígono de Voronoi foi processado pelo Plugin *Voronoi polygons* com a aplicação de um buffer igual à 5%. O processamento da Interpolação por Peso de Distância Inversa – IDW foi realizado pelo plugin *IDW interpolation* adotando um coeficiente de distância P igual à 2. Por fim, a Krigagem Ordinária foi implementada com o auxílio do plugin *Smart-Map*.

Para a avaliação dos interpoladores, utilizou-se a análise visual dos mapas gerados. Embora consista em uma análise subjetiva, ela possibilita a visualização do gradiente de variação do fenômeno no espaço, propiciado pelas distintas metodologias (Viola et al., 2010). Ademais, utilizou-se a validação cruzada *k fold*, mais especificamente o método *leave-one-out*, *k* e *que k* é igual ao número total de parâmetros. Essa técnica envolve a remoção de uma amostra do conjunto de dados, chamada de pontos de validação, para estimar seu valor utilizando diferentes métodos de interpolação com os dados restantes. Neste estudo em particular, foi utilizado 20% dos pontos como pontos de validação para a avaliação dos métodos de interpolação. Para avaliar o desempenho dos modelos, utilizou-se o cálculo da magnitude dos erros por meio da raiz do erro médio quadrático (RMSE - *Root Mean Square Error*) (Equação 1) e o coeficiente de determinação R^2 . Por fim, também utilizou-se a verificação visual da coerência na interpolação para verificar a coerência do resultado em relação ao que é esperado.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2} \text{ (Equação 1)}$$

Em que: n é o número de amostras, y_i é o valor observado da amostra i , e p_i é o valor predito pelo modelo para a amostra i .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos métodos de interpolação empregados apresentam diferentes comportamentos entre si, conforme disposto na Figura 1. A Krigagem Ordinária e o IDW têm semelhanças na geração do mapa de temperatura, diferindo do método de Voronoi. Os dois primeiros métodos classificaram as regiões do Norte do estado de Minas Gerais e o Triângulo Mineiro de maneiras similares. Já na região sul do estado, embora haja uma tendência de baixas temperaturas, é evidenciado um padrão de suavização para a Krigagem Ordinária em direção à região central do estado, ao passo que o IDW tende a manter menores temperaturas nas mesmas localidades, formando círculos concêntricos ao redor de alguns pontos.

