

MODELAGEM DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE *Bertholletia excelsa*

Thaís Vasconcelos Silva

RESUMO

A castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*) é uma das espécies de produtos florestais não madeireiros (PFNM) mais importantes do mundo. Assim, melhores práticas de manejo e conservação da espécie só serão possíveis a partir de um conhecimento profundo sobre sua ecologia. O objetivo deste trabalho foi avaliar o padrão de distribuição espacial da castanheira e modelar espacialmente a variação da capacidade de produção de frutos de *Bertholletia excelsa*. O estudo foi realizado em uma área localizada no município de Juína-MT, em que a capacidade produtiva da árvore foi considerada como uma variável de resposta, a qual assume um valor binário, ou seja, igual a 1 se a árvore produz e 0 caso contrário. A função K de Ripley foi aplicada para quantificar a associação espacial da capacidade de produção de frutos de árvores de *B. excelsa*. Adicionalmente, com a krigagem indicatriz foram determinadas as probabilidades de ocorrência de locais mais produtivos. O padrão de distribuição espacial para *Bertholletia excelsa* foi agregado. O método da krigagem indicatriz pode ser utilizado como ferramenta para mapear e delimitar a probabilidade da capacidade de produção de frutos de *Bertholletia excelsa*.

Palavras-chave: Função K de Ripley; Krigagem indicatriz; Frutos de castanheira.

MODELING THE SPATIAL VARIABILITY OF THE PRODUCTION CAPACITY OF *Bertholletia excelsa*

ABSTRACT

The Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) is one of the most important species of non-timber forest products (NTFP) in the world. Thus, better management and conservation practices for the species will only be possible from a deep knowledge of its ecology. The objective of this work was to evaluate the spatial distribution pattern of Brazil nut and to spatially model the variation in the fruit production capacity of *Bertholletia excelsa*. The study was carried out in an area located in Juína-MT municipality, where the tree's productive capacity was considered as a response variable, which assumes a binary value, that is equal to 1 if the tree produces and 0 if contrary. Ripley's K function was applied to quantify the spatial association of the fruit production capacity of *B. excelsa* trees. Additionally, with indicative kriging the probabilities of occurrence of more productive sites were determined. The spatial distribution pattern for *Bertholletia excelsa* was added. The indicatrix kriging method can be used as a tool to map and delimit the probability of fruit production capacity of *Bertholletia excelsa*.

Keywords: Ripley's K function; Indicative Kriging; Brazil Nuts.

1 INTRODUÇÃO

A castanheira (*Bertholletia excelsa*) é considerada a árvore mais famosa da floresta amazônica, devido sua importância cultural, social e econômica (TONINI et al., 2011; SILVA; PONTES, 2020). Por ser abundante na região amazônica e colhida quase que exclusivamente em florestas nativas (TONINI et al., 2008), pode ser uma espécie chave para a conservação e desenvolvimento da região amazônica (BATISTA et al., 2019), pois

fornece o segundo produto florestal não madeireiro mais importante na região Norte do Brasil, ficando atrás apenas do açaí (*Euterpe sp.*) (BATISTA, 2019).

Atualmente, a castanheira está na lista de espécies ameaçadas de extinção (BRASIL, 2008), sendo seu corte proibido. Assim, como o manejo da espécie é baseado no sistema extrativista (AZEVEDO et al., 2020), a compreensão dos fatores que influenciam na produção dos frutos em populações nativas, pode auxiliar no subsídio de propostas para a conservação e exploração da espécie. Posto isto, o padrão espacial de árvores é uma questão-chave para estudos de ecologia florestal que permite analisar a estrutura da comunidade em si, conhecer processos ecológicos importantes, como competição e dispersão de sementes, além de subsidiar a definição de estratégias de manejo e/ou conservação e, auxiliar em processos de amostragem.

Assim, há diversas metodologias desenvolvidas para se fazer a análise de um padrão de distribuição espacial. Como exemplo, a função K de Ripley é um método baseado em contagem e em distância, exigindo o conhecimento das coordenadas de cada ponto. Ou seja, trata-se de uma ferramenta estatística adequada para verificar a existência de agregação, regularidade ou aleatoriedade entre os padrões de pontos amostrados, possibilitando detectar o padrão espacial em diferentes escalas, simultaneamente, e testar a independência espacial entre grupos de árvores quaisquer (RIPLEY, 1981).

Já para modelagem de atributos que são espacialmente dependentes, a geoestatística pode ser utilizada a partir de técnicas e ferramentas de análises, as quais são fundamentais para auxiliar a identificar fenômenos naturais por meio de modelagem de padrões espaciais (variografia), descrever e prever valores em locais não amostrados a partir da distribuição espacial (krigagem). Desta forma, o emprego de métodos geoestatísticos pode ser eficiente no conhecimento das variáveis que apresentam relações explicativas com a variabilidade da produção de frutos de *B. excelsa*.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o padrão de distribuição espacial da castanheira, utilizando a função K de Ripley, bem como modelar espacialmente a variação da capacidade de produção de frutos de *Bertholletia excelsa*, a partir de técnicas geoestatísticas.

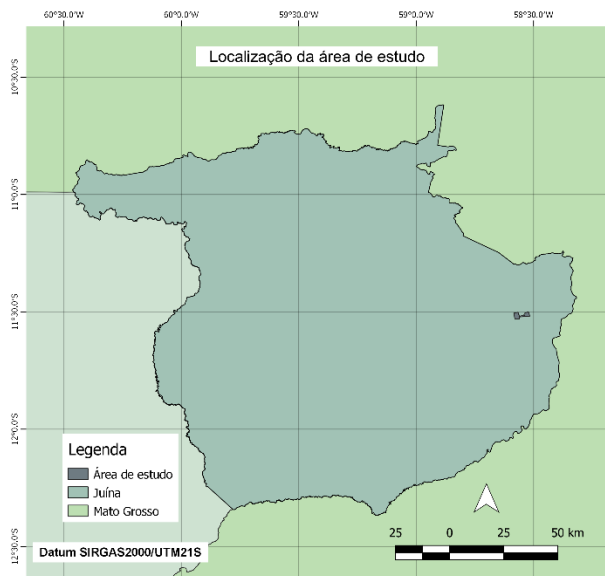
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Juína que faz parte da região Noroeste 1 do estado de Mato Grosso (MATO GROSSO, 2017), conforme representado na

Figura 1. A população estimada para o ano de 2020 é de 41 101 habitantes e o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH) é 0,716 (IBGE, 2020).

Figura 1 – Localização da área de estudo



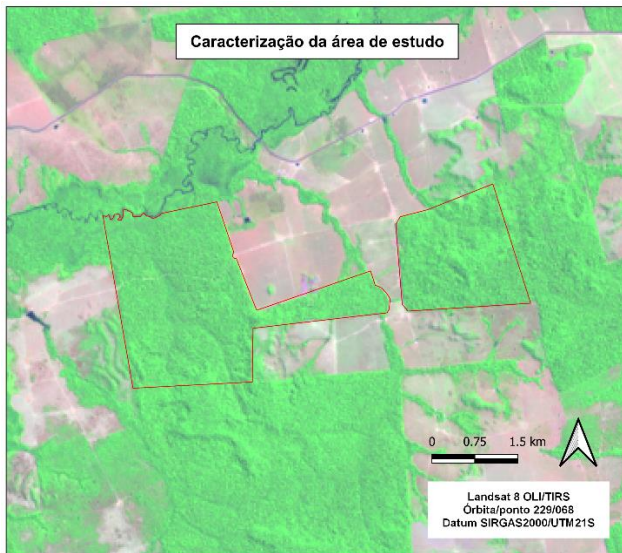
Fonte: a autora.

Nesta região, predomina o clima equatorial úmido, com três meses secos e com temperatura média acima de 18 °C em todos os meses (IBGE, 2002). Os solos mais comuns são os latossolos vermelho-amarelos distróficos típicos com textura argilosa e média, com relevo suave ondulado, podendo ocorrer também argissolos vermelho-amarelos distróficos e latossolos vermelhos distróficos (IBGE, 2009).

Com relação à vegetação, trata-se de uma área de tensão ecológica onde ocorrem duas ou mais regiões fitoecológicas que se contatam, justapondo-se ou interpenetrando-se, neste caso savana e floresta estacional, com o predomínio de atividades agrárias.

A área de estudo possui 1172 hectares (Figura 2), integra a bacia hidrográfica do rio Juína-Mirim e está inserida na região conhecida como arco do desmatamento, área de intensivo desflorestamento que compreende a fronteira agrícola ao sul da Amazônia.

Figura 2 – Caracterização da área de estudo.



