



## MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DA MORTALIDADE DE ÁRVORES E FUSTES EM REMANESCENTE DE FLORESTA SECA EM ANOS DE EL NIÑO E LA NIÑA

Maria Beatriz Ferreira<sup>1</sup>, Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira<sup>1</sup>, Jose Antônio Aleixo da Silva<sup>1</sup>,  
Robson Borges de Lima<sup>2</sup>, Géssyca Fernanda de Sena Oliveira Mergulhão<sup>1</sup>, Anderson  
Francisco da Silva<sup>1</sup>, Ricardo Cordeiro de Lima<sup>1</sup>, Marcos Vinícius da Silva<sup>1</sup>

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil. E-mail: beatriz.177@outlook.com; rinaldo.ferreira@ufrpe.br; jaaleixo@uol.com.br; eng.gessycasena@gmail.com; engf.anderson@gmail.com; lima\_rc@outlook.com; marcolino\_114@hotmail.com

2 Universidade do Estado do Amapá, Macapá, AP, Brasil. E-mail: robson.lima@ueap.edu.br  
Autora correspondente: Maria Beatriz Ferreira. E-mail: beatriz.177@outlook.com.

### RESUMO

O *El Niño* e a *La Niña* podem ter impactos significativos nas condições de seca. Assim, objetivou-se caracterizar os padrões espaciais da mortalidade de fustes e árvores para ano de *El Niño* (2016) e *La Niña* (2020) em remanescente de caatinga no estado de Pernambuco, Brasil, via modelagem geoestatística. A mortalidade de fuste e árvores foram monitorados em 80 parcelas permanentes localizadas em um remanescente de floresta tropical sazonalmente seca. O modelo de semivariograma gaussiano melhor representou a variabilidade espacial da mortalidade de fustes e árvores. Foi verificado um efeito das secas no aumento das taxas de mortalidade em 2016, no entanto em 2020 houve estabilização desses valores. Conclui-se que o método de interpolação espacial da krigagem forneceu uma espacialização consistente das variáveis. Os resultados desta pesquisa contribuíram para orientar a tomada de decisões no manejo florestal sustentável de áreas secas, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas e naturais.

**Palavras-chaves:** Caatinga; eventos climáticos extremos; manejo florestal; modelagem espacial

## ***GEOSTATISTICAL MODELING OF TREE AND TRUNKS MORTALITY IN DRY FOREST REMNANT FOR EL NIÑO AND LA NIÑA YEARS***

### ***ABSTRACT***

*El Niño and La Niña can have significant impacts on drought conditions. Thus, the aim of this study was to characterize the spatial patterns of stem and tree mortality for El Niño year (2016) and La Niña year (2020) in a remaining caatinga forest in Pernambuco state, Brazil, using geostatistical modeling. Mortality was monitored in 80 permanent plots located in a remaining seasonally dry tropical forest. The Gaussian semivariogram model best represented the spatial variability of mortality. A drought effect was observed with increased mortality rates in 2016, while in 2020, these values stabilized. It is concluded that the spatial interpolation method of kriging provided a consistent spatialization of the variables. The results of this study contributed to guiding decision-making in sustainable forest management of dry areas, aiming to reduce environmental impacts resulting from human and natural activities.*

**Key words:** *Caatinga; extreme weather events; forest management; spatial modeling*

### ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MENSURAÇÃO FLORESTAL



### INTRODUÇÃO

A região do semiárido nordestino do Brasil, abriga o Domínio Fitogeográfico da Caatinga que representa a maior floresta tropical sazonalmente seca contínua do mundo (Allen *et al.*, 2017). A vegetação da caatinga apresenta uma ampla diversidade de espécies, cujas características morfológicas e fisiológicas são determinadas pelas condições ambientais. Assim como em outras áreas tropicais secas, a Caatinga é um ecossistema frágil devido à escassez de recursos hídricos e à intensa exploração de recursos naturais (Fathizadeh *et al.*, 2017). Assim, o monitoramento espaço-temporal da vegetação compreende uma ferramenta essencial para auxiliar na busca de alternativas de uso sustentável dos recursos florestais, e a mortalidade é considerada uma das principais componentes da dinâmica florestal. Dentre as técnicas de modelagem espacial, os modelos de interpolação geoestatísticos são eficazes na caracterização da dinâmica espacial via mapas de krigagem (Silva *et al.*, 2019).

