

Análise do padrão de distribuição espacial da araucária (*Araucaria angustifolia*) em algumas áreas no Estado do Paraná, utilizando a função K de Ripley

Spatial point pattern analysis of araucaria (*Araucaria angustifolia*) in some areas in the State of Paraná, using Ripley's K function

Adilson dos Anjos
Maria Cristina Medeiros Mazza
Augusto César Mazza Canedo dos Santos
Liciane Teruko Delfini

RESUMO: Avaliou-se o padrão de distribuição espacial da araucária (*Araucaria angustifolia*) em algumas áreas do Estado do Paraná com a função K de Ripley, considerando caso univariado, com e sem marcas (diâmetro à altura do peito – DAP - e altura das árvores). Os resultados indicaram uma alta variação no padrão de distribuição espacial das árvores de *Araucaria angustifolia* em todas as tipologias avaliadas.

PALAVRAS-CHAVE: Estrutura espacial, Conífera, Processo pontual, Processo pontual univariado marcado

ABSTRACT: It was studied the spatial distribution of araucaria (*Araucaria angustifolia*) in some areas of Paraná State with the Ripley's K function considering the univariate case, with and without marks (diameter at breast height - DBH - and height). The results pointed out a high variation on the spatial point pattern of the *Araucaria angustifolia* trees, