

VARIABILIDADE ESPACIAL PLUVIOMÉTRICA NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO: UMA ABORDAGEM GEOESTATÍSTICA

Autores: Luckencia Jean¹, Joan Muthoni Migwi¹, Rhaony da Cruz Rocha¹, Mirna Aparecida Neves², Fabricia Benda de Oliveira¹.

¹Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) / Centro de Ciências Humanas e Naturais (CCHN) / Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGG)
Avenida Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória/ES Brasil Cep.: 29075-910
jeanluckencia08@gmail.com, migwibynum@gmail.com, rhaonyrocha@gmail.com, fabricia.oliveira@ufes.br.

² Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) / Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde (CCENS) / Departamento de Geologia e Programa de Pós-graduação em Agroquímica (PPGAQ)
Alto Universitário, s/n, Guararema, Alegre/ES Brasil Cep.: 29500-000
mirna.neves@ufes.br.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade espacial das precipitações no Estado do Espírito Santo utilizando técnicas geoestatísticas. A metodologia envolveu a coleta de dados pluviométricos disponíveis no portal do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper), seguida da análise descritiva e da análise espacial desses dados de precipitação. Os resultados demonstraram que a precipitação não ocorre de forma homogênea no território, apresentando variações significativas, concentrada nas áreas litorâneas e nas regiões de maior altitude. A aplicação da geoestatística mostrou-se eficaz na representação da continuidade espacial dos dados, permitindo a elaboração de mapas mais precisos e robustos para a avaliação da disponibilidade hídrica. Conclui-se que a integração da geoestatística às análises pluviométricas contribui significativamente para fornecer informações tanto para apoiar a gestão sustentável de recursos hídricos com base em evidências, quanto os projetos que visam adaptação das comunidades às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Interpolação. Recursos hídricos. Planejamento territorial.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra - Geociências

Introdução

As mudanças climáticas têm impactado significativamente o clima global, especialmente com o aumento das emissões de gases de efeito estufa, resultando em alterações nos regimes de precipitação, como chuvas intensas e secas prolongadas (IPCC, 2021). O estudo da pluviometria é vital, pois serve como indicador central da dinâmica atmosférica e influencia a gestão de recursos hídricos e a segurança alimentar (Marengo; Torres; Alves, 2017).

No Sudeste Brasileiro, a variabilidade das precipitações é acentuada, tornando essencial compreender sua distribuição para o planejamento territorial e adaptação às mudanças climáticas (Biasutti, 2019). Essa variabilidade é influenciada por fatores como altitude, relevo e circulação atmosférica, resultando em heterogeneidade que limita a aplicação de métodos estatísticos clássicos (Souza *et al.*, 2016). A geoestatística surge como uma ferramenta eficaz para analisar essa variabilidade, permitindo explorar estruturas espaciais por meio de variogramas e krigagem (Chiles, 2004). Estudos como os de Cardoso e Silva (2025) e Marengo, Torres e Alves (2017) ressaltam a relevância dessa abordagem.

Diante disso, este trabalho propõe analisar a variabilidade espacial da pluviosidade no Espírito Santo utilizando métodos geoestatísticos, com o objetivo de fornecer informações científicas para a gestão sustentável da água e a adaptação das comunidades às mudanças climáticas.

Metodologia

O Espírito Santo, localizado na região Sudeste do Brasil, abrange cerca de 46.074 km², representando cerca de 0,5% do território nacional (IBGE, 2022). O relevo combina planície costeira e planalto atlântico, influenciando a distribuição das precipitações (Marengo; Torres; Alves, 2017). O clima é tropical, com precipitações anuais variando de 1.000 a 1.500 mm e uma estação chuvosa de outubro a março (Marengo; Torres; Alves, 2017).

