



ARTIGO ORIGINAL

Emanuel José Gomes de Araújo^{1*}
Hassan Camil David²
Sylvio Péllico Netto²
Vinícius Augusto Morais³
José Roberto Soares Scolforo³

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Seropédica, RJ, Brasil

²Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, PR, Brasil

³Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, MG, Brasil

Autor Correspondente:

*E-mail: ejgaraujo@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Função K de Ripley
Análise espacial de árvores
Densidade de árvores

KEYWORDS

Ripley's K function
Tree spatial analysis
Tree density

Padrão espacial de espécies arbóreas em fragmento de floresta estacional semidecidual

Spatial pattern of tree species of a semidecidual seasonal forest fragment

RESUMO: Conhecer o padrão de distribuição espacial de espécies florestais é importante para compreender os processos ecológicos de uma dada comunidade. O objetivo deste trabalho foi analisar o padrão de distribuição espacial de quatro espécies de maior densidade em um fragmento florestal. Os dados de diâmetro a 1,3 m do solo (DAP), altura total e as coordenadas geográficas de todos os indivíduos arbóreos com DAP ≥ 10 cm foram coletados em fragmento de Floresta Estacional Semidecidual. As coordenadas das espécies de maior ocorrência, levando em consideração a densidade absoluta, foram integradas a um programa de SIG e o padrão de distribuição espacial foi analisado por meio da função K de Ripley na sua forma univariada. Foi avaliada a relação existente entre os pares de eventos a cada 5 m até uma distância total de 60 m. A construção dos envelopes de confiança foi feita por meio de 499 simulações Montecarlo. As espécies de maior densidade foram, em ordem decrescente: *Callisthene major*, *Acrocomia aculeata*, *Luehea divaricata* e *Tapirira guianensis*. Os padrões espaciais detectados foram: i) completamente aleatório para a espécie *Tapirira guianensis* e ii) agregado para as espécies *Acrocomia aculeata* e *Luehea divaricata*. A espécie *Callisthene major* apresentou padrão espacial variado em função da distância considerada. Além disso, foi constatada a existência de diferença no padrão espacial de indivíduos da mesma espécie quando estes são separados em grupos diamétricos, visto que indivíduos com DAP ≤ 30 cm apresentaram padrão aleatório e aqueles com DAP > 30 cm, padrão agregado. Isso permite concluir que indivíduos com idade avançada crescem isoladamente na floresta.

ABSTRACT: Knowing the spatial distribution of forest species is important for understanding ecological processes in a given community. The aim of this study was to analyze the spatial distribution of four higher density species in a semidecidual seasonal forest fragment. Data of diameter at breast height (DBH), total height, and the geographical coordinates of all individual trees with DBH ≥ 10 cm were collected. The coordinates of the four most common species, taking into account the absolute density, were integrated into a geographic information system program (GIS) and the spatial distribution pattern was analyzed by Ripley's K function in its univariate form. The relationship between pairs of events every 5 m up to a distance of 60 m was evaluated. The construction of confidence envelopes was performed using 499 Monte Carlo simulations. The four species of higher density in descending order were *Callisthene major*, *Acrocomia aculeata*, *Luehea divaricata* and *Tapirira guianensis*. The spatial patterns detected were completely random for *Tapirira guianensis* and aggregate for *Acrocomia aculeata* and *Luehea divaricata*. The species *Callisthene major* presented varied spatial pattern depending on the distance considered. Furthermore, differences on the spatial pattern of individuals of the same species were observed when these were separated into diametric groups; those with DBH ≤ 30 cm presented random pattern and those with DBH > 30 cm showed aggregate pattern. This indicates that older individuals grow singly in the forest.

Recebido: 24/03/2013

Aceito: 17/10/2013

1 Introdução

Conhecer o padrão espacial de espécies florestais em uma comunidade é essencial para embasar programas de recuperação e na definição de estratégias para a condução de um sistema de manejo (ANJOS et al., 2004). Segundo Pereira, Péllico Netto e Carvalho (2006), a compreensão da distribuição espacial de dados oriundos de fenômenos ocorridos no espaço constitui hoje um grande desafio para a elucidação de questões centrais em diversas áreas do conhecimento.

O primeiro passo no estudo da distribuição espacial de espécies de plantas é a descrição do padrão espacial, o que tradicionalmente implica no teste da hipótese do padrão espacialmente aleatório, contra duas hipóteses alternativas: padrão agregado e padrão regular. O padrão aleatório indica independência espacial entre as plantas (indivíduos) de uma mesma espécie; o padrão agregado caracteriza atração espacial, enquanto o padrão regular caracteriza repulsão espacial.

A função K de Ripley é uma metodologia que tem sido amplamente aplicada para descrever o padrão espacial de espécies florestais (SILVA et al., 2008; BRUZINGA et al., 2013; CAPRETZ et al., 2012; RODE et al., 2010; ANJOS et al., 2004; HIGUCHI et al., 2011; PEREIRA; PELLICO NETTO; CARVALHO, 2006). É uma função de densidade probabilística, que considera a variância de todas as distâncias entre todos os indivíduos (SILVA et al., 2008). É um método baseado na contagem e na distância, sendo necessário o conhecimento das coordenadas de cada indivíduo (CAPRETZ et al., 2012).

A inferência sobre o padrão espacial de espécies florestais, além de auxiliar estratégias de manejo, tem sido importante na definição de metodologias de amostragem e em estudos de Ecologia. Para a espécie candeia [*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish], métodos de amostragem com princípio de casualização podem estimar com precisão a variável de interesse (SILVA et al., 2008). O método de amostragem adotado para a espécie pequi (*Caryocar brasiliensis* Camb.) deve considerar o padrão espacial agregado dessa espécie, pois há a probabilidade de algumas unidades amostrais serem alocadas entre agregados (BRUZINGA et al., 2013). Pereira, Péllico Netto e Carvalho (2006) mostraram que o padrão de distribuição espacial da espécie jequitibá (*Cariniana legalis*) está fortemente relacionado à estrutura horizontal da população.

O objetivo deste trabalho foi analisar o padrão de distribuição espacial de quatro espécies de maior densidade em um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual.

2 Material e Métodos

A área de estudo foi um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, com área de cinco hectares, localizado no município de Betim, região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. As coordenadas centrais do fragmento são 19° 57' 24" S e 44° 10' 15" W. A temperatura média anual da região é de 20 °C e a precipitação média anual varia entre 1.400 e 1.600 mm. O clima é classificado como B2 – Úmido (CARVALHO et al., 2008).

Os dados foram coletados por meio de censo florestal, onde foram quantificados e mensurados todos os indivíduos com diâmetro a 1,30 metro do solo (DAP) superior ou igual a

10 cm, sendo esta e a altura total as variáveis dendrométricas mensuradas. Além disso, fez-se a identificação botânica e o georreferenciamento de cada indivíduo.

A partir da quantificação e da mensuração de 437 indivíduos distribuídos em 74 espécies e 37 famílias, estimou-se, para cada espécie, os valores de densidade absoluta (indivíduos.ha⁻¹), densidade relativa (%), dominância absoluta (m².ha⁻¹) e dominância relativa (%). Maiores detalhes sobre esses índices podem ser encontrados em Scolforo et al. (2008). Em sequência, foram selecionadas as quatro espécies de maior densidade absoluta para a análise do padrão espacial, sendo elas *Callisthene major* Mart. (carvoeira), *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart. (macaúba), *Luehea divaricata* Mart. (açoita-cavalo) e a *Tapirira guianensis* Aubl. (pombeiro). A densidade absoluta dessas espécies foi, respectivamente, 12, 10, 6 e 5 indivíduos.ha⁻¹. A primeira pertence ao grupo ecológico das secundárias iniciais e à família Vochysiaceae. As demais espécies enquadram-se no grupo ecológico das pioneiras e pertencem às famílias Arecaceae, Malvaceae e Anarcadiaceae, respectivamente.

A análise do padrão espacial de cada espécie foi realizada de dois modos, em que o ajuste foi feito para o conjunto total de indivíduos e os separando em dois grupos de indivíduos, com DAP ≤ 30 cm e com DAP > 30 cm.

As coordenadas geográficas dos indivíduos de cada espécie foram integradas a um programa de SIG, no qual foi feita a análise espacial por meio da função K proposta por Ripley (1976) na forma univariada. Foi avaliada a relação existente entre os pares de eventos (pares de indivíduos) a cada 5 m até uma distância máxima de 60 m.

Para o cálculo da função K, foi empregado o estimador da função com a correção proposta por Ripley, baseado na correção isotrópica de bordadura segundo a formulação a seguir (RIPLEY, 1979), a Equação 1:

$$\hat{K}(s) = \frac{1}{\hat{\lambda}_n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_T^{-1}(x_i, x_j) I(\|x_i - x_j\| < s), \text{ para } i \neq j \text{ e } s > 0 \quad (1)$$

Em que:

- n = número de árvores na região de estudo;
- x_i e x_j = coordenadas dos pontos do mapa;
- $\|x_i - x_j\|$ = distância euclidiana entre as localizações x_i e x_j ;
- s = vetor arbitrário de distâncias;
- $\hat{\lambda}_n = n/|A|$ = número de árvores dividido pela área da região de estudos, sendo um estimador não viciado da intensidade do processo;
- $W_T(x_i, x_j)$ = função de correção isotrópica de bordadura, a qual representa a proporção da circunferência com centro em x_i e com raio $\|x_i - x_j\|$ que está fora da região de estudo, sendo a função definida para qualquer polígono convexo;
- $I(U)$ = função indicadora que assume o valor 1 (um) sempre que a condição U for verdadeira e zero, quando falsa.

Os envelopes de confiança (limites de confiança) foram definidos por meio de simulações Montecarlo. Após a realização de 499 simulações do padrão espacial segundo o modelo de completa aleatoriedade espacial, definiu-se o intervalo de confiabilidade de 99%, que delimita a região

de aceitação da hipótese do padrão espacialmente aleatório. Na construção desse intervalo, são armazenados os valores mínimos e máximos de K , obtidos nas 499 simulações para cada distância s .

Nesse processo, a hipótese inicial testada é a de completa aleatoriedade espacial, ou seja, que existe ausência de algum tipo de dependência entre eventos, situação encontrada quando os valores observados estiverem dentro dos envelopes construídos (CAPRETZ et al., 2012). Caso essa hipótese seja rejeitada, existem duas hipóteses alternativas: atração ou repulsão espacial, ou seja, quando os valores estiverem fora dos envelopes. Nessa condição, para valores observados maiores do que o limite superior, o padrão é agregado; e se forem menores do que o limite inferior, o padrão é regular.

Para facilitar a análise, os valores da função K univariada foram transformados para $\hat{L}(s)$ conforme formulação apresentada a seguir, na Equação 2, e distribuídos graficamente, em que os eixos das abscissas e ordenadas representam, respectivamente, as distâncias s e os valores transformados da função K (RIPLEY, 1979).

$$\hat{L}(s) = \sqrt{\frac{\hat{K}_s}{\pi}} - s \quad (2)$$

3 Resultados e Discussão

Os valores estimados transformados da função K de Ripley de todas as espécies (*C. major*, *A. aculeata*, *L. divaricata* e *T. guianensis*) selecionadas para análise do padrão espacial estão apresentados na Figura 1. Diferentes níveis de agregação foram observados ao longo da escala de distâncias, sendo que as espécies *C. major* e *T. guianensis* apresentaram as menores estimativas da função e valores próximos entre si, o que contribuiu para um padrão predominante de completa aleatoriedade espacial. Capretz et al. (2012) detectaram essa diferença no padrão espacial de espécies florestais, ao longo das escalas de distâncias, comparando diferentes formações florestais. Essas diferenças ocorreram por se tratar de fisionomias florestais distintas (Cerrado, Floresta Ombrófila, Floresta Estacional Semidecidual e Restinga) e de diferentes processos ecológicos, além de características ambientais locais.

Mesmo dentro de uma única floresta, que é o caso deste estudo, o padrão espacial pode ser diversificado entre as espécies. A espécie *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntz (araucária), por exemplo, pode apresentar grande diversidade de padrões espaciais quando analisada em uma mesma área (ANJOS et al., 2004). Vários são os fatores que podem determinar o padrão de distribuição espacial de uma espécie, como, por exemplo, os aspectos reprodutivos (BRUZINGA et al., 2013). Pereira, Péllico Netto e Carvalho (2006) destacaram que a dispersão anemocórica das sementes de jequitibá explica a independência espacial entre a regeneração natural e indivíduos adultos.

