

## FUNÇÃO K DE RIPLEY E ÍNDICE DE MORAN NA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA REGENERAÇÃO NATURAL DA CANDEIA EM ÁREAS MANEJADAS

Emanuel José Gomes de ARAÚJO<sup>1</sup>  
Sylvio PÉLLICO NETTO<sup>2</sup>  
Sebastião do Amaral MACHADO<sup>2</sup>  
Ana Paula DALLA CORTE<sup>2</sup>  
José Roberto Soares SCOLFORO<sup>3</sup>  
Hassan Camil DAVID<sup>2</sup>  
Vinícius Augusto MORAIS<sup>4</sup>

- RESUMO: Dada a importância de conhecer as características ecológicas de espécies florestais, o objetivo deste trabalho foi descrever o padrão espacial da regeneração natural da espécie candeia após a aplicação do sistema de manejo com porta sementes. Os dados foram coletados em 46 populações submetidas ao manejo com porta sementes na região sul de Minas Gerais. Em cada população foram contabilizados e georreferenciados todos os indivíduos de candeia (regenerantes, arbóreos e cepas provenientes da exploração) e de outras espécies. Em cada regeneração também foi mensurada a altura total. Aplicou-se a função *K* de Ripley univariada e o índice de Moran para descrever o padrão espacial da regeneração. Para verificar a relação espacial da regeneração com os indivíduos arbóreos (candeia e outras espécies) e com as cepas de candeia, aplicou-se a função *K* de Ripley bivariada. As duas metodologias apresentaram resultados semelhantes, indicando que o padrão da candeia predominante é o agregado e, em alguns casos, varia entre o agregado e o aleatório. Além disso, predomina o padrão de interação entre a regeneração e as cepas remanescentes das árvores removidas no manejo florestal, significando uma relação entre a brotação da regeneração e as cepas remanescentes.
- PALAVRAS-CHAVE: Distribuição espacial; Agregação; *Eremanthus erythropappus*; Correlação espacial.

---

<sup>1</sup> Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Ciências Florestais, CEP: 23897-000, Seropédica, RJ, Brasil. E-mail: ejgaraujo@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná, Departamento de Ciências Florestais, CEP: 80210-170, Curitiba, PR, Brasil. E-mail: ejgaraujo@gmail.com; sylviopelliconetto@gmail.com; samachado@ufpr.br; anapaulacorte@gmail.com

<sup>3</sup> Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais, CEP: 37200-000, Lavras, MG, Brasil. E-mail: jscolforo@dcf.ufla.br

<sup>4</sup> Universidade do Estado do Mato Grosso, Departamento de Ciências Florestais, CEP: 78580-000, Alta Floresta, MT, Brasil, E-mail: vemorais@gmial.com

## 1 Introdução

O sistema de manejo com porta sementes é o mais utilizado para *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish (Candeia) em áreas nativas. Ao verificar a sustentabilidade dessa prática, é preciso compreender, dentre outros fatores, o padrão de distribuição espacial de sua regeneração natural. Isso permite avaliar como os processos ecológicos interferem no desenvolvimento de uma espécie (CAPRETZ et al., 2012). Ainda, é preciso relacionar o padrão espacial com o crescimento, competição, reprodução e mortalidade (ANJOS, 1998), buscando entender os possíveis processos ecológicos responsáveis pelo padrão (PALUDO et al., 2011).

Um dos principais fatores que explica o padrão espacial da regeneração de espécies florestais é a síndrome de dispersão das sementes (CAPRETZ et al., 2012). O padrão agregado é comum em florestas tropicais, formando mosaicos, nos quais há predominância de algumas espécies, em razão de fatores ambientais, em especial à luminosidade, quando se trata de espécies exigentes a luz. A agregação foi verificada em diversos trabalhos (DALMASO et al., 2013; MACHADO et al., 2012; RODE et al., 2010; SILVA et al., 2008; ANJOS et al., 2004) e o seu conhecimento permite definir critérios de manejo e metodologias adequadas de amostragem para a regeneração (PALUDO et al., 2011; BRUZINGA et al., 2013; SILVA et al., 2008).

O estudo da distribuição espacial de espécies florestais implica no teste da hipótese do padrão espacialmente aleatório ( $H_0$ : padrão aleatório), contra duas hipóteses alternativas ( $H_1$ : contrária a  $H_0$ ): padrão agregado ou padrão regular. O padrão aleatório indica independência espacial entre indivíduos; o padrão agregado caracteriza atração espacial e o padrão regular caracteriza repulsão espacial (ARAÚJO et al., 2014).

Dentre as metodologias utilizadas para descrever o padrão espacial de observações, tem-se a função  $K$  de Ripley (RIPLEY, 1977), que tem sido aplicada com frequência 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; PEREIRA et al., 2006) e o índice de Moran (LEGENDRE; FORTIN 1989), ainda pouco aplicado em situações florestais. As duas metodologias permitem inferir sobre a correlação entre observações no espaço geográfico.

O objetivo deste trabalho foi analisar e descrever a estrutura espacial da regeneração natural da espécie *Eremanthus erythropappus* em áreas submetidas ao sistema de manejo com porta sementes.

## 2 Material e Métodos

### 2.1 Área de estudo e coleta de dados

Os dados para esta pesquisa foram obtidos em 46 populações, com dimensões de 20 x 20 m, com a espécie florestal *E. erythropappus* após terem sido submetidas ao sistema de manejo com porta sementes (SCOLFORO et al., 2012). Todas as populações estão distribuídas na região Sul do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 22°16'48'' S, 45°24'20'' W e 21°59'04'' S, 44°45'16'' W. A altitude média da região varia de 950 m a 1.750 m, com precipitação média anual entre 1.600 mm e 1.700 mm e temperatura média anual entre 16 °C e 17 °C.

Em todas as populações foi feita a contagem de quatro tipos de eventos: indivíduos regenerantes de candeia (altura  $\geq 0,1$  m e diâmetro a 1,30 m do solo  $< 5$  cm), indivíduos arbóreos de candeia (diâmetro a 1,30 m do solo  $\geq 5$  cm), indivíduos arbóreos de outras espécies (diâmetro a 1,30 m do solo  $\geq 5$  cm) e de cepas de candeia provenientes das árvores removidas durante o manejo. Cada evento supracitado será denominado ao longo do texto de regeneração (R), Porta sementes (PS), Nativas (N) e Tocos (T), respectivamente. Para todos eles foram obtidas as coordenadas cartesianas (x,y) a partir da origem (0,0), que foi definida como centro de cada população, com auxílio de trena graduada e bússola. Os eventos regeneração, porta sementes, nativas e tocos foram encontrados em 46, 39, 34 e 46 populações, respectivamente.

## 2.2 Análise dos dados

A função  $K$  de Ripley (RIPLEY, 1977) avaliou o padrão espacial do evento regeneração (caso univariado) e sua relação espacial (caso bivariado) com os eventos porta sementes, nativas e tocos. Foram avaliadas as relações entre pares de eventos (pares de pontos) a cada 5 cm (h), pois trata-se de regeneração natural. Não existe uma regra para a determinação do valor de h, sendo esse dependente do fenômeno a ser estudado e do interesse da pesquisa. A distância máxima considerada foi de 10 m, que corresponde à metade de um dos lados da área que limita a população. Isso foi definido porque em áreas retangulares, o estimador da função  $K$  de Ripley é não viciado para distâncias inferiores à metade do menor lado do retângulo (DIGGLE, 1983), além de ser a distância máxima entre árvores porta sementes recomendada para esse sistema de manejo (SCOLFORO et al., 2012). Aplicou-se 999 (m) simulações Monte Carlo para construir os envelopes de confiança, com  $(1/(1+m)) \times 100\%$  de probabilidade, nos casos univariado e bivariado. Assim, o teste de hipótese do padrão espacial de completa aleatoriedade ( $H_0$ ) foi a 99% de probabilidade (ANJOS et al., 2004).

O estimador da função  $K$  no caso univariado baseia-se na correção isotrópica de bordadura segundo a formulação a seguir:

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

$e s > 0$  (1)

em que  $n$  é o número de árvores na região de estudo;  $x_i$  e  $x_j$  as coordenadas dos pontos do mapa;  $\|x_i - x_j\|$  é a distância euclidiana entre as localizações  $x_i$  e  $x_j$ ;  $s$  é um vetor arbitrário de distâncias;  $\hat{\lambda}_n = n/A$  é o número de árvores dividido pela área da região de estudos, sendo um estimador não viciado da intensidade do processo;  $W_I(x_i, x_j)$  é a 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;  $I(U)$  é uma função indicadora que assume o valor 1 (um) sempre que a condição  $U$  for verdadeira e zero quando falsa.

A utilização da função transformada  $\hat{L}(s)$  foi aplicada para facilitar a interpretação gráfica da função  $K$  de Ripley (CAPRETZ, 2004), sendo dada por:

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

em que  $\hat{L}(s)$  é o valor da função  $\hat{K}_s$  transformada;  $\hat{K}_s$  é o estimador da função de Ripley no caso univariado e  $s$  é um vetor de distâncias.

Para a função  $K$  bivariada, também chamada de função cruzada, investigou-se a relação espacial entre dois grupos de eventos como, por exemplo, dois grupos de árvores ou entre árvores e regeneração natural. A estimativa da função  $K$  bivariada é feita de forma análoga a função univariada (CAPRETZ, 2004). Assim,

$$\widehat{K}_{12}(s) = \frac{1}{\hat{\lambda}_1 \hat{\lambda}_2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_I^I(x_{1i}, x_{2j}) I(\|x_{1i} - x_{2j}\| < s), \text{ para } i \neq j \text{ e } s > 0 \quad (3)$$

em que:  $\hat{\lambda}_1 = n_1/\|A\|$  é o estimador não viciado da intensidade do primeiro processo;  $\hat{\lambda}_2 = n_2/\|A\|$  é o estimador não viciado da intensidade do segundo processo;  $W_I(x_{1i}, x_{2j})$  é a função de correção isotrópica de bordadura centrada nas árvores do primeiro processo e  $I(U)$  é uma função indicadora centrada nas árvores do primeiro processo.

Nos dois casos, os envelopes de confiança (limites de confiança) foram definidos por meio de simulações Monte Carlo. Após a realização de simulações, definiu-se o intervalo de confiabilidade, que delimita a região de aceitação da hipótese (Hipótese  $H_0$ ) do padrão espacialmente aleatório (caso univariado) ou independente (caso bivariado). Na construção desse intervalo foram armazenados os valores mínimos e máximos de  $K$ , obtidos nas simulações para cada distância  $s$ .

Para o índice de Moran, o teste foi realizado com 99% de probabilidade, em que se testou a hipótese  $H_0$ : padrão aleatório da regeneração. Quando o teste foi significativo, essa hipótese foi rejeitada e duas possibilidades contrárias a  $H_0$ : dispersão ou agregação foram avaliadas. Este índice assume valores entre -1 e 1. Valores próximos de 1 indicam agregação e valores próximos de -1 indicam dispersão. Valores próximos de zero retratam um padrão espacial aleatório (LOREGIAN et al., 2012). A análise foi realizada com base na normalização do valor original. Quando os valores normalizados de z-scores se encontram entre -2,58 e 2,58, região de aceitação da hipótese  $H_0$ , o padrão é aleatório. Quando z-score > 2,58, o padrão espacial é agregado e quando z-score < -2,58, o padrão é de dispersão, com 99% de probabilidade. A variável utilizada para a análise foi a altura total (Ht) das regenerações e os cálculos foram baseados no método do inverso da distância, utilizando a distância euclidiana.

Matematicamente o índice de Moran global ( $I$ ) pode ser estimado da seguinte maneira:

$$I = \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (z_i - z_m)(z_j - z_m) \right) / \sum_{i=1}^n (z_i - z_m)^2 \quad (4)$$

em que  $n$  é o número de observações;  $w_{ij}$  é a matriz normalizada de proximidade espacial;  $z_i$  é o valor padronizado do atributo referente a  $i$ -ésima observação (ponto);  $z_j$  o valor padronizado de seus respectivos vizinhos e  $z_m$  é o valor médio do atributo na área de estudo.

#### 4 Resultados e discussão

O número total de populações analisadas, com a função  $K$  de Ripley, na condição univariada (R) foi 46 e nas condições bivariadas R+PS, R+N e R+T, foi de 39, 34 e 46, respectivamente. No caso univariado, a regeneração natural da candeia apresentou padrão espacial totalmente agregado (A) em 54% das populações, podendo isso ser explicado pelo recrutamento dos indivíduos (CAPRETZ et al., 2012). A agregação da regeneração natural já foi verificada em diversas espécies florestais (CAPRETZ et al., 2012; ANJOS et al., 2004; SILVA et al., 2008; PALUDO et al., 2011; PALUDO et al., 2009) e isso está diretamente relacionado com a síndrome de dispersão de sementes (PALUDO et al., 2009). Espécies que possuem dispersão pelo vento, como é o caso da candeia, podem favorecer a formação de agregados, dependendo da direção do vento, onde se desenvolvem inicialmente vários indivíduos. Dentre as 25 (54%) populações que apresentaram agregação total (A), 12 estão em fase inicial de desenvolvimento e 13 com idades avançadas, porém, estas últimas são caracterizadas por apresentarem as maiores áreas basais do estrato arbóreo (PS e N).

O padrão espacial de cada população, por meio da Função  $K$  e o teste para o índice de Moran, é apresentado na Tabela 1. Das 46 populações analisadas, o teste para o índice de Moran foi significativo ( $p$ -valor  $< 0,01$ ) em 26 delas conferindo agregação da regeneração. Esse resultado é semelhante aos obtidos pela função  $K$  de Ripley, contudo, em sete populações em que a função  $K$  detectou padrão totalmente agregado, o índice de Moran classificou como padrão aleatório ( $p$ -valor  $> 0,01$ ). Essas populações foram as que apresentaram baixa densidade de regenerações e elevada área basal do estrato arbóreo com relação direta entre o  $p$ -valor e a área basal (Figura 1A). Em 19 populações o teste para o índice de Moran foi não significativo ( $p$ -valor  $> 0,01$ ), indicando aceitação da hipótese de completa aleatoriedade espacial. No entanto, a função  $K$  de Ripley tendeu a classificar o padrão espacial como variável entre o agregado e o aleatório, dependendo da escala de distância.

Tabela 1 - Estatísticas obtidas para o índice de Moran nas 46 populações estudadas e seus respectivos padrões espaciais, com 99 % de probabilidade

| População | Índice de Moran | Valor de Z | p-valor | Moran     | Ripley   |
|-----------|-----------------|------------|---------|-----------|----------|
| 1         | 0,0906          | 3,0028*    | 0,0027  | Agregado  | Agregado |
| 2         | 0,2142          | 11,876*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 3         | 0,0038          | 0,3117     | 0,7552  | Aleatório | Variável |
| 4         | 0,2767          | 5,7887*    | 0,0000  | Agregado  | Variável |
| 5         | 0,1880          | 9,3582*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 6         | 0,3603          | 7,5983*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 7         | 0,4141          | 8,5382*    | 0,0000  | Agregado  | Variável |
| 8         | 0,2985          | 7,1610*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 9         | 0,4083          | 7,4753*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 10        | 0,2873          | 10,657*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 11        | 0,0456          | 3,3915*    | 0,0007  | Agregado  | Agregado |
| 12        | 0,2077          | 2,3877     | 0,0170  | Aleatório | Variável |
| 13        | 0,3633          | 25,113*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 14        | 0,0775          | 5,8246*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 15        | -0,0040         | 1,5295     | 0,1261  | Aleatório | Variável |
| 16        | -0,2861         | -0,337     | 0,7355  | Aleatório | Variável |
| 17        | 0,0692          | 1,6062     | 0,1082  | Aleatório | Agregado |
| 18        | -0,1637         | -0,644     | 0,5190  | Aleatório | Variável |
| 19        | 0,0909          | 3,7854*    | 0,0002  | Agregado  | Agregado |
| 20        | 0,3507          | 1,9635     | 0,0496  | Aleatório | Variável |
| 21        | 0,1326          | 2,2223     | 0,0263  | Aleatório | Agregado |
| 22        | 0,0484          | 1,3983     | 0,1620  | Aleatório | Agregado |
| 23        | -0,2000         | -1,673     | 0,0943  | Aleatório | Variável |
| 24        | 0,0961          | 1,6254     | 0,1041  | Aleatório | Variável |
| 25        | 0,1361          | 3,0886*    | 0,0020  | Agregado  | Agregado |
| 26        | 0,0733          | 2,8148*    | 0,0049  | Agregado  | Agregado |
| 27        | 0,0676          | 3,3530*    | 0,0008  | Agregado  | Agregado |
| 28        | 0,2565          | 6,0609*    | 0,0000  | Agregado  | Variável |
| 29        | 0,1313          | 3,3011*    | 0,0010  | Agregado  | Variável |
| 30        | 0,0321          | 1,2692     | 0,2043  | Aleatório | Agregado |

Tabela 1 (continuação) - Estatísticas obtidas para o índice de Moran nas 46 populações estudadas e seus respectivos padrões espaciais, com 99 % de probabilidade

| População | Índice de Moran | Valor de Z | p-valor | Moran     | Ripley   |
|-----------|-----------------|------------|---------|-----------|----------|
| 31        | 0,0525          | 1,7848     | 0,0743  | Aleatório | Variável |
| 32        | 0,1816          | 6,1857*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 33        | 0,4553          | 7,0559*    | 0,0000  | Agregado  | Variável |
| 34        | 0,0518          | 1,6022     | 0,1091  | Aleatório | Agregado |
| 35        | 0,0160          | 0,6575     | 0,5108  | Aleatório | Variável |
| 36        | 0,1847          | 6,6219*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 37        | 0,0720          | 2,0543     | 0,0399  | Aleatório | Agregado |
| 38        | 0,3259          | 3,1669*    | 0,0015  | Agregado  | Variável |
| 39        | 0,2786          | 4,2870*    | 0,0000  | Agregado  | Variável |
| 40        | NC              | NC         | NC      | NC        | Variável |
| 41        | 0,2056          | 6,2300*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 42        | 0,0734          | 2,2857     | 0,0223  | Aleatório | Agregado |
| 43        | 0,1697          | 6,5134*    | 0,0000  | Agregado  | Agregado |
| 44        | 0,3115          | 3,5978*    | 0,0003  | Agregado  | Variável |
| 45        | 0,1786          | 2,2585     | 0,0239  | Aleatório | Variável |
| 46        | 0,3560          | 1,3500     | 0,1770  | Aleatório | Variável |

Essa relação infere que em condições de intensa área basal do estrato arbóreo, os testes tendem a significância, retratando a regeneração que se desenvolve formando agregados no interior de clareiras (Figura 2). Nessas condições, a regeneração consegue desenvolver-se, devido a disponibilidade imprescindível de luz (SCOLFORO et al., 2014), formando agregados que foram detectados pela função *K*.

A Figura 3 apresenta os envelopes de confiança e os valores estimados por meio da função *K* que predominou nas populações para o caso univariado. O padrão agregado é comprovado pelos valores estimados acima do limite superior dos envelopes de confiança, refletindo a capacidade que essa espécie tem para a formação de povoamentos puros, que são popularmente denominados de candeiais. Isso deve-se principalmente ao tipo de dispersão de semente em relação à planta mãe (CRAWLEY, 1986). No caso da candeia, a dispersão anemocórica contribui para a agregação (SILVA et al., 2008), mesma relação observada para as espécies *Cariniana legalis* (PEREIRA et al., 2006) e *Cedrela fissilis* Veill. (MACHADO et al., 2012), que possuem dispersão de suas sementes pelo vento. Essa capacidade das espécies se regenerarem formando agregados (SILVA et al., 2008; MACHADO et al., 2012) sugere a formação de mosaicos que potencializam as áreas para o manejo.

Quanto à disposição espacial da regeneração natural em relação ao estrato arbóreo (PS e N) observa-se que quando o estrato arbóreo é menos denso (Figura 2A), a regeneração cobre quase toda a área formando vários agregados. Nesse caso os valores estimados pela função K estão acima dos envelopes de confiança e o teste do índice de Moran foi significativo ( $p$ -valor  $< 0,01$ ). A relação entre a regeneração natural e o estrato arbóreo é de independência quando o estrato arbóreo é menos denso (Figura 2B), pois os valores estimados pela função K estão entre os envelopes de confiança. Já quando o estrato arbóreo é expressivo, a regeneração natural forma agregados no interior das clareiras e retrata a repulsão entre os dois eventos (Figura 2C).

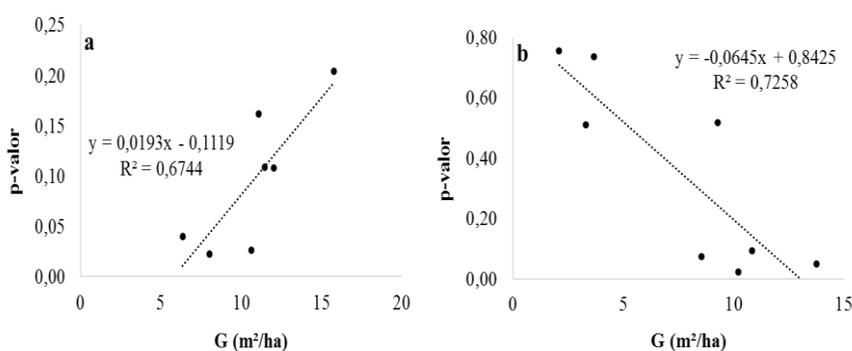


Figura 1 - Valores de probabilidade resultantes do teste para o índice de Moran em função da área basal nas populações que apresentaram divergência entre os métodos. Eixo y representa os  $p$ -valores e eixo x representa a área basal, em m²/ha.

A presença de clareiras também favorece a agregação de indivíduos jovens (CAPRETZ et al., 2012). Como o sistema de manejo com porta sementes permite isso, a regeneração ocorre com muitos indivíduos, confirmando o potencial da candeia para o manejo. Este é inviável somente quando realizado sem seguir os critérios propostos e já comprovados como sustentáveis (SCOLFORO et al., 2012; ARAÚJO et al., 2012).

O padrão espacial foi diversificado na análise bivariada das populações. A mortalidade, o recrutamento e fatores bióticos, como a competição intraespecífica e a mortalidade dependente de densidade podem ser responsáveis pela mudança de um padrão espacial quando se trabalha com indivíduos de maior porte (DALMASO et al., 2013). Predominou o padrão aleatório (79%) entre a regeneração e indivíduos arbóreos de candeia (porta sementes). O padrão aleatório (44%) com indícios de repulsão (32%) foi o predominante entre a regeneração e nativas. Na relação entre a regeneração e tocos de candeia, predominou o padrão aleatório (35%) com indícios de agregação (61%).

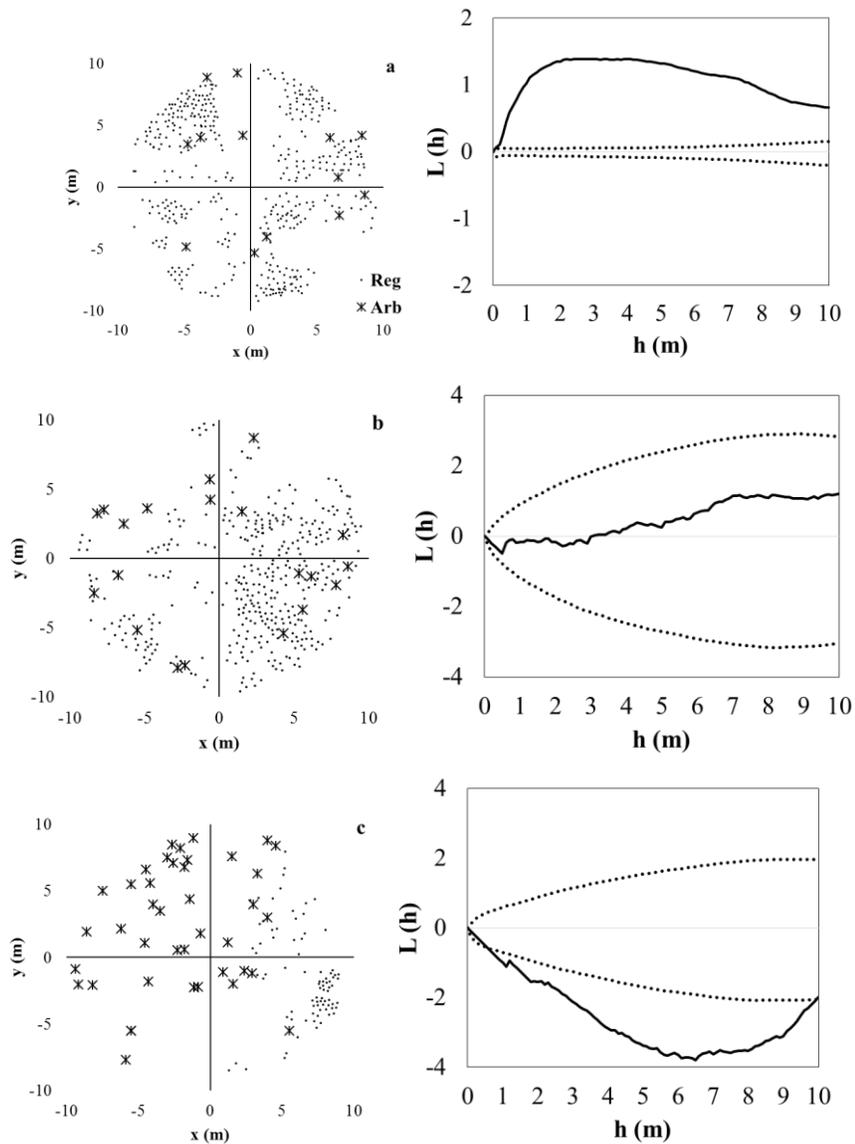


Figura 2 - Distribuição espacial da regeneração natural da candeia (Reg) e estrato arbóreo (Arb), a partir das coordenadas cartesianas (x, y), e valores estimados ( $L(h)$ ) por meio da função  $K$  de Ripley no caso univariado para a regeneração (a) e bivariado entre regeneração e estrato arbóreo (b, c).

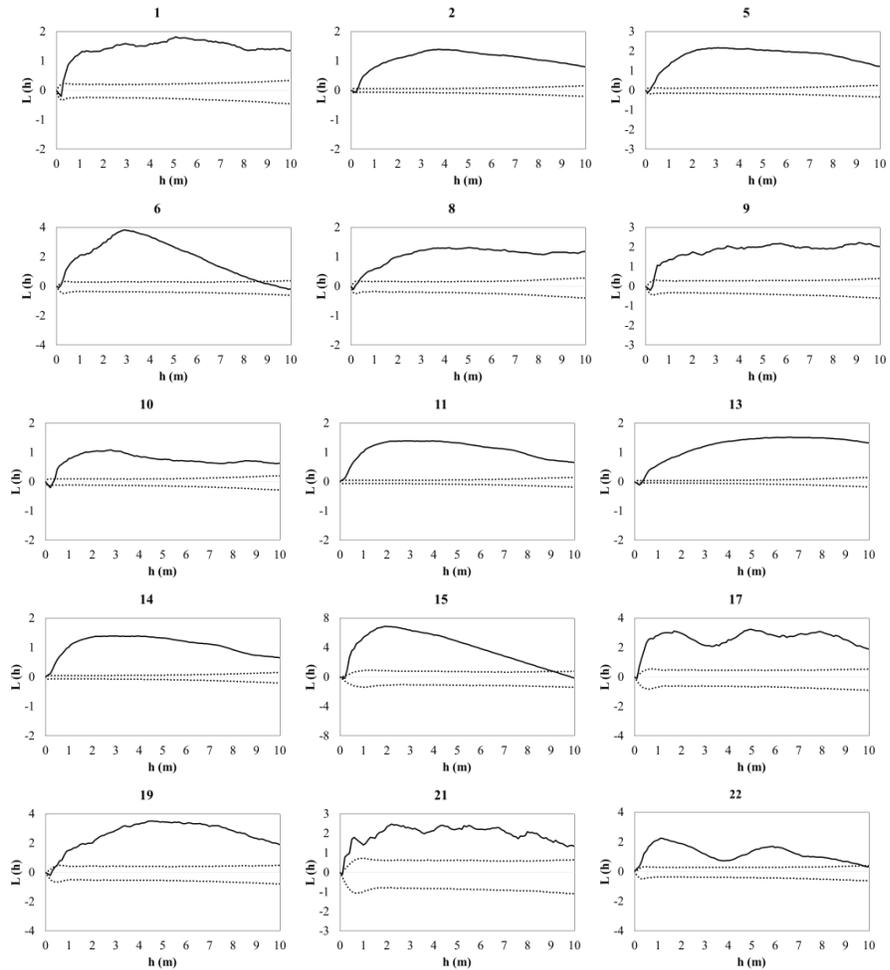


Figura 3 - Valores estimados (linha contínua) e limites de confiança (linhas tracejadas) da função K de Ripley univariada para as populações com regeneração de candeia após realização do sistema de manejo com porta sementes. Eixo y representa os valores estimados pela função K de Ripley ( $L(h)$ ) e eixo x representa a distância (h), em m.

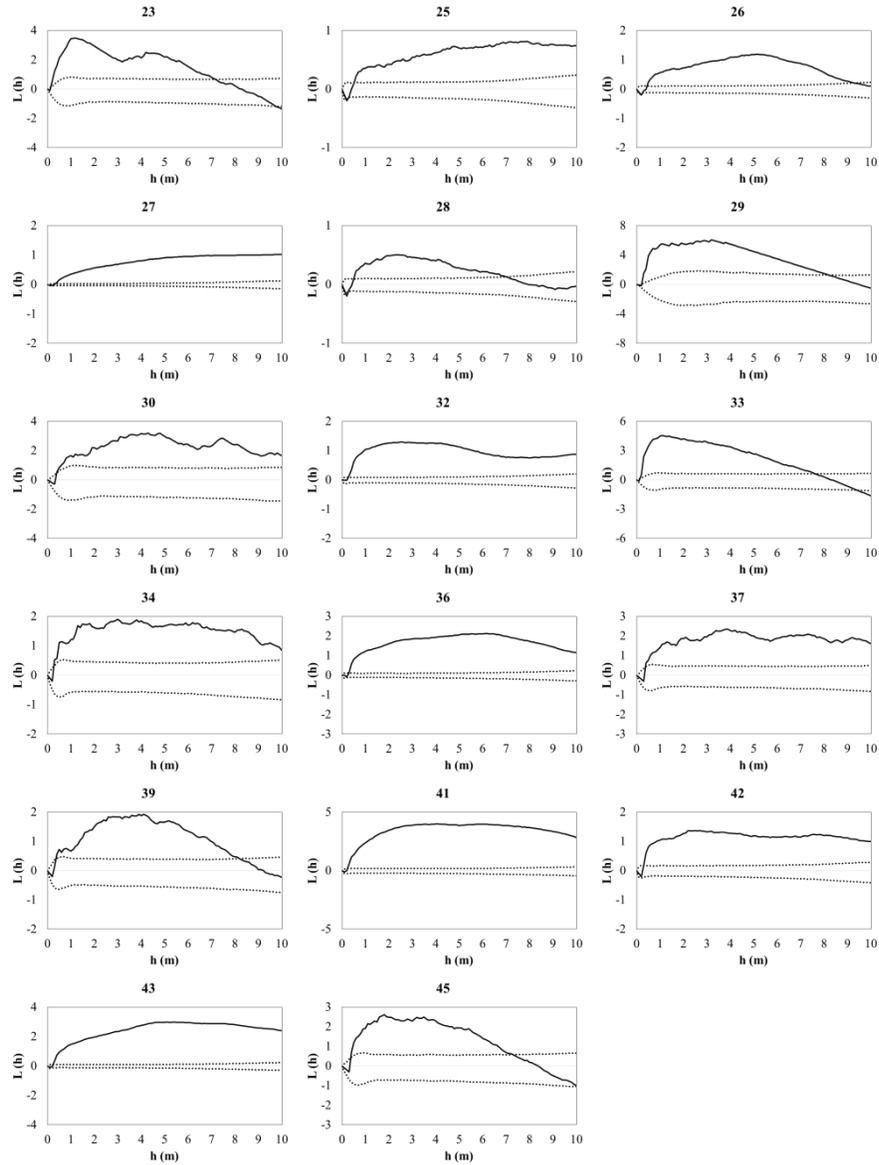


Figura 3 (Continuação) - Valores estimados (linha contínua) e limites de confiança (linhas tracejadas) da função  $K$  de Ripley univariada para as populações com regeneração de candeia após realização do sistema de manejo com porta sementes. Eixo y representa os valores estimados pela função  $K$  de Ripley ( $L(h)$ ) e eixo x representa a distância ( $h$ ), em m.