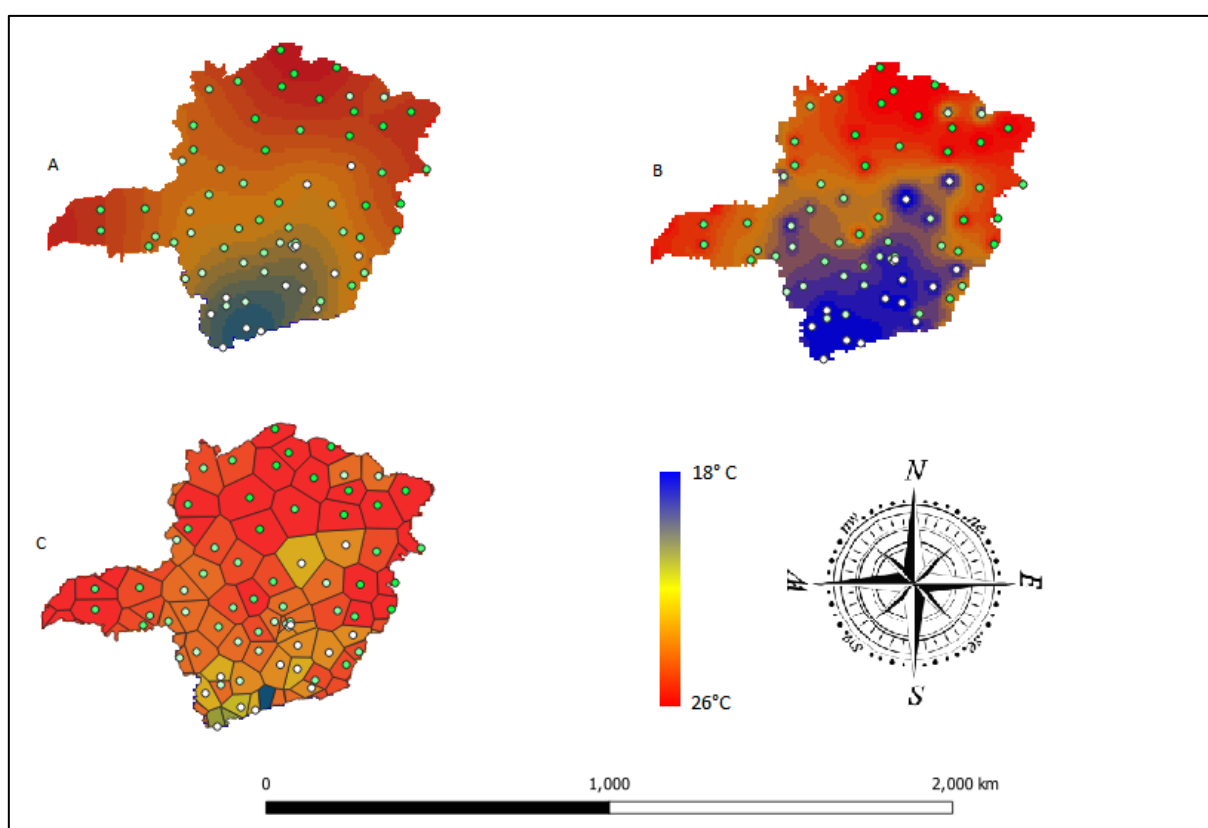


Figura 1 – Mapas de interpolação do estado de Minas Gerais – Brasil para temperatura do ar utilizando a Krigagem Ordinária (A), Inverso da Distância Ponderada – IDW (B) e Polígonos de Voronoi (C). Os pontos nos mapas referem-se às estações meteorológicas utilizadas. Os pontos verdes são pontos de maior temperatura e os brancos são de menores temperatura.

O método de Voronoi foi o menos preciso dentro dos métodos de interpolação avaliados nesse estudo (Figura 1C). Ele apresentou maiores valores de RMSE e menores valores de coeficiente de determinação (R^2) que os demais interpoladores, denotando menor precisão para as estimativas de temperatura do ar. Tal método consiste na geração de

polígonos que presumem homogeneidade do atributo para a região geográfica dentro de seus limites assumindo valores iguais aos pontos amostrais. Todavia, variáveis climatológicas como a temperatura do ar dificilmente serão homogêneas à grandes áreas, uma vez que ela é dependente de multi-fatores tais quais altitude, umidade, tipo de vegetação, ventos entre outros. Atualmente, o emprego de tal metodologia é cada vez menor devido a sua inferioridade a outros métodos (Furtado et al., 2017)

O interpolador IDW tem como premissa que pontos próximos possuem valores similares, enquanto pontos distantes são independentes. Em outras palavras, os pontos amostrados mais próximos do ponto a ser interpolado têm maior influência do que aqueles amostrados a distância (EL-SHEIMY et al., 2005). Ademais, ele apresenta uma maior fidelidade para a área mais próxima aos pontos amostrais justificado pela presença de círculos concêntricos ao seu entorno (Figura 1B). Todavia, regiões afastadas dos pontos amostrados podem ter baixa correlação frente aos dados reais, uma vez que o ponto passa a ter uma menor influência na interpolação (Farias et al., 2017).

Diferentemente, para a Krigagem Ordinária, não são observados a ocorrência de tais círculos, uma vez que no método da Krigagem há o ajuste de uma superfície de tendência distribuída para a vizinhança, caracterizando assim uma superfície mais suavizada. O fato de o IDW apresentar tal padrão pode ser decorrente do expoente utilizado no denominador dos estimadores. Quanto maior for o expoente, maior será a área de influência do ponto amostral e, desse modo, maiores serão os círculos concêntricos. Assim, ao se usar menores expoentes no denominador, maior é o efeito de suavização entre os pontos amostrais, aproximando-se dos resultados da Krigagem.

O padrão similar de predição de temperatura dos métodos de Krigagem Ordinária e IDW é notado ao se comparar os mapas dos interpoladores (Figuras 1A; B). Ambas as metodologias são superiores aos Polígonos de Voronoi, sobretudo a Krigagem Ordinária, que apresentou menores valores de RMSE e maiores valores de R^2 (Tabela 1). Todavia, é importante ficar atento ao comportamento de formação de círculos concêntricos apresentados pelo IDW. Em algumas situações, a formação de círculos de menor temperatura que a sua vizinhança pode estar relacionada à altitude, onde se espera que haja menores temperaturas (Fritzsos, Mantovani e Wrege, 2016). Todavia, este trabalho não teve como objetivo avaliar tal hipótese.

De maneira geral, os resultados encontrados são similares a alguns vistos na literatura cujo foco são outras classes. A Krigagem Ordinária vêm sendo recomendada para mapeamentos de fertilidade de solo, batimetria de superfície, mapeamentos de modelos digital

de elevação - MDE, distribuição de precipitação e modelagem de distribuição de florestas (Silva et al., 2008; Ferreira et al., 2017; Furtado et al., 2017; Munyati e Sinthumule, 2021; Gomes et al., 2022). Perin et al. (2015), em um levantamento de artigos científicos que utilizaram diferentes interpoladores, identifica que a Krigagem é o método mais utilizado pela maioria deles para a interpolação de dados de temperatura, em vista ao IDW.

Tabela 1 – Raiz do erro médio quadrático (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2) da validação para os métodos do inverso da distância ponderado (IDW), Polígono de Voronoi e Krigagem Ordinária.