Os valores da função K transformada para cada espécie estão apresentados na Figura 2. Os valores estimados (linha cheia) dentro dos envelopes de confiança (linhas tracejadas) indicam que não existe dependência espacial entre os indivíduos nas diferentes escalas de distância, o que implica

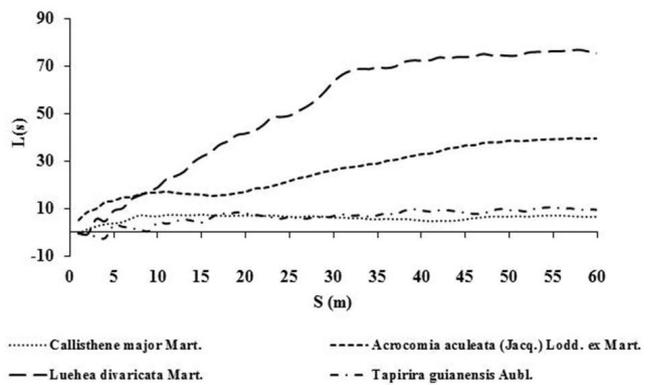


Figura 1. Valores estimados pela função K de Ripley transformada para as quatro espécies de maior densidade.

em um padrão de completa aleatoriedade espacial. Quando os valores estimados estão acima do limite superior do envelope de confiança, o padrão é de agregação, e quando estão abaixo do limite inferior, o padrão é de repulsão.

A espécie *Callisthene major* apresentou padrão de completa aleatoriedade espacial até aproximadamente 5 m de distância entre indivíduos, passando para um padrão de dependência espacial agregado até 23 m, aproximadamente, quando os indivíduos retornam para um padrão aleatório e permanecem com este até os 60 m. Essa diversidade do padrão espacial também ocorre para a espécie Araucária (ANJOS et al., 2004). É fundamental ampliar as pesquisas para compreender o padrão espacial dessas espécies e entender os fatores que mais contribuem para essa variação em função da escala de distância. Essas variações podem estar relacionadas ao porte arbóreo dos indivíduos, uma vez que indivíduos mais jovens tendem a ocorrer mais próximos uns dos outros, formando agregados. À medida que eles crescem, ocorre aumento da competição e poucos alcançam os maiores diâmetros, ficando mais distanciados uns dos outros, o que leva a uma distribuição aleatória. Esse comportamento também foi verificado em trabalhos desenvolvidos com outras espécies arbóreas (PEREIRA; PÉLLICO NETTO; CARVALHO, 2006; CAPRETZ et al., 2012; BRUZINGA et al., 2013).

As espécies *A. aculeata* e *L. divaricata* apresentaram padrão espacial predominantemente agregado. É importante ressaltar que essas espécies pertencem ao grupo ecológico das pioneiras, com dispersão descontínua (LORENZI, 2000) ao longo de sua área de ocorrência, característica que favorece a formação de agregados. *A. aculeata* é um tipo de palmeira, apresenta frutos e sementes com maiores dimensões, o que dificulta seu alcance às maiores distâncias. Isso permite que os frutos maduros, ao caírem por gravidade, localizem-se nas proximidades da planta matriz e se desenvolvam formando agregados. A regeneração natural da candeia, espécie que também apresenta comportamento típico de pioneira, possui padrão de distribuição agregado (SILVA et al., 2008), confirmando a capacidade que essa espécie tem de formar mosaicos na vegetação. Mesmo que a candeia possua dispersão anemocórica e com sementes de menores dimensões, é importante destacar que o padrão de agregação também pode

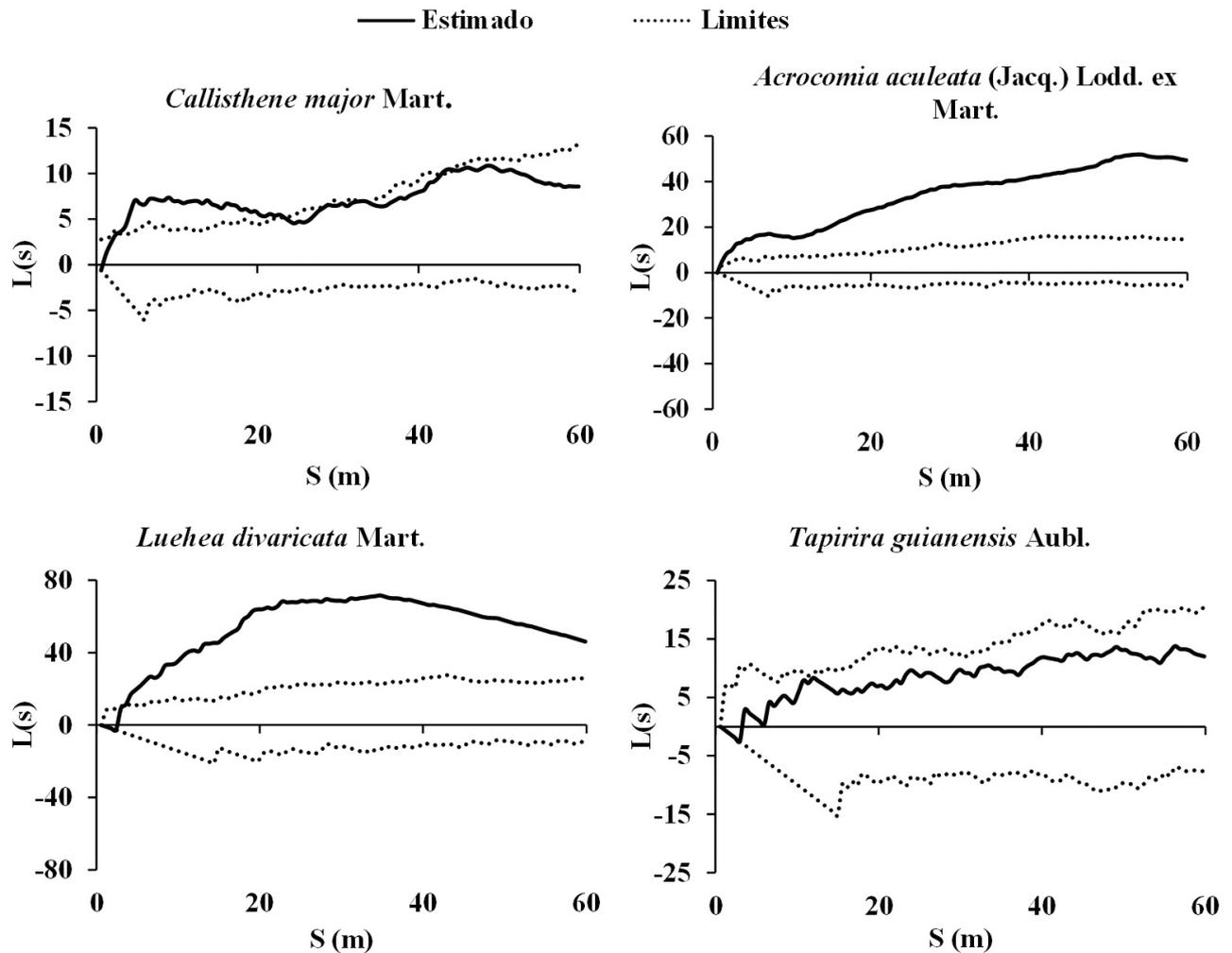


Figura 2. Limites de confiança e valores estimados pela função K de Ripley transformada para as espécies.

estar relacionado com o grupo ecológico ao qual pertence uma determinada espécie. Isso permite inferir sobre os processos de sucessão de uma floresta.

Tapirira guianensis foi a única espécie com completa aleatoriedade entre os seus indivíduos para todas as escalas de distâncias, o que pode ser explicado pela dispersão zoocórica dessa espécie, visto que os animais que se alimentam do seu fruto podem depositar as sementes em locais da floresta de forma aleatória.

O processo que determina a distribuição espacial das plantas é a síndrome de dispersão de frutos e sementes (PINHEIRO; RIBEIRO, 2001; PETERNELLI; DELLA LUCIA; MARTINS, 2004). Características intrínsecas às espécies – como sua fenologia, síndromes de dispersão e polinização, estratégias de ocupação de habitats disponíveis e potencial competitivo – explicam seu comportamento no que se refere ao padrão espacial (CAPRETZ et al., 2012).

As espécies *A. aculeata* e *L. divaricata*, que apresentaram padrão espacial agregado, tiveram seus indivíduos separados em dois grupos de diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) para análise da função K. Quando se faz essa abordagem, ocorre alteração do padrão espacial dessas espécies (Figura 3).