Na Figura 4 estão apresentados os limites de confiança, com 99% de probabilidade, bem como os valores estimados pela função  $K$  de Ripley para retratar a relação espacial entre a regeneração e os indivíduos porta sementes. O padrão espacial mais frequente foi o de aleatoriedade, ou seja, a regeneração natural da candeia desenvolve-se independente dos indivíduos arbóreos remanescentes e que são as portas sementes corroborando com os resultados obtidos por Silva et al. (2008). A relação de agregação ou independência entre dois eventos depende de como os recursos locais são explorados (PIANKA, 1994). Assim, percebe-se que não está ocorrendo competição pelos recursos, pois provavelmente os indivíduos arbóreos e regenerantes da candeia os exploraram de formas diferentes.

A repulsão entre árvores porta sementes e regeneração da candeia ocorreu em três populações, sendo mais expressivo naquelas com elevada densidade de indivíduos arbóreos ( $367 \text{ indivíduos.ha}^{-1}$ ). Como nessas condições o dossel da área fica fechado, limitando a disponibilidade de luz, a regeneração tende a se desenvolver afastada dos indivíduos arbóreos, caracterizando a inibição de um evento pela presença do outro. Dois motivos podem explicar a repulsão entre eventos, sendo elas a competição pelos recursos ou exigências ecológicas diferentes. No presente caso, é evidente a competição pela disponibilidade de luz entre regeneração e árvores porta sementes.

Para a análise bivariada entre a regeneração da candeia e indivíduos arbóreos de espécies nativas o padrão espacial de aleatoriedade ocorreu em 15 (44%) das 31 populações analisadas, o que caracteriza independência espacial entre esses eventos (Figura 5). Isso mostra que a regeneração natural da candeia se desenvolve também de forma independente do estrato arbóreo nativo para tais casos.

Em 11 populações o padrão espacial variou entre o de aleatoriedade e repulsão. Nesses casos a área basal ocupada pelo estrato arbóreo nativo foi sempre superior a  $2 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ , indicando menor dominância da espécie candeia. Essas populações também são as que possuem menos de 70% de seus indivíduos sendo candeia. O padrão de repulsão é mais acentuado onde os valores de área basal do estrato arbóreo nativo ultrapassam  $6 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$  (Figura 5-POPULAÇÃO 43).

Na Figura 6 os valores da função  $K$  e seus respectivos envelopes de confiança podem ser visualizados para a relação espacial entre a regeneração da candeia e os tocos das árvores de candeia removidas durante a realização do manejo. Em 61% das populações, essa relação foi de agregação espacial, principalmente para distâncias até 5 m. Isso implica que a presença de um evento contribui de forma positiva na presença do outro. Tal acontecimento pode ser indícios de que a regeneração natural da candeia pode ser conduzida via brotação dos tocos e raízes expostas na superfície do solo.

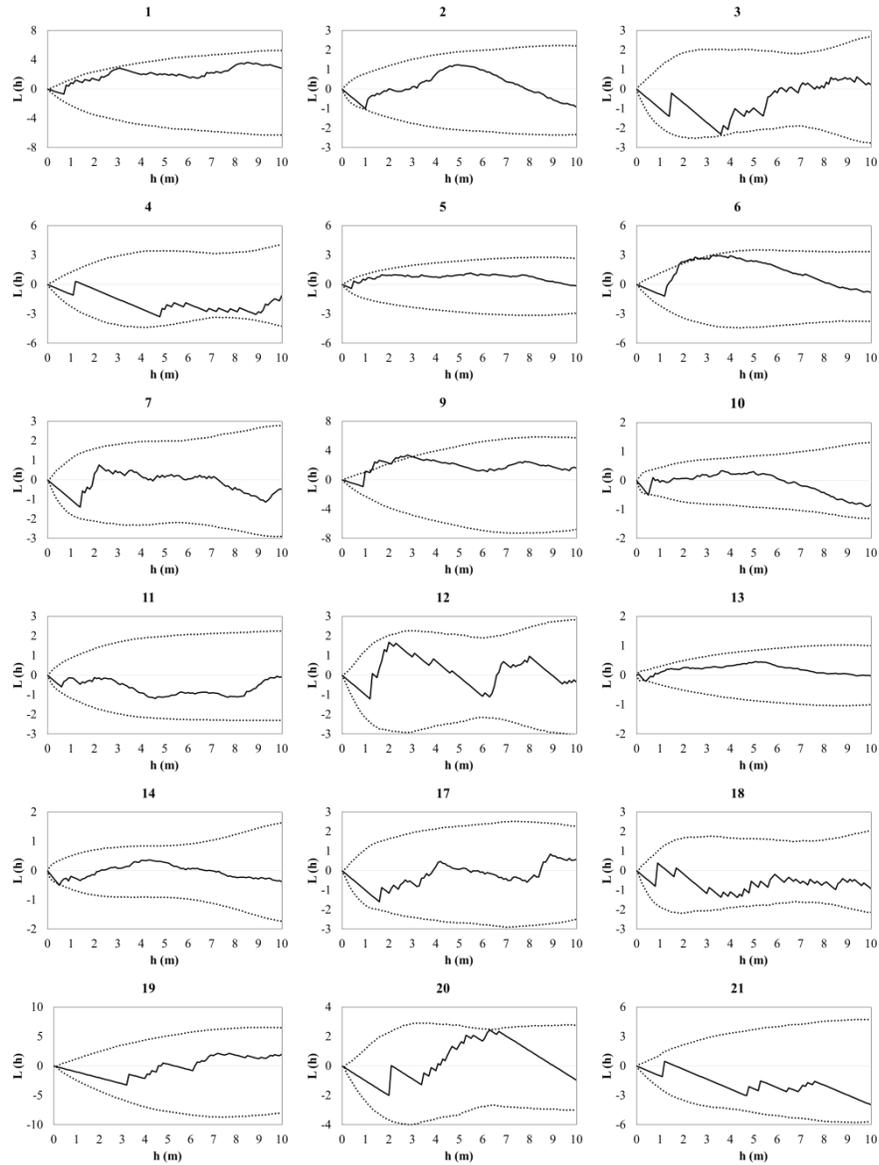


Figura 4 - Valores estimados (linha contínua) e limites de confiança (linhas tracejadas) da função  $K$  de Ripley bivariada para as populações com regeneração de candeia e indivíduos arbóreos de candeia. Eixo  $y$  representa os valores estimados pela função  $K$  de Ripley ( $L(h)$ ) e eixo  $x$  representa a distância ( $h$ ), em m.