Parâmetro	IDW	Polígono de Voronoi	Krigagem Ordinária
RMSE	1.2706	1.3235	0.8627
R^2	0.8445	0.8052	0.9135

Embora a Krigagem Ordinária tenha se mostrado superior para este estudo, é importante ressaltar que outros métodos, como o IDW, podem apresentar desempenho superior dependendo do objeto de estudo. Em situações específicas, como no mapeamento da distribuição de savanas, estudos de contaminação de lençóis freáticos e pH do solo, o IDW demonstrou desempenho superior ao da Krigagem Ordinária (Gong, Mattevada e O'Bryant, 2014; Wu e Hung, 2016; Munyati e Sinthumule, 2021). Não existe um interpolador universalmente superior, a escolha do método ideal depende das características dos dados e dos objetivos da análise. A Krigagem Ordinária é particularmente eficaz quando se busca modelar a variabilidade espacial e considerar a correlação entre pontos, sendo ideal para análises geostatísticas e geração de mapas suavizados. Por outro lado, o IDW é mais simples e rápido, adequado para dados com distribuição relativamente uniforme e situações onde se prefere uma abordagem menos complexa. Além disso, a Krigagem é mais complexa computacionalmente, enquanto o IDW é menos exigente e mais rápido, o que pode ser vantajoso para grandes conjuntos de dados.

4. CONCLUSÃO

Para a interpolação de temperatura médias no estado de Minas Gerais – Brasil, a Krigagem Ordinária pode ser recomendada em detrimento do IDW e dos polígonos de Voronoi.

5. REFERÊNCIAS

- Da Silva, H. M., & Sarnighausen, V. C. R. (2021). Análise geoestatística de séries temporais de temperatura do ar, evapotranspiração de referência e precipitação pluvial. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 12(3), 710-717.
- El-Sheimy, N., Valeo, C., & Habib, A. (2005). Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications. (Artech House).
- Farias, C. S., Veiga, J. A. P., Oliveira, E., & de Queiroz, M. R. (2017). Análise do evento extremo chuvoso de 30 de setembro de 2013 ocorrido na cidade de Manaus. *Ciência e Natura*, 39(2), 436-450.
- Ferreira, I. O., Rodrigues, D. D., Santos, G. R. D., & Rosa, L. M. F. (2017). In bathymetric surfaces: IDW or Kriging?. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 23, 493-508.
- Fritzsos, E., Mantovani, L. E., & Wrege, M. S. (2016). Relação entre altitude e temperatura: uma contribuição ao zoneamento climático no estado de Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 18.
- Furtado, L., Pereira, C., & Castro, A. D. C. (2017). Análise de métodos de interpolação para a espacialização da precipitação pluviométrica da região metropolitana de Belém e Nordeste paraense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27.; EXPOCART, 26., 2017, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, 2017.
- Gasparini, K. A. C., Fonseca, M. D. S., Pastro, M. S., Lacerda, L. C., & Santos, A. R. D. (2015). Zoneamento agroclimático da cultura do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) para o estado do Espírito Santo. *Revista Ciência Agronômica*, 46, 707-717.
- Gomes, F. C. M., Zaidan, R. T., & Rocha, C. H. B. (2022). Análise comparativa entre a aplicação de métodos de interpolação, para a geração de modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(5), 2448-2462.
- Gong, G., Matveeva, S., & O'Bryant, S. E. (2014). Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas. *Environmental research*, 130, 59-69.
- Martins, A. P., Alves, W. S., & Damasceno, C. E. (2019). Avaliação de métodos de interpolação para espacialização de dados de temperatura do ar na bacia do Rio Paranaíba-Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 25.
- Munyati, C., & Sinthumule, N. I. (2021). Comparative suitability of ordinary kriging and Inverse Distance Weighted interpolation for indicating intactness gradients on threatened savannah woodland and forest stands. *Environmental and Sustainability Indicators*, 12, 100151.
- ORG, Q. (2020). QGIS Geographic Information System. Open-Source Geospatial Foundation Project.

Perin, E. B., de Novaes Vianna, L. F., da Silva MASSIGNM, W., & PANDOLFO, C. (2015). Interpolação das variáveis climáticas temperatura do ar e precipitação: revisão dos métodos mais eficientes. *Geografia*, 40(2), 269-289.

QGIS Development Team, 2023. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

Righi, E., & Basso, L. A. (2016). Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas. *Ambiência. Guarapuava (PR)*. Vol. 12, n. 1 (jan./abr. 2016), p. 101-117.

Sales, M. H., Souza Jr, C. M., Kyriakidis, P. C., Roberts, D. A., & Vidal, E. (2007). Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: A case study for Rondônia, Brazil. *ecological modelling*, 205(1-2), 221-230.

Silva, S. D. A., Souza Lima, J. S. D., Souza, G. S. D., & Oliveira, R. B. D. (2008). Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. *Idesia (Arica)*, 26(2), 75-81.

Viola, M. R., Mello, C. R. D., Pinto, D. B., Mello, J. M. D., & Ávila, L. F. (2010). Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14, 970-978.

Wu, Y. H., & Hung, M. C. (2016). Comparison of spatial interpolation techniques using visualization and quantitative assessment. *Applications of spatial statistics*, 17-34.