O padrão da *A. aculeata* é sempre agregado para árvores com DAP ≤ 30 . Estes provavelmente são indivíduos jovens e apresentaram maior nível de agregação por estarem em processo de recrutamento (CAPRETZ et al., 2012). Para Pereira, Péllico Netto e Carvalho (2006), isto ocorre devido a algum requerimento ecológico que favorece o agrupamento da regeneração de uma espécie. Para árvores com DAP > 30 cm, o padrão foi variável. Nesse último caso, o padrão se inicia como aleatório, passando para agregado aos 5 m e retornando para o aleatório aos 8 m. A partir dessa distância, permanece como aleatório até os 40 m e retorna para o padrão agregado, permanecendo com este até os 60 m. Isso permite inferir que o padrão espacial dos indivíduos de maior porte dessa espécie pode variar conforme a escala considerada. Essa variação também ocorre para a espécie *C. brasiliensis* (pequi), em que indivíduos acima de 30 cm de DAP apresentam padrão agregado somente em escalas maiores de observação (BRUZINGA et al., 2013). Segundo Pereira, Péllico Netto e Carvalho (2006), os indivíduos de maior diâmetro da espécie jequitibá também não possuem um padrão espacial definido.

O padrão das árvores de *L. divaricata* com DAP ≤ 30 cm foi predominantemente agregado. Os indivíduos com DAP > 30 cm

possuem padrão espacial aleatório em todas as distâncias consideradas, confirmando a hipótese de que árvores com maior porte, provavelmente as de maior idade e já estabelecidas na floresta, ocorrem independentes umas das outras.

O fato de as árvores com $DAP \leq 30$ cm possuírem padrão agregado é devido a estas serem oriundas das sementes das árvores maiores, que possuem padrão aleatório e cumprem o papel de matrizes. Após a dispersão das sementes, a