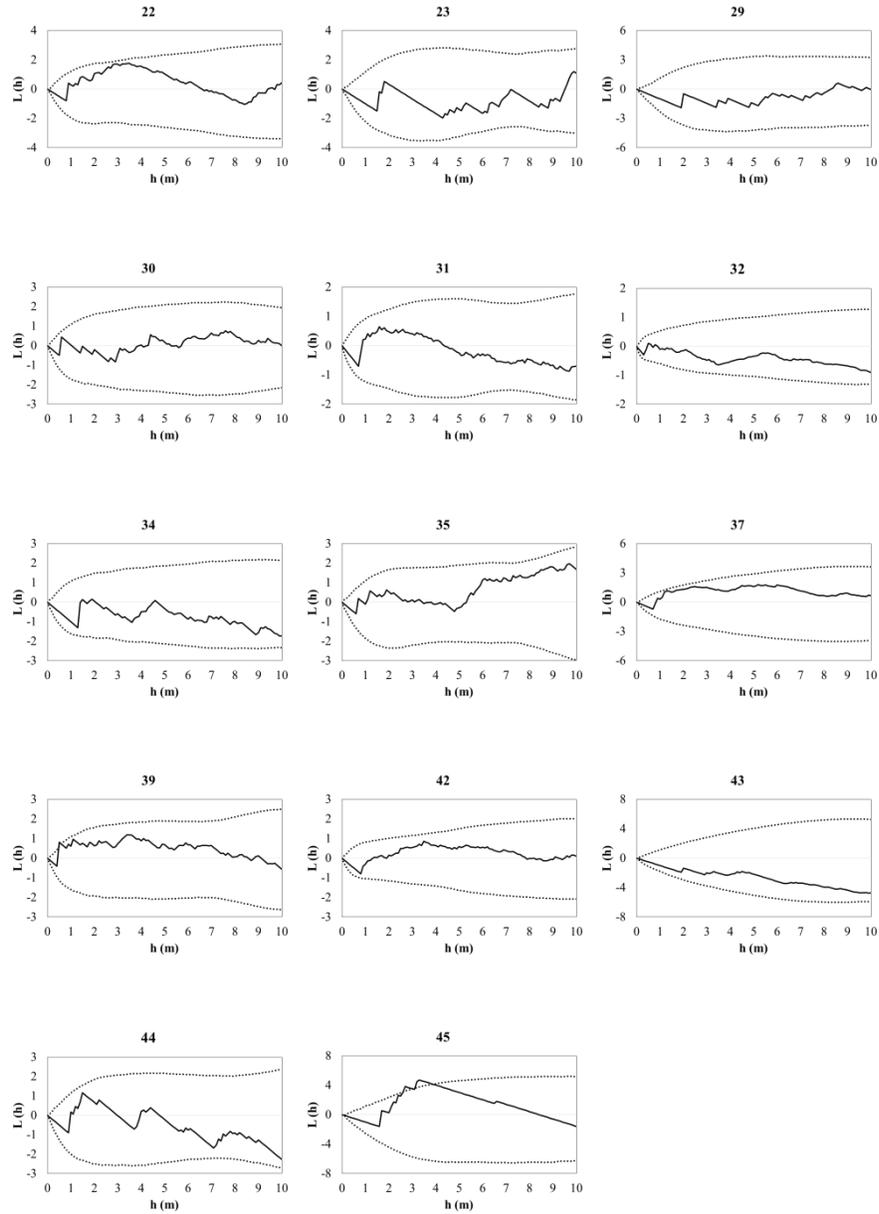


Figura 4 – (Continuação) Valores estimados (linha contínua) e limites de confiança (linhas tracejadas) da função  $K$  de Ripley bivariada para as populações com regeneração de candeia e indivíduos arbóreos de candeia. Eixo y representa os valores estimados pela função  $K$  de Ripley ( $L(h)$ ) e eixo x representa a distância ( $h$ ), em m.

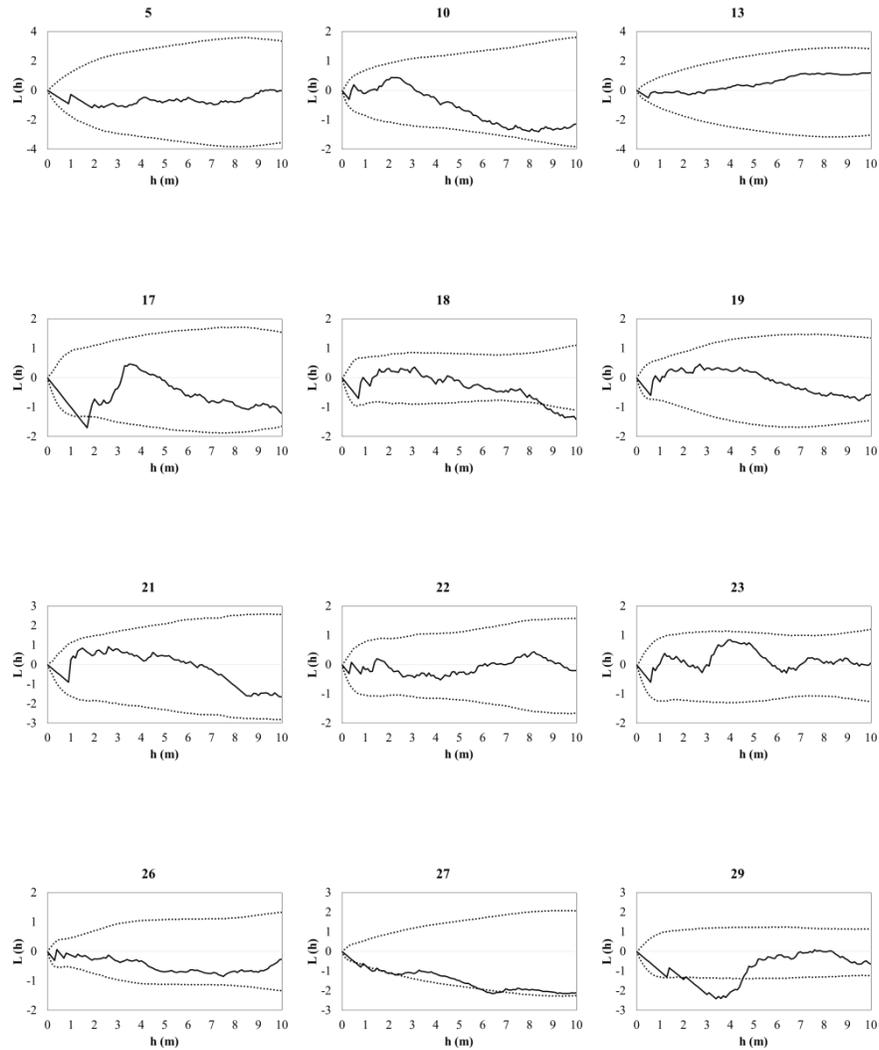


Figura 5 - Valores estimados (linha contínua) e limites de confiança (linhas tracejadas) da função K de Ripley bivariada para as populações com regeneração de candeia e indivíduos arbóreos das demais espécies nativas. Eixo y representa os valores estimados pela função K de Ripley ( $L(h)$ ) e eixo x representa a distância ( $h$ ), em m.