A mortalidade de árvores é reconhecida como um dos processos mais importantes na dinâmica florestal, sendo influenciada por diversos fatores. No entanto, sabe-se que os eventos de seca prolongada são considerados uma das principais causas de alteração na estrutura florestal, afetando significativamente a regeneração e elevando as taxas de mortalidade das árvores (Bauman *et al.*, 2022). No Nordeste do Brasil, tanto o *El Niño* quanto a *La Niña* podem ter impactos significativos nas condições de seca. Pois durante o *El Niño*, o Nordeste do Brasil tende a enfrentar condições de seca mais intensas, já em anos de *La Niña*, há uma tendência de aumento nas chuvas na região (Oliveira-Júnior *et al.*, 2021). Assim, objetivou-se caracterizar os padrões espaciais da mortalidade de fustes e árvores para ano de *El Niño* (2016) e *La Niña* (2020) em remanescente de caatinga no estado de Pernambuco, Brasil, via modelagem geoestatística.

### MATERIAL E MÉTODOS

#### Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na Fazenda Itapemirim de propriedade da Agrimex Agroindustrial Excelsior S.A., localizada no município de Floresta, PE, sob as coordenadas 8°30'49" Latitude Sul e 37°57'44" Longitude Oeste, Zona 24S - UTM (WGS84). O estudo foi realizado em duas áreas amostrais com diferentes históricos de distúrbios, sendo: Área 2 - Sem registro de intervenções recentes; e Área 1 - Último corte raso realizado na área foi no ano de 1987. O clima da região é caracterizado do tipo BSh (Beck *et al.*, 2018).

#### Coleta de dados

Os dados são provenientes de 80 parcelas permanentes (40 em cada área). As parcelas foram instaladas em campo no ano de 2008, sendo monitoradas anualmente desde 2011. Para o presente estudo foram usados os dados de mortalidade dos anos 2016 e 2020, que registraram eventos de *El Niño* e *La Niña*, respectivamente. Um indivíduo/fuste foi considerado morto quando não apresentava sinais visíveis de atividade meristemática. Ressalta-se que os indivíduos do

fragmento florestal avaliado apresentaram múltiplos fustes, ao qual, foi registrado a mortalidade de fustes.

### Modelagem geoestatística e mapas de krigagem

Para as análises geoestatísticas foram utilizados os dados de mortalidade de árvores e fustes obtidos nas 80 parcelas permanentes instaladas nas áreas de estudo, nos anos de 2016 e 2020. Os dados foram submetidos a análise de geoestatística realizada com base no cálculo das semivariâncias clássicas. Os dados foram ajustados aos modelos esférico, exponencial e gaussiano. A dependência espacial entre as parcelas foi analisada por meio do ajuste com base na estimativa da semivariância utilizando o programa GS+ versão 7.0.

Os melhores modelos dos semivariogramas ajustados foram validados pela validação cruzada do teste de Jack-Knifing, o programa utilizado para essa análise foi o GEO-EAS<sup>®</sup>. O grau de dependência espacial (GDE) foi classificado de acordo com Cambardella *et al.* (1994). Para a confecção dos mapas de krigagem foi utilizado o programa Quantum Gis (QGis) versão 3.12.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de semivariogramas geoestatísticos experimentais foram ajustados com base na estimativa da semivariância conforme pode ser observado nas Tabela 1 para mortalidade de fustes e árvores, respectivamente, em remanescente de caatinga. Nota-se que para as duas variáveis os modelos de semivariogramas experimentais gaussiano e esférico ajustaram ao conjunto de dados estudados. Em seu estudo Pelissari *et al.* (2017) constataram, em concordância com os resultados deste estudo, que os modelos esféricos e gaussianos demonstraram, em geral, os ajustes mais adequados para mapear e correlacionar os padrões espaciais na dinâmica da área basal de grupos sucessionais de espécies arbóreas em uma Floresta Tropical Mista localizada no sul do Brasil.