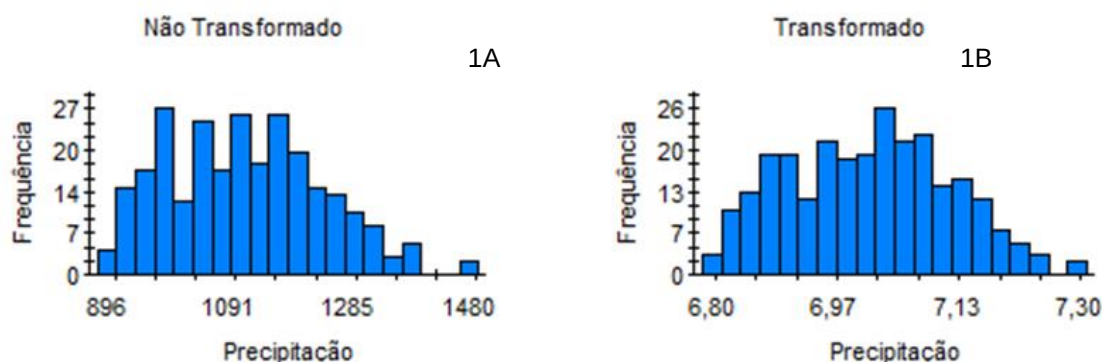
Os dados pluviométricos anuais utilizados são provenientes do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper) na seção “Planilhas de dados Meteorológicos e Agrometeorológicos via Sensoriamento Remoto” e abrangem o período de 1981 a 2023, organizados em 261 distritos do estado. Os dados brutos foram consolidados e integrados ao *software* de processamento geoestatístico GS+ 7.0.

A análise estatística inicial incluiu medidas de tendência central e dispersão para garantir a possibilidade de aplicação dos conceitos geoestatísticos. A distribuição anual da precipitação foi avaliada quanto à estatística descritiva, determinando sua normalidade e caracterizando a variabilidade relativa por meio do coeficiente de variação (Robertson, 2008). A análise da distribuição espacial foi realizada com base em semivariogramas, quantificando a dependência espacial dos dados e determinando a variabilidade com base na distância entre os pontos.

Resultados e discussão

A análise estatística dos dados pluviométricos médios anuais não transformados na Figura 1A mostrou que a variável apresentou média de 1117,8 mm, desvio-padrão de 124,9 mm e valores variando entre 896 e 1480 mm, considerando 261 observações válidas. A distribuição indicou leve assimetria positiva ($skewness = 0,31$) e curtose negativa ($-0,54$), sugerindo uma forma levemente achatada, com cauda alongada em direção aos valores mais altos. Com o objetivo de melhorar a distribuição, foi aplicada a transformação logarítmica. O histograma dos dados transformados (Figura 1B) revelou uma distribuição mais regular e simétrica. A média foi reduzida para 7,013, com desvio-padrão de 0,111 e variância de 0,0123, refletindo uma normalização e estabilização mais adequada da variância. Os coeficientes de assimetria (0,10) e curtose ($-0,76$) também demonstraram que a distribuição se aproximou mais da normalidade, condição desejável para a aplicação da krigagem e de outras técnicas geoestatísticas que assumem normalidade dos dados (Chow; Maidment; Mays, 1988).

Figura 1- Distribuição de Frequência (1A) Antes e (1B) Depois da Transformação.



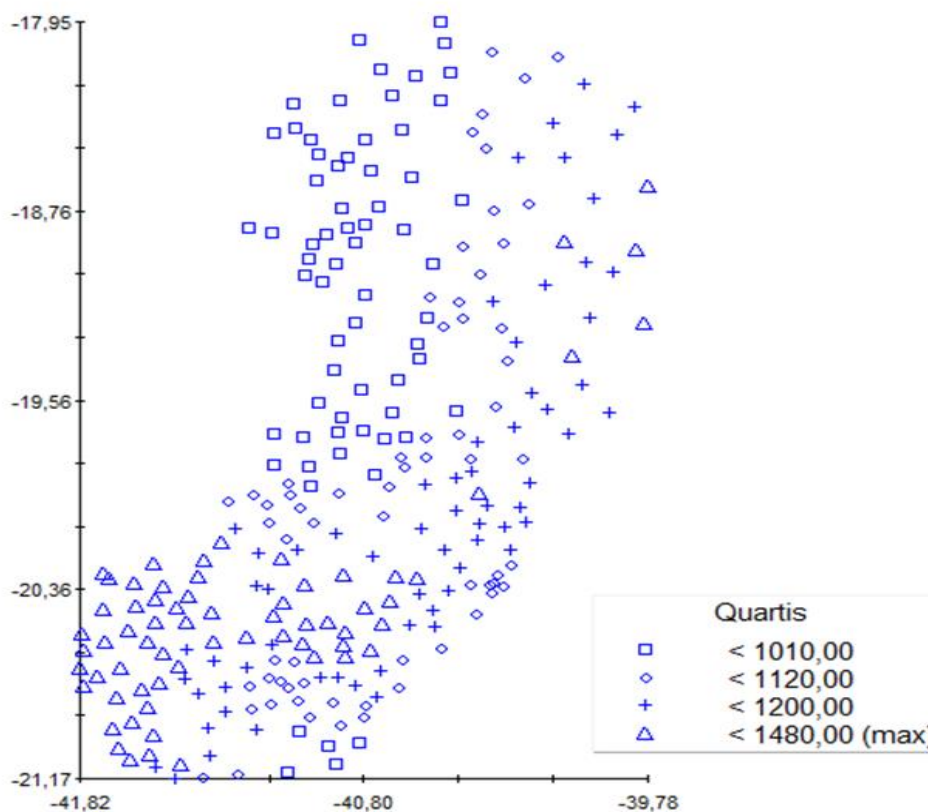
Fonte: Autores (2025).