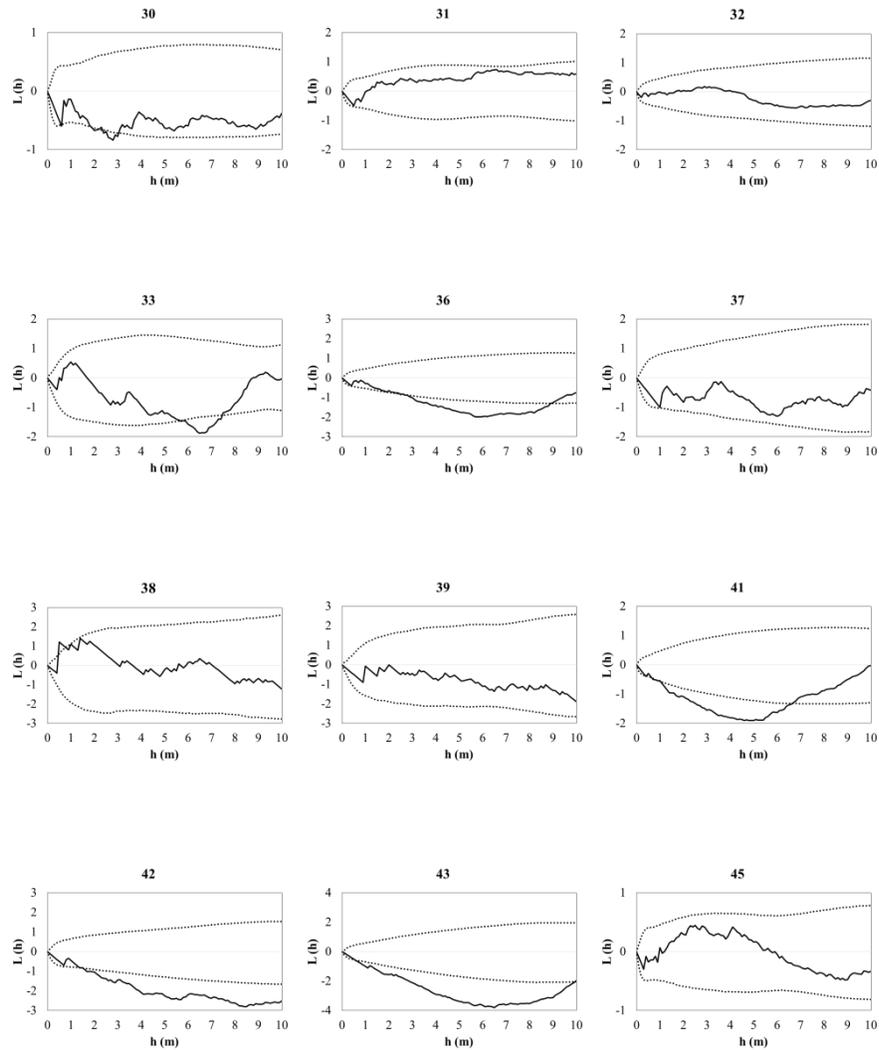


Figura 5 - (Continuação) - Valores estimados (linha contínua) e limites de confiança (linhas tracejadas) da função  $K$  de Ripley bivariada para as populações com regeneração de candeia e indivíduos arbóreos das demais espécies nativas. Eixo  $y$  representa os valores estimados pela função  $K$  de Ripley ( $L(h)$ ) e eixo  $x$  representa a distância ( $h$ ), em m.

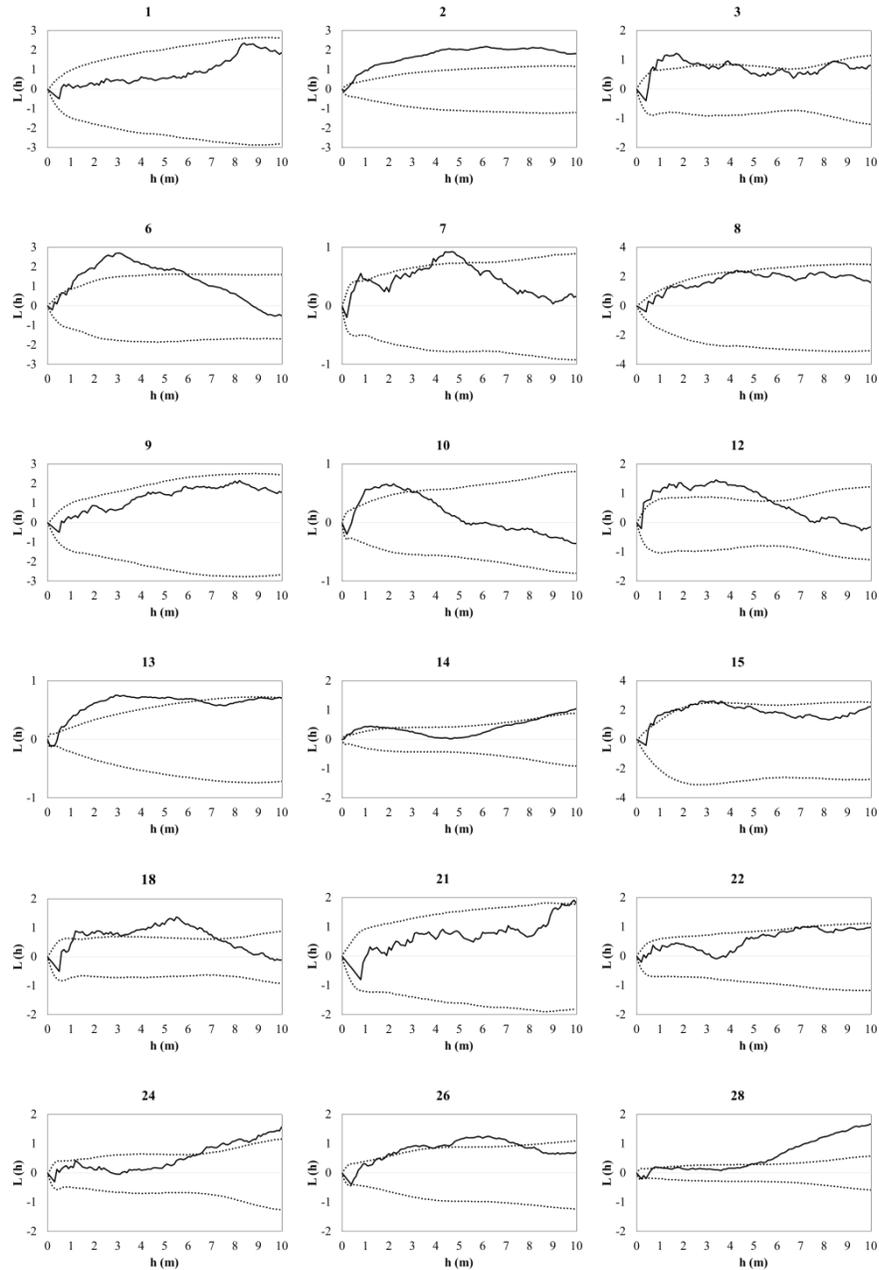


Figura 6 - Valores estimados (linha contínua) e limites de confiança (linhas tracejadas) da função  $K$  de Ripley bivariada para as populações com regeneração de candeia e cepas de candeia. Eixo  $y$  representa os valores estimados pela função  $K$  de Ripley ( $L(h)$ ) e eixo  $x$  representa a distância ( $h$ ), em m.

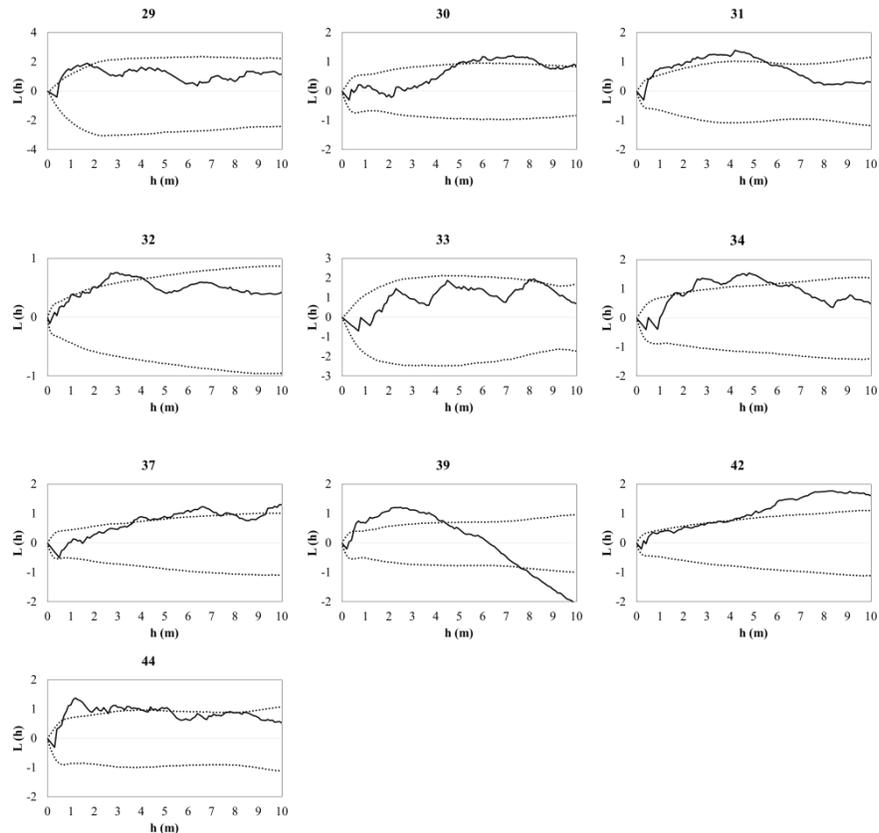


Figura 6 (Continuação) - Valores estimados (linha contínua) e limites de confiança (linhas tracejadas) da função  $K$  de Ripley bivariada para as populações com regeneração de candeia e cepas de candeia. Eixo  $y$  representa os valores estimados pela função  $K$  de Ripley ( $L(h)$ ) e eixo  $x$  representa a distância ( $h$ ), em m.

Não foi feita uma análise de regenerações provenientes de brotações neste trabalho, sendo necessário avaliá-la com maior critério. Contudo, Melo et al. (2012) demonstraram que a candeia possui alto índice de brotação de suas raízes e tocos quando se faz a escarificação e decepta, respectivamente. Segundo esses autores, essa técnica mostra-se eficiente para o resgate de matrizes selecionadas de candeia. Assim, essa característica confere à espécie um potencial para o manejo via condução das brotações das cepas remanescentes do manejo.

## Conclusões

A regeneração natural da espécie *Eremanthus erythropappus* apresenta padrão espacial agregado, conforme comprovado pelos índices de Ripley e Moran. A análise

bivariada comprovou que nas áreas submetidas ao sistema de manejo com porta sementes, a regeneração desenvolve-se formando mosaicos puros (agregados), principalmente no interior de clareiras e nas partes onde a área basal do estrato arbóreo não interfere na incidência de luz. Esses mosaicos de regeneração apresentam potencial para originar os maciços de candeia ou candeiais futuramente.

As metodologias de Ripley e Moran aplicadas para analisar e descrever o padrão espacial da regeneração natural da espécie *Eremanthus erythropappus* apresentaram resultados semelhantes e satisfatórios. Assim, devem ser aplicadas e testadas para descrever o padrão espacial de outras espécies florestais.

### **Agradecimentos**

Aos dois revisores pelos comentários que possibilitaram melhorar a qualidade do presente artigo.

ARAÚJO, E. J. G., PÉLLICO NETTO, S., MACHADO, S. A., DALLA CORTE, A. P., SCOLFORO, J. R. S., DAVID, H. C., MORAIS, V. A. Ripley's K function and Moran index on spatial distribution of natural regeneration of candeia in managed areas. *Rev. Bras. Biom.* Lavras, v.34, n.3, p.468-488, 2016.

- **ABSTRACT:** *Considering the importance of knowing the spatial pattern of forest species, the aim of this study was to describe the spatial pattern of natural regeneration of the species Eremanthus erythropappus (DC) MacLeish (candeia), after the application of a management system with seed-trees. Data from 46 populations submitted to the management with seed-trees were collected in the southern region of Minas Gerais. In each population all candeia (regenerating individuals, the candeia trees and remained after a harvesting operation) and individuals trees of other species were recorded and georeferenced. In each regeneration was also measured the total height. It was also applied the univariate Ripley's K index and the Moran index to describe the spatial regeneration pattern of candeia. To check the spatial relationship of regenerations with individual trees (candeia and other species) and the candeia strains it was applied the Ripley's K bivariate function. The two methodologies presented similar results, indicating that the candeia pattern unit is predominantly aggregate and, in some cases, varies from aggregate to a random pattern. Furthermore, there is a predominant pattern of interaction between regeneration and the remaining stumps from removed trees in the forest management, meaning a relationship between the budding regeneration and the remaining stumps.*
- **KEYWORDS:** *Spatial distribution; aggregation. Eremanthu serythropappus; spatial correlation.*

### **Referências**

- ANJOS, A., *Análise do padrão de distribuição espacial do palmitreiro (Euterpe edulis) utilizando a função K de Ripley.* 1998. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1998.
- 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*, Piracicaba, n.66, p.38-45, 2004.

- ARAÚJO, E. J. G.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; SÉ, D. C.; OLIVEIRA, A. D.; MORAIS, V. A.; ALTOÉ, T. F. SCOLFORO, H. F. Sustentabilidade do manejo da candeia nativa (*Eremanthus erythropappus*(DC.) MacLeish). In: SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; DAVIDE, A. C. *O manejo sustentável da candeia: o caminhar de uma nova experiência florestal em Minas Gerais*. Lavras: Editora UFLA, 2012. p.247-263.
- ARAÚJO, E. J. G.; DAVID, H. C.; PÉLLICO NETTO, S.; MORAIS, V. A.; SCOLFORO, J. R. S. Padrão espacial de espécies arbóreas em fragmento de floresta estacional semidecidual. *Revista Ciências Agrárias*, Belém, v.57, n.2, p.166-171, 2014.
- 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*, Piracicaba, v.41, n.98, p.249-256, 2013.
- CAPRETZ, R. L. *Análise dos padrões espaciais de árvores em quatro formações florestais do Estado de São Paulo, através de análises de segunda ordem, como a Função K de Ripley*. 2004. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- 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*, Santa Maria, v.22, n.3, p.551-565, 2012.
- CRAWLEY, M. J. *Plant Ecology*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1986. 496 p.
- DALMASO, C. A.; INOUE, M. T.; OLIVEIRA-FILHO, P. C.; MARCELINO, V. R. Padrões espaciais na regeneração de *Ocoteaodoriferana* floresta nacional de Irati, PR. *Floresta*, Curitiba, v.43, n.2, p.301-312, 2013.
- DIGGLE, P. J. *Statistical analysis of spatial point patterns*. London: Academic Press, 1983. 148p.
- LEGENDRE, P.; FORTIN, M.J. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*, Belgium, n.80, p.107-138, 1989.
- LOREGIAN, A. C.; SILVA, B. B.; ZANIN, E. M.; DECIAN, V. S.; OLIVEIRA, C. H.; BUDKE, J. C. Padrões espaciais e ecológicos de espécies arbóreas refletem a estrutura em mosaicos de uma floresta subtropical. *Acta botânica Brasílica*, Belo Horizonte, v.26, n.3, p.593-606, 2012.
- MACHADO, S. A.; SANTOS, A. A. P.; ZAMIN, N. T.; NASCIMENTO, R. G. M. Distribuição espacial de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.42, n.6, p.1013-1019, 2012.
- MELO, L. A.; DAVIDE, A. C.; TEIXEIRA, L. A. F. Metodologia para resgate de matrizes e enraizamento de estacas de *Eremanthus erythropappus*. *Cerne*, Lavras, v.18, n.4, p.631-638, 2012.
- PALUDO, G. F.; MANTOVANI, A.; KLAUBERG C.; REIS, M. S. Estrutura demográfica e padrão espacial de uma população natural de *Araucaria angustifolia*

(bertol.) Kuntze (Araucariaceae), na reserva genética florestal de caçador, estado de Santa Catarina. *Árvore*, Viçosa, v.33, n.6, p.1109-1121, 2009.

PALUDO, G. F.; MANTOVANI, A.; REIS, M. S. Regeneração de uma população natural de *Araucaria angustifolia* (Araucariaceae). *Árvore*, Viçosa, v.35, n.5, p.1107-1119, 2011.

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*, Curitiba, v.4, n.66, p.21-34, 2006.

PIANKA, E.R. *Evolutionary ecology*. New York, Harper Collins College Publishers, 1994. 486p.

RIPLEY, B. D. Modelling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistic Society*, London, v.39, n.2, p.172-212, 1977.

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 angustifoliae* em uma floresta ombrófila mista no centro-sul do Paraná. *Floresta*, Curitiba, v.40, n.2, p.255-268, 2010.

SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; DAVIDE, A. C: *O manejo sustentável da candeia: o caminhar de uma nova experiência florestal em Minas Gerais*. Lavras, Editora: UFLA, 2012. 329 p.

SCOLFORO, J. R. S.; ARAUJO, E. J. A.; MELLO, J. M.; MORAIS, V. A.; ALTOE, T. F.; FERRAZ-FILHO, A. C.; SCOLFORO, H. S. F. Spatial Analysis of the Natural Regeneration of Candeia (*Eremanthuserythropappus* (DC.) MacLeish) as Influenced by Non-Candeia Tree Layer Composition. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Pakistan, v.8, n.16, p.211-219, 2014.

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 (*Eremanthuserythropappus* (DC.) Macleish) sujeita ao sistema de manejo porta-sementes. *Cerne*, Lavras, v.14, n.4, p.311-316, 2008.

Recebido em 16.11.2015

Aprovado após revisão em 16.05.2016