**Tabela 1.** Modelo de semivariograma e grau de dependência espacial (GDE) dos padrões de mortalidade de árvores e fustes em remanescente de floresta seca, Floresta, Pernambuco, Brasil

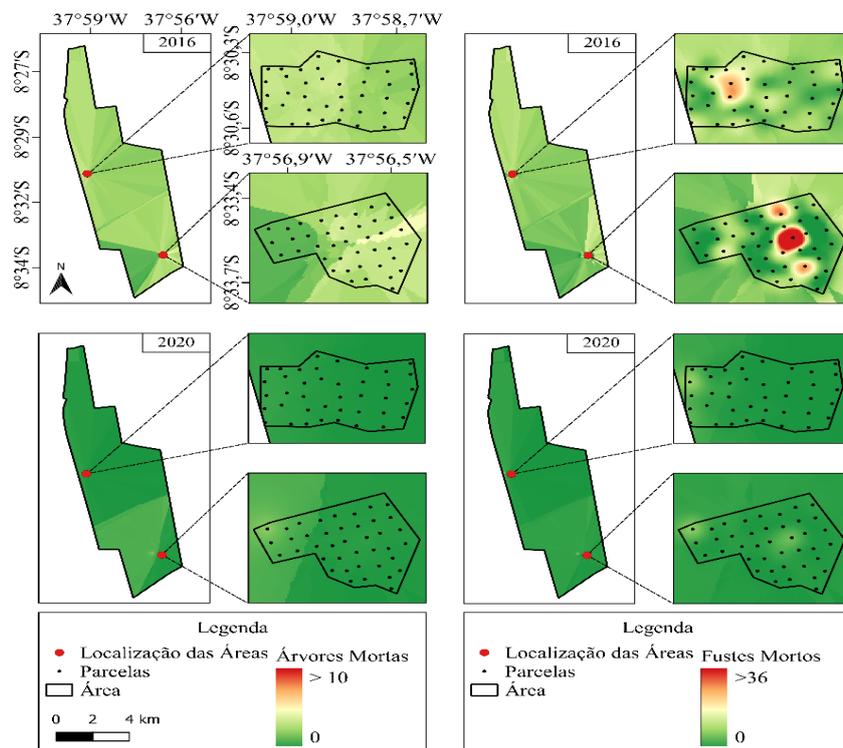
Ano	Mortalidade	Modelo	<sup>1</sup> C0	<sup>2</sup> C0+C	<sup>3</sup> a	<sup>4</sup> R <sup>2</sup>	<sup>5</sup> GDE	Jack-Knifing	
								Média	<sup>6</sup> DP
2015	Árvore	Gaussiano	0,62	3,508	230	0,94	9,1	0,006	1,292
2020	Árvore	Spherical	2,4	58,38	196	0,975	4,1	0,055	1,109
2015	Fuste	Spherical	2,4	58,38	196	0,975	4,1	0,055	1,109
2020	Fuste	Gaussiano	0,01	5,928	160	0,741	0,2	-0,05	1,298

<sup>1</sup>C0: Efeito Pepita; <sup>2</sup>C0+C: Patamar; <sup>3</sup>a: Alcance; <sup>4</sup>R<sup>2</sup>: Ajuste do semivariograma; <sup>5</sup>GDE: Grau de Dependência Espacial (%); <sup>6</sup>DP: Desvio padrão.

Quanto ao coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) dos modelos dos semivariogramas experimentais empregados para as taxas de mortalidade de fustes e árvores (Tabela 1) os ajustes foram satisfatórios com R<sup>2</sup> superior a 0,74. Além disso, o grau de dependência espacial para os modelos de semivariogramas estabelecidos para a mortalidade de fustes e árvores foi forte (< 25%), indicando que a caracterização da variabilidade do ingresso de fustes e árvores de um ponto vizinho ao outro foi de dependência forte, sendo aqueles valores representativos entre as vizinhanças (Cambardella *et al.*, 1994). De acordo com o critério estabelecido por Vauclin *et al.*

(1983), os modelos de semivariogramas estabelecidos foram validados pela técnica de Jack-Knifing.

Nos mapas temáticos obtidos para a distribuição espacial das variáveis estudadas (Figuras 1), é possível observar claramente as regiões com a maior mortalidade de fustes e árvores em 2016 que corresponde ao ano com a presença de *El Niño*. Assim tais resultados podem indicar uma resposta da vegetação a redução da disponibilidade de água para as plantas induzida pela seca. Nesse sentido, diversos autores apontaram a seca como uma das principais responsáveis pela morte de árvores e fustes em diferentes ecossistemas do mundo (Kauwe *et al.*, 2020), o que afeta negativamente a produção da floresta.



**Figura 1.** Mapas de krigagem de mortalidade de árvores e fustes nos anos de 2016 e 2020 em remanescente de floresta seca, Floresta, Pernambuco, Brasil.