Na Figura 2, cada ponto está representado por símbolos diferentes (círculos, quadrados e triângulos), que indicam os quartis dos valores medidos, conforme a legenda à direita: do menor quartil até os valores máximos. Essa representação permite identificar a variabilidade espacial dos dados, destacando áreas com maior concentração de valores altos ou baixos e sugerindo possíveis padrões ou tendências na distribuição. A visualização é fundamental para compreender a estrutura dos dados antes da interpolação, pois auxilia na detecção de anomalias, agrupamentos e gradientes que

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

influenciarão diretamente o ajuste do semivariograma e a qualidade das estimativas geradas pela krigagem (Cressie, 1993).

Figura 2 - Plotagem espacial dos pontos amostrais utilizados na análise geoestatística, distribuídos em um sistema de coordenadas geográficas.



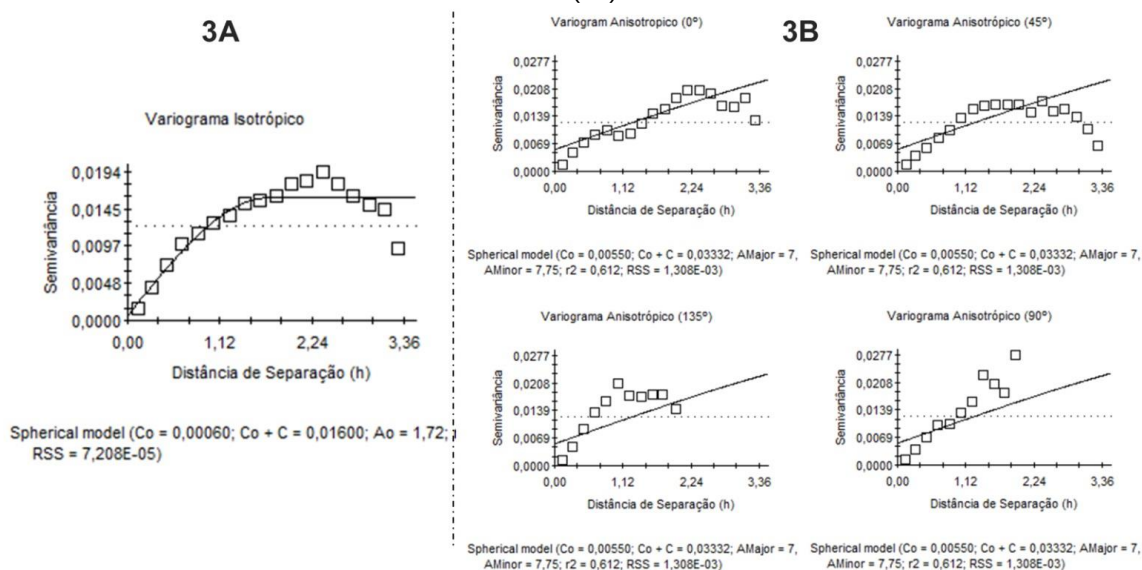
Fonte: Autores (2025).