Fonte: a autora

2.2 Coleta e análise de dados

Para o levantamento foi feito o censo da área, georreferenciando e mensurando (altura e circunferência à altura do peito) de todos os indivíduos de castanheira. Os dados de produção foram obtidos pela contagem dos frutos e pesagem das castanhas em todas as árvores dentro das duas áreas em estudo. A capacidade produtiva da árvore foi considerada como uma variável de resposta, a qual assume um valor binário, ou seja, igual a 1 se a árvore produz e 0 caso contrário.

Utilizou-se a função k de *Riplay* com intuito descritivo para verificar o padrão de distribuição da castanheira no local de estudo. Assim, foram gerados os intervalos do envelope de confiança através de 2000 permutações de aleatoriedade espacial completa usando o número total de indivíduos amostrados (RIPLEY, 1981). As análises foram feitas usando o software *R* (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2017), por meio do pacote *Splancs* (ROWLINGSON; DIGGLE, 2004).

A hipótese básica testada no processo espacial pontual é a de completa aleatoriedade espacial, ou seja, que existe ausência de algum tipo de dependência entre eventos (BATISTA, 1994). Esta hipótese atua como uma separação entre padrões, fazendo distinção entre um padrão classificado como regular ou agregado (DIGGLE, 2003). Ainda, cabe salientar que o raio máximo de busca, ou seja, a distância máxima sob a qual a função K é estimada foi dada pela regra que considera 0,25 da maior distância entre dois eventos na área de estudo, conforme Diggle (2003).

Em seguida foi realizado o estudo variográfico a partir da confecção do semivariograma experimental (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989), e posteriormente ajustados os modelos teóricos: esférico, exponencial e gaussiano de semivariograma para a

capacidade de produção dos indivíduos amostrados. O ajuste dos semivariogramas teóricos foi realizado pelo Método dos Quadrados Mínimos Ponderados (Weight Least Squares-WLS), minimizando a soma de quadrados dos desvios ponderados (SQDP).

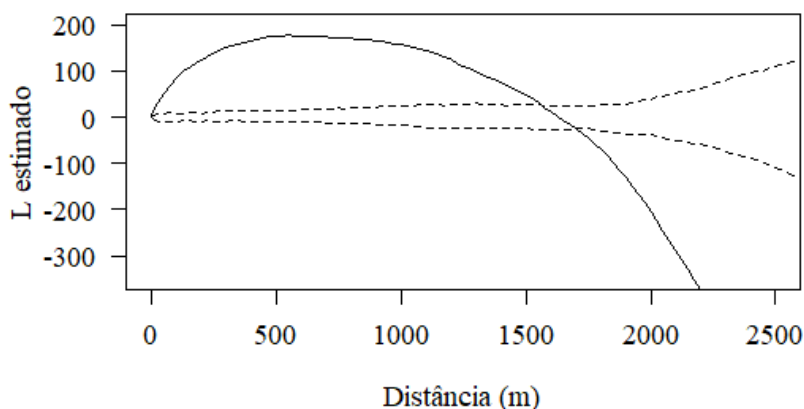
A avaliação e a seleção dos modelos nos ajustes dos semivariogramas teóricos foram realizadas com base na menor SQDP e no maior coeficiente de determinação (R^2). Para analisar o grau de dependência espacial (GD), utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que foram considerados os seguintes graus de dependência espacial: a) forte, semivariogramas com efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar; b) moderado, quando GD entre 25 e 75%; e c) fraco, quando GD maior que 75%. As análises foram realizadas com auxílio do pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGLLE, 2001) do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2017).

Posteriormente, por meio da krigagem indicatriz, foi gerado o mapa temático da probabilidade de ocorrência de indivíduos mais produtivos, cujas estimativas resultaram nos valores de incerteza espacial, entre zero e 100%, esperados nos locais com menores e maiores produtividade, respectivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A função K indicou que os padrões espaciais dos indivíduos de ocorrem de maneira agregada até uma distância de 1500 metros, passando para uma distribuição regular até 2250 metros (Figura 3), visto que, os valores positivos indicam agregação, os negativos indicam distribuição regular e as linhas contínuas dentro das pontilhadas indicam aleatoriamente. Desta forma, nota-se a hipótese de distribuição aleatória foi rejeitada. O padrão de distribuição encontrado também demonstra que as árvores de castanheira formam agregados de diferentes tamanhos e, estes agregados são distribuídos de maneira regular na área estudada.