No entanto, ao observar os mapas de krigagem para os anos com presença do *La Niña* (2020), percebe-se uma atenuação ou estabilização da mortalidade de fustes e árvores nas áreas de estudo, o que pode ser associado a melhores condições hídricas para a vegetação. Esse resultado é esperado, pois foi registrado altos volumes de precipitação para região. Para Lloret *et al.* (2012) comunidades de árvores podem apresentar mecanismos responsáveis pela estabilização ecofisiológica e demográfica capazes de compensar a eventual mortalidade da vegetação, a exemplo a plasticidade, tolerância e variabilidade fenotípica das espécies, que somadas as interações entre espécies pode atenuar e compensar a mortalidade elevando a sobrevivência e/ou o recrutamento futuro, devido a novas condições benéficas.

### CONCLUSÃO

O modelo de semivariograma que melhor representou a variabilidade espacial da mortalidade e ingresso de fustes e árvores foi o gaussiano e esférico, representando satisfatoriamente a análise e dinâmica espacial do conjunto de dados estudados. O método de interpolação espacial da krigagem forneceu uma espacialização consistente das taxas de mortalidade de fustes e árvores para os anos de 2016 e 2020.

Os efeitos das secas potencializados pelo *El Niño* associado as ações antrópicas potencializam as taxas de mortalidade no remanescente de floresta tropical sazonalmente seca. Já em ano de *La Niña*, houve a estabilização da mortalidade na área estudada.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, K.; Dupuy, J. M.; Gei, M. G.; Hulshof, C.; Medvigy, D. *et al.* Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes? **Environmental Research Letters**, v. 12, n.2, e023001, 2017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5968>.
- Bauman, D.; Fortunel, C.; Delhay, G.; Malhi, Y.; Cernusak, L. A. *et al.* Tropical tree mortality has increased with rising atmospheric water stress. **Nature**, v. 608, p.528-533, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04737-7>.
- Beck, H. E.; Zimmermann, N. E.; McVicar, T. R.; Vergopolan, N., Berg, A.; Wood, E. F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, v. 5, n. 1, e180214, 2018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>.
- 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 Amsterdam Journal**, v. 58, n. 5, p.1501-1511, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>.
- Fathizadeh, O.; Hosseini, S. M.; Zimmermann, A.; Keim, R. F.; Boloorani, A. D. Estimating linkages between forest structural variables and rainfall interception parameters in semi-arid deciduous oak forest stands. **Science of the Total Environment**, v. 601-602, p.1824-1837. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.233>.
- Kauwe, M. G.; Medlyn, B. E.; Ukkola, A. M.; Mu, M.; Sabot, M. E. B. *et al.* Identifying areas at risk of drought-induced tree mortality across South-Eastern Australia. **Global Change Biology**, v. 26, n. 10, p. 5716-5733, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.15215>.
- Lloret, F.; Escudero, A.; Iriando, J. M.; Martínez-Vilalta, J.; Valladares, F. Extreme climatic events and vegetation: the role of stabilizing processes. **Global Change Biology**, v. 18, n. 3, p. 797-805, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02624.x>.
- Oliveira-Júnior, J. F.; Gois, G.; Silva, I. J. L.; Souza, E. O.; Jardim, A. M. R. F. *et al.* Wet and dry periods in the state of Alagoas (Northeast Brazil) via standardized precipitation index. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 224, e105746, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105746>.
- Pelissari, A. L.; Figueiredo Filho, A.; Netto, S. P.; Ebling, A. A.; Roveda, M.; Sanquetta, C. R. Geostatistical modeling applied to spatiotemporal dynamics of successional tree species groups in a natural Mixed Tropical Forest. **Ecological Indicators**, v. 78, p. 1-7, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.044>.
- Silva, M. V.; Almeida, G. L. P.; Batista, P. H. D.; Pandorfí, H.; Macêdo, G. A. P. A. Rodes, M. M.; Silva, A. B. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área cultivada com palma forrageira resistente a cochonilha do carmim no semiárido nordestino. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n.4, p.39-45, 2019. [https://doi.org/10.11137/2019\\_4\\_39\\_45](https://doi.org/10.11137/2019_4_39_45).
- Vauclin, M.; Vieira, S. R.; Vachaud, G.; Nielsen, D. R. The Use of Cokriging with Limited Field Soil Observations 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, n. 2, p.175-184, 1983. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700020001x>.