O semivariograma isotrópico mostrou o aumento da semivariância com a distância, até atingir um patamar que indica a máxima correlação espacial. Os variogramas anisotrópicos revelaram variações conforme direções testadas, sugerindo a presença de anisotropia (Cressie, 1993).

O modelo de semivariograma isotrópico ajustado foi do tipo esférico, caracterizado por efeito pepita (*nugget*) muito baixo (0,0006), variância estrutural de 0,016 e alcance de 1,724. De acordo com a classificação proposta por Cambardella et al. (1994), a baixa proporção do efeito pepita em relação à variância total indica forte dependência espacial, uma vez que 96,3% da variância é explicada pela estrutura espacial. A Figura 3B, referente aos variogramas anisotrópicos (0°, 45°, 90° e 135°), revelou um efeito pepita mais elevado ($C_0 = 0,0055$) e uma variância total superior (0,03332) em comparação ao variograma isotrópico, além de alcances distintos conforme a direção. Nas direções de 0° e 90° observou-se menor continuidade espacial, enquanto nas direções de 45° e 135° a maior continuidade sugere que a pluviosidade mantém uma relação espacial mais estável ao longo de distâncias maiores, possivelmente influenciada por fatores estruturais do relevo e pela orientação da costa.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

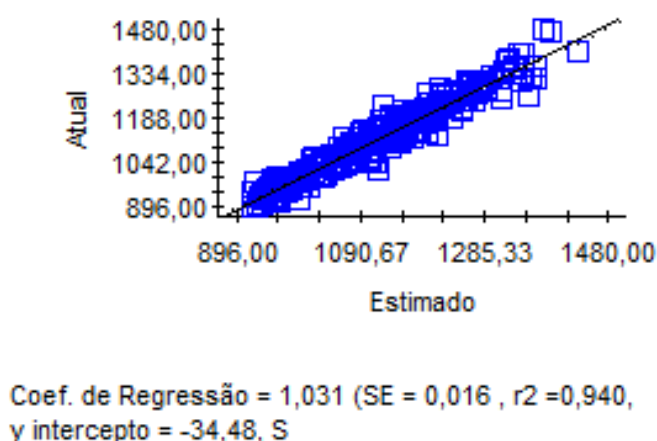
Figura 3 – Representação do semivariograma isotrópico (3A) e dos semivariogramas anisotrópicos ajustados. (3B).



Fonte: Autores (2025).

A interpolação foi realizada por krigagem ordinária (*point kriging*), em uma malha regular, considerando um raio de busca de 3,36 e vizinhança definida com base na estrutura do semivariograma. A validação cruzada confirmou a qualidade do modelo, apresentando forte correlação entre valores observados e estimados ($R^2 = 0,940$) e coeficiente de regressão próximo de 1, o que evidencia a ausência de viés sistemático e a adequação do modelo esférico para representar a variabilidade espacial (Figura 4). Esses resultados demonstram que a krigagem ordinária, calibrada a partir do modelo esférico ajustado, foi eficaz para representar a continuidade espacial dos dados pluviométricos, permitindo previsões confiáveis e robustas para o mapeamento (Goovaert, 2000).

Figura 4 - Validação Cruzada.



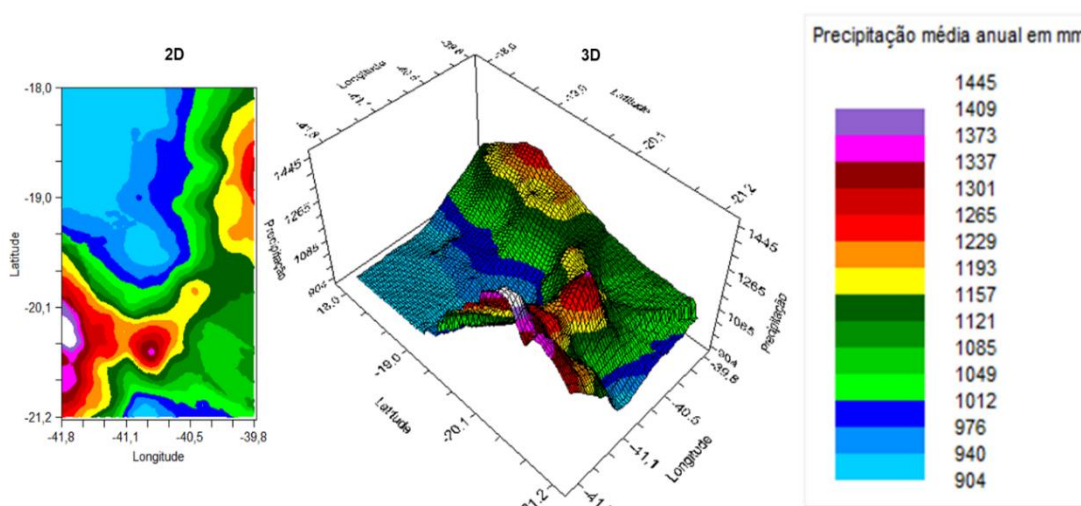
Fonte: Autores (2025).