Figura 3 - Função Ripley K (L estimado) utilizada para verificar o padrão de distribuição de *Bertholletia excelsa*.



Fonte: a autora.

Assim, de acordo com Condit et al. (2000), ambientes heterogêneos correspondem a níveis elevados de agregação, enquanto áreas mais homogêneas apresentam níveis mais baixos. Desta forma, os níveis de agregação são atribuídos principalmente à disponibilidade de recursos (COLLINS; KLAHR, 1991; GRAU, 2000), condições microclimáticas específicas e reduzida capacidade de dispersão.

De modo oposto, a intensa competição por recursos pode levar a padrões regulares e aleatórios (HAASE, 1995). A disponibilidade de recursos refere-se principalmente a nutrientes e água no solo (COLLINS; KLAHR, 1991). Isto posto, condições microclimáticas favoráveis surgem principalmente em razão da estrutura do dossel da floresta, propiciando filtragem de luz e maior influência do vento, ou mesmo devido a um relevo acidentado (CONDIT et al., 2000).

Estas análises podem indicar a existência de processos que predominam sobre a distribuição dos indivíduos de castanheira, como por exemplo: o padrão regular poderia indicar concorrência entre os indivíduos e com outras espécies, ao contrário do padrão agregado que indica facilitação de agregação, porém, para a análise da interpretação dos dados, é necessária cautela, pois vários processos podem gerar o mesmo padrão espacial durante as análises estatísticas (WIEGAND; MOLONEY, 2004).

Fantini et al. (1994) afirmam que a completa compreensão da floresta é um dos requisitos indispensáveis para o sucesso do sistema de manejo em regime de modo sustentável. Assim, a função k de Ripley permite que se faça inferências em grandes escalas, sendo uma ferramenta poderosa para o entendimento de fatores responsáveis pela distribuição espacial das plantas.

Todos os modelos ajustados apresentaram moderada dependência espacial e, através do efeito pepita (C_0), representado pela variância não identificada nos semivariogramas da capacidade de produção, observou-se valores inferiores a 0,54 (Tabela 1). Já os alcances (A), os quais representaram as distâncias máximas em que dois pontos amostrais são correlacionados espacialmente (REICHERT et al., 2008), ao passo que as determinações em distâncias superiores retrataram independências entre si (WEBSTER; OLIVER, 2007).

Os valores dos coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 0,50 e as somas de quadrados dos desvios ponderados (SQDP) variaram entre $3,66 \times 10^{-3}$ a $4,01 \times 10^{-3}$ (Tabela 1). Assim, para a krigagem indicatriz, com base na menor soma de quadrados dos desvios ponderados (SQDP) e no maior coeficiente de determinação (R^2), o modelo esférico foi o selecionado (Tabela 1 e Figura 4).

Os três modelos avaliados foram similares devido ao fato de atingem o patamar gradualmente, contudo, diferem do esférico na taxa por meio da qual o patamar é alcançado (ROBERTSON, 1998). Já, em relação ao valor do alcance da dependência espacial, observou-se um comportamento bastante diferenciado dentre os três modelos avaliados, no qual o modelo exponencial possibilitou maiores alcances.

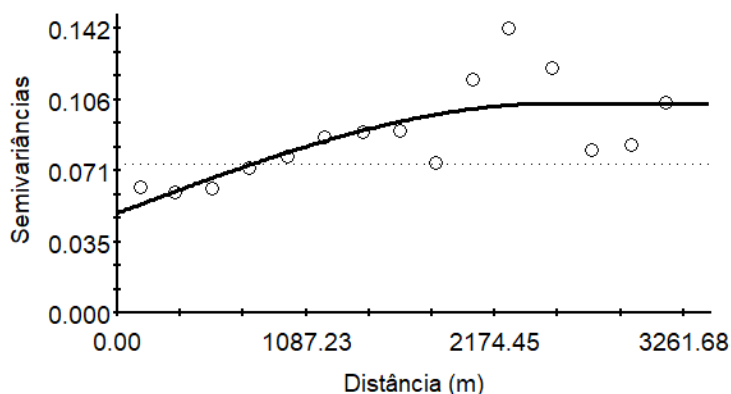
Tabela 1 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados para capacidade produtiva de *Bertholletia excelsa*.