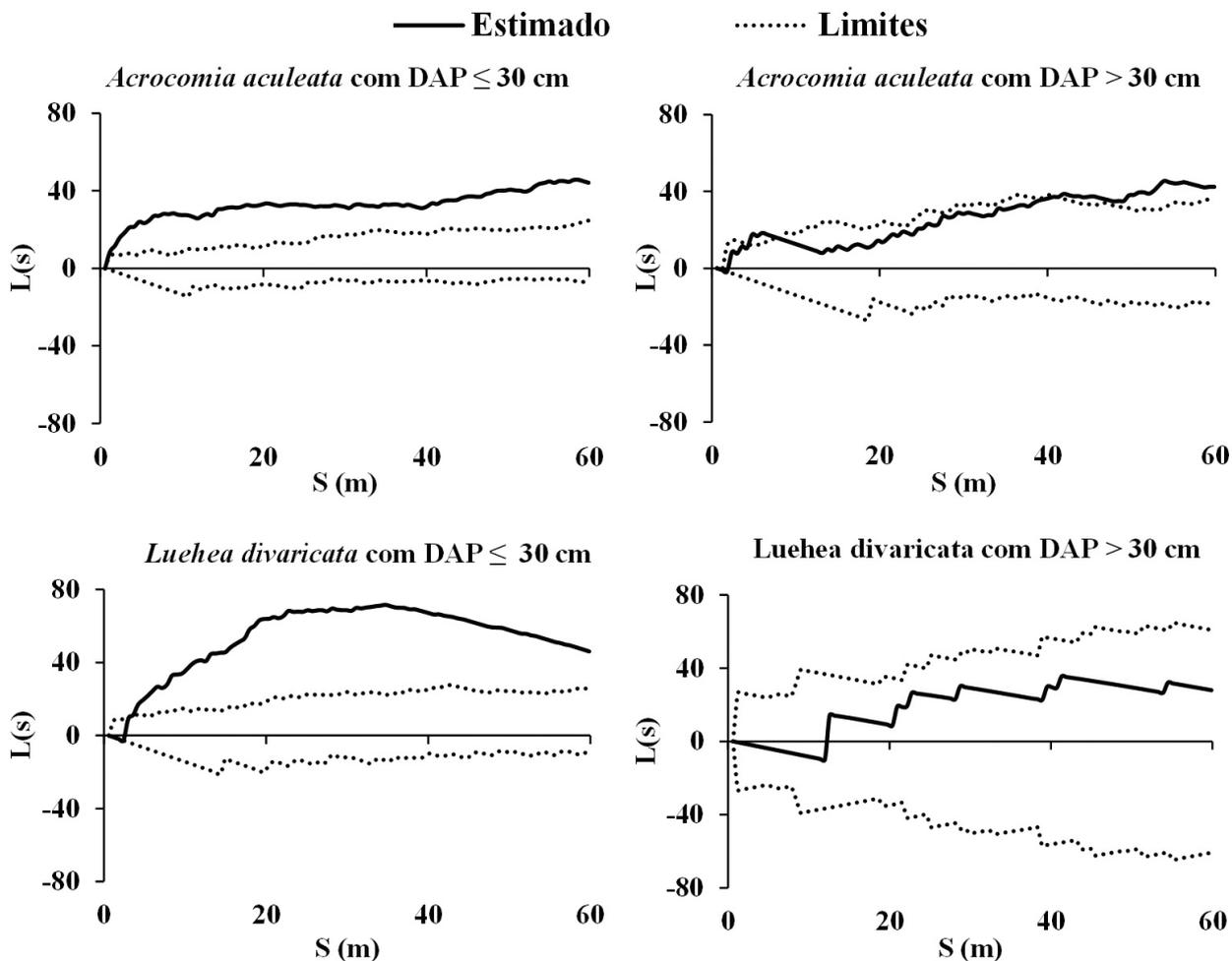


Figura 3. Limites de confiança e valores estimados pela função K de Ripley transformada, considerando indivíduos com diâmetro inferior e superior a 30 cm, para a espécie *Acrocomia aculeata* e *Luehea divaricata*.

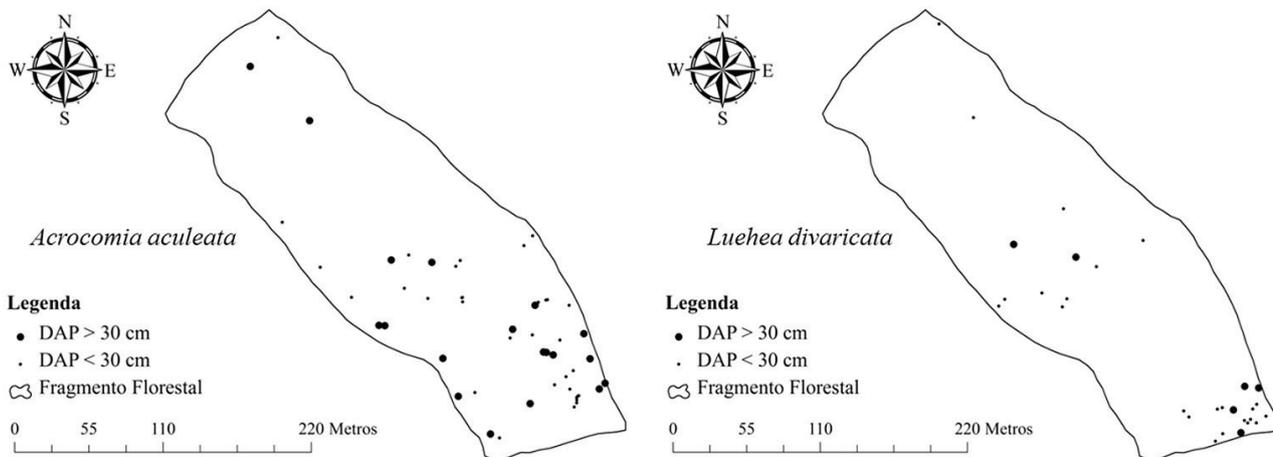


Figura 4. Distribuição espacial dos indivíduos com diâmetro inferior e superior a 30 cm para as espécies *Acrocomia aculeata* e *Luehea divaricata*.

regeneração se desenvolve nas proximidades da árvore matriz (Figura 4).

4 Conclusões

O padrão de distribuição espacial é diversificado quando se consideram diferentes espécies dentro de uma mesma floresta, pois este depende de características próprias da espécie, como a síndrome de dispersão. Uma mesma espécie apresenta padrão espacial variado quando se consideram diferentes classes de diâmetro, com agregação para árvores de menor porte diamétrico e jovens, e aleatorização para árvores maiores e de idade avançada. É preciso ampliar os estudos com o padrão espacial de espécies arbóreas para compreender quais variáveis são fundamentais na influência dos padrões de agregação, repulsão ou aleatoriedade.