O mapa de predição, elaborado a partir da krigagem, apresenta a distribuição espacial dos valores interpolados de precipitação anual média no período de 42 anos, evidenciando padrões de

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

concentração e áreas de maior intensidade (Figura 5). Esse resultado demonstra a eficiência da krigagem em captar a continuidade espacial dos dados pluviométricos fornecendo subsídios científicos relevantes para análises ambientais e para o planejamento territorial (Atkinson; Lloyd, 2009).

Figura 5 – Mapas 2D e 3D da superfície interpolada por krigagem.



Fonte: Autores (2025).

Conclusão

A análise da variabilidade espacial da pluviosidade no Espírito Santo por métodos geoestatísticos evidenciou forte heterogeneidade espacial. A aplicação de semivariogramas e krigagem ordinária permitiu representar com precisão a continuidade espacial dos dados, enquanto transformações estatísticas reduziram a influência de valores extremos, garantindo maior confiabilidade às estimativas. Esses resultados reforçam o papel da geoestatística como ferramenta estratégica para a gestão sustentável da água, o planejamento territorial e a formulação de políticas de adaptação às mudanças climáticas, contribuindo para a mitigação de riscos associados a secas e enchentes.

Referências

- ATKINSON, P. M.; LLOYD, C. D. GeoENV VII – Geostatistics for Environmental Applications. **Springer**, v.10, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2322-3>.
- BIASUTTI, M. Rainfall trends in the African Sahel: Characteristics, processes, and causes. **WIREClimChange**. V. 10, n.591, p. 2- 22. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.591>.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501–1511, set. 1994.
- CARDOSO, M. A; SILVA, F. P. Análise da variabilidade espaço-temporal de eventos de chuvas extremas na cidade de Petrópolis, Rio de Janeiro, Brasil. **Eng Sanit Ambient**, v. 30, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220240099>.

A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO**

CHILÈS J. P. La modélisation géostatistique de la variabilité spatiale et ses applications. **Mémoire**, Université Pierre et Marie Curie, 2004.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied Hydrology. New York: **McGraw-Hill**, 1988. Disponível em: https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for Spatial Data**. New York: Wiley-Interscience, 1993. Disponível em: <https://doi/book/10.1002/9781119115151>. Acesso em: 15 set. 2025.

GOOVAERTS, P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. **Journal of Hydrology**, v. 228, n. 1, p. 113-129, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00144-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00144-X). Acesso em: 18 ago de 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estados -Espírito Santo**, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/es/panorama>. Acesso em 21 ago.2025.

INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Planilhas de dados Meteorológicos e Agrometeorológicos via Sensoriamento Remoto 1981-2023**, 2025. Disponível em: https://meteorologia.incaper.es.gov.br/planilhas_sensoriamento Acesso em: 18 ago de 2025.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers:The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, **United Kingdom and New York**, NY, USA, p. 3–32, 2021. DOI: <https://doi:10.1017/9781009157896.001>. Acesso em: 19 ago. 2025

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

ROBERTSON, G.P. GS+. Geostatistics for the Environmental Sciences. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan US, 2008. Disponível em: <https://www.softbooks.pl/gammadesign/files/download/gspluserguide.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2025.

SOUZA, E. B.; CARMO, A. M. C.; MOARES, B. C.; NACIF, A.; FERREIRA, D. B. DA S.; ROCHA, E. J. P.; SOUZA, P. J. DE O. P. Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia legal Brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo REGCM4. **Revista Brasileira De Climatologia**,v. 18, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43711>.