Modelo	Parâmetros estimados					GD%
	C ₀	C	A	R ²	SQDP	
Esférico	0,0497	0,0547	2528,00	0,53	$3,66 \times 10^{-3}$	53%
Exponencial	0,0456	0,0656	3675,00	0,59	$4,01 \times 10^{-4}$	52%
Gaussiano	0,0531	0,0531	2199,70	0,50	$3,77 \times 10^{-5}$	50%

GD%=Grau de dependência espacial; C₀=Efeito pepita; C=Patamar; A=Alcance; R²=Coeficiente de determinação; SQDP=Soma de quadrados dos desvios ponderada.

Fonte: a autora.

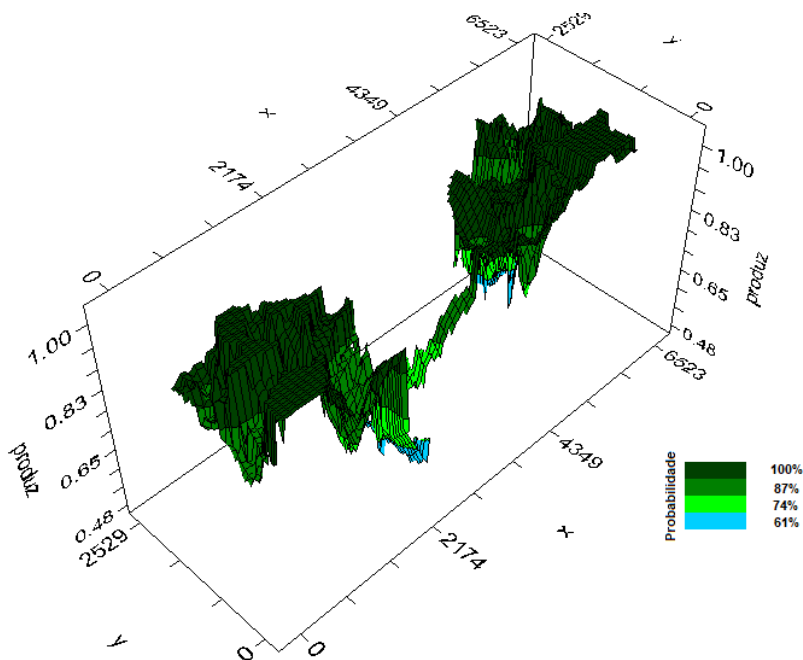
Figura 4 - Modelo esférico ajustado para capacidade produtiva de frutos de *Bertholletia excelsa*.



Fonte: a autora.

Por meio dos valores das probabilidades (Figura 5) foram delimitadas as áreas com a possibilidade de obter locais com maior capacidade de produção de frutos de castanheira, o que propicia, dessa maneira, planejar a estrutura e o manejo de produtos não madeireiros. Os locais com menor capacidade de produção estão associados possivelmente aos danos que as copas sofreram no corte seletivo de outras espécies comerciais derrubadas para o aproveitamento madeireiro, como também devido ao efeito de borda da floresta. A menor capacidade de produção dos frutos também pode ter sido influenciada pelo isolamento de alguns indivíduos, onde a floresta foi retirada e convertida em pasto, restando assim árvores isoladas de castanheira, já que estas não foram derrubadas devido impedimento legal.

Figura 5 - Mapas temáticos das probabilidades de locais com maior capacidade de produção de frutos de *Bertholletia excelsa*.



Fonte: a autora.

4 CONCLUSÃO

Para o padrão de distribuição espacial para *Bertholletia excelsa* na área avaliada, houve predomínio do padrão agregado. Contudo, há a necessidade de se ampliar as áreas de estudo, nas diferentes tipologias, na região de ocorrência do bioma, para possibilitar o estabelecimento do padrão espacial da espécie.

O método da krigagem indicatriz pode ser utilizado como ferramenta para mapear e delimitar a probabilidade da capacidade de produção de frutos de *Bertholletia excelsa*, visando o planejamento da estrutura e manejo de produtos não madeireiros.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, V. R.; WADT, L. H. O.; PEDROZO, C. A.; FONSECA, F. L.; RESENDE, M. D. V. Repeatability coefcient for the fruit production and selection of *Bertholletia excelsa* (Bonpl.) in natural stands of Acre state. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 135-144, 2020.