Referências

- ANJOS, A.; MAZZA, M. C. M.; SANTOS, A. C. M. C.; DELFINI, L. T. Análise do padrão de distribuição espacial da Araucária (*Araucária Angustifolia*) em algumas áreas do Paraná, utilizando a função K de Ripley. *Scientia Forestalis*, n. 66, p. 36-45, 2004.
- BRUZINGA, J. S.; OLIVEIRA, M. L. R.; MACHADO, E. L. M.; LEITE, H. G.; PEREIRA, I. M.; NOGUEIRA, G. S. Distribuição espacial de indivíduos adultos de pequi. *Scientia. Forestalis*, v. 41, n. 98, p. 249-256, 2013.
- CAPRETZ, R. L.; BATISTA, J. L. F.; SOTOMAYOR, J. F. M.; CUNHA, C. R.; NICOLETTI, M. F.; RODRIGUES, R. R. Padrão espacial de quatro formações florestais do estado de São Paulo, através da função k de Ripley. *Ciência Florestal*, v. 22, n. 3, 2012.
- CARVALHO, L. G.; OLIVEIRA, M. S.; ALVES, M. C.; VIANELLO, R. L.; SEDIYAMA, G. C.; CASTRO NETO, P.; DANTAS, A. A. A. Clima. In: SCOLFORO, J. R. S.; CARVALHO, L. M. T.; OLIVEIRA, A. D. *Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado de Minas Gerais - Componentes Geofísico e Biótico*. Lavras: UFLA, 2008, p. 89-102.
- HIGUCHI, P.; SILVA, A. C.; VAN DEN BERG, E.; PIFANO, D. S. Associações espaciais entre indivíduos de diferentes espécies de *miconia* spp. ruiz & pav. (Melastomataceae). *Revista Árvore*, v. 35, n. 3, p. 381-389, 2011.
- LORENZI, H. 2000. *Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil*. 3. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum.
- PEREIRA, A. A.; PÉLLICO NETTO, S.; CARVALHO, L. M. T. Análise da distribuição espacial de Jequitibá Rosa em uma floresta estacional sub-montana. *Revista Acadêmica*, v. 4, n. 66, p. 21-34, 2006.
- PETERNELLI, E. F.; DELLA LUCIA, T. M. C.; MARTINS, S. V. Espécies de formigas que interagem com as sementes de *Mabea fistulifera* Mart. (Euphorbiaceae). *Revista Árvore*, v. 28, n. 5, p. 733-738, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622004000500013>
- PINHEIRO, F.; RIBEIRO, J. R. Síndromes de dispersão de sementes em matas de galeria do Distrito Federal. In: RIBEIRO, J. F.; FONSECA, C. E. L.; SOUSA-SILVA, J. C. (Eds.). *Cerrado: caracterização e recuperação de matas de galeria*. Brasília: Embrapa, 2001. p. 335-361.
- RIPLEY, B. D. Tests of randomness for spatial point patterns. *Journal of the Royal Statistic Society B*, v. 41, p. 368-374, 1979.
- RIPLEY, B. D. The second-order analysis of stationary point processes. *Journal of Applied Probability*, v. 13, p. 255-266, 1976. <http://dx.doi.org/10.2307/3212829>
- RODE, R.; FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A.; GALVÃO, F. Análise do padrão espacial de espécies e de grupos florísticos estabelecidos em um povoamento de *Araucaria angustifolia* em uma floresta ombrófila mista no centro-sul do Paraná. *Floresta*, v. 40, n. 2, p. 255-268, 2010.
- SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; MELLO, J. M.; SILVA, C. P. C.; GUEDES, I. C. L. Análise da estrutura fitossociológica dos fragmentos inventariados e dos grupos fisionômicos. In: SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M. DE; OLIVEIRA, A. D.; *Cerrado – Florística, Estrutura, Diversidade, Similaridade, Distribuição Diamétrica e de Altura, Volumetria, Tendências de Crescimento e Manejo Florestal*. Lavras: Ufla, 2008, p. 223-264.
- SILVA, M. A.; MELLO, J. M.; SCOLFORO, J. R. S.; CZANCK JÚNIOR, L.; ANDRADE, I. S.; OLIVEIRA, A. D. Análise da distribuição espacial da candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) Macleish) sujeita ao sistema de manejo porta-sementes. *Cerne*, v. 14, n. 4, p. 311-316, 2008.