BATISTA, A. P. B.; SCOLFORO, H. F.; MELLO, J. M.; GUEDES, M. C.; TERRA, M. C. N.; SCALON, J. D.; GOMIDE, L. R.; SCOLFORO, P. G. V.; COOK, R. Spatial association of fruit yield of *Bertholletia excelsa* Bonpl. trees in eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, n. 441, p. 99-105, 2019.

BATISTA, J.L.F. **Spatial dynamics of trees in a Brazilian Atlantic tropical forest under natural and managed conditions**. Boston, 1994. 327p. Tese (Doutorado). Washington College of Forest Resources. University of Washington.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Instrução Normativa nº 6, de 23 de setembro de 2008**. Reconhece como espécies da flora brasileira ameaçada de extinção aquelas

constantes do Anexo I e reconhece como espécies da flora brasileira com deficiência de dados aquelas constantes do Anexo II a esta Instrução Normativa. Brasília, DF, 2008.

CAMBARDELLA, C. A.; MOOMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEM, D. L.; TURVO, R. F.; KONOPA, A. E. Field Scale variability of soil properties in Central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, p. 1501-1511, 1994.

COLLINS, S.; KLAHR, S. Tree dispersion in oakdominated forests along an environmental gradient. **Oecologia**, Berlim, v. 86, p. 471-477, 1991.

CONDIT, R. et al. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. **Science**, Inglaterra, v. 288, n. 5470, p. 1414-1418, 2000.

DIGGLE, P.J. **Statistical analysis of spatial point patterns**. 2nd ed. Oxford University Press. 2003.

FANTINI, A. C.; NODARI, R. O.; REIS, M. S.; MANTOVANI, A.; ODORIZZI, J.; RIBEIRO, R. J. Estimativa da produção de palmito em plantas de palmitero a partir de características fenotípicas. **Revista árvore**, v.21, n.21, p.4957, 1997.

GRAU, H. Regeneration patterns of *Cedrela lilloi* (Meliaceae) in Northwestern Argentina subtropical montane forests. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 16, p. 227-242, 2000.

HAASE, P. et al. Spatial pattern in *Anthyllis cytisoides* shrubland on abandoned land in southeastern Spain. **Journal of Vegetation Science**, Knivsta, v. 8, p. 627-634, 1997.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE – cidades@. 2020. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidades/>. Acesso em: 31 maio 2020.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de biomas do Brasil. 2004. Escala 1:5 000 000. Diretoria de Geociências: Rio de Janeiro, 2004.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de clima do Brasil. 2002. Escala 1:5 000 000. Diretoria de Geociências: Rio de Janeiro, 2002.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estado de Mato Grosso. Pedologia. Mapa exploratório de solos. 2009. Escala 1:5 000 000. Diretoria de Geociências: Rio de Janeiro, 2009.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**, vol 21. Oxford University Press, Inc., New York, 1989.

MATO GROSSO. Secretaria de Estado de Planejamento. **Regiões de Planejamento de Mato Grosso: 2017**. Secretaria de Estado de Planejamento: Cuiabá, 2017.

R DEVELOPMENT CORE TEAM: a language and environment for statistical computing. Austria: R Foundation for Statistical Computing. Available from: <http://www.R-project.org>. 2017.

REICHERT, J. M.; DARIVA, T. A.; REINERT, D. J.; SILVA, V. R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 981–988, 2008.

RIBEIRO, J.R.; DIGGLE, P.J. geoR: A package for geostatistical analysis. **R-NEWS**, v. 1, n. 2, 2001.

RIPLEY, B. D. **Spatial statistics**. New York: Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. 252 p. 1981.

ROBERTSON, G.P. **GS+: Geostatistics for the environmental sciences**. Versão 5.03 Beta, Plainwell, Gamma Design Software, 1998. 152p

ROWLINGSON, B.; DIGGLE, P. **Splancs: spatial and space-time point pattern analysis**. Austria: R Development Core Team. R package version 2.01-15, 2004.

SILVA, T. P.; PONTES, A. N. Sustainable production chains in Brazil brown extractivism in Brazilian amazon. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, 2020.

TONINI, H. et al. Relação da produção de sementes de castanha-do-brasil com características morfométricas da copa e índices de competição. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, 2008.

TONINI, H. Fenologia da castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl., Lecythidaceae) no sul do estado de Roraima. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 123-131, 2011.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2.ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2007. 333 p.

WIEGAND, T.; MOLONEY, K. A. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. **Oikos**, n. 104, p.209–229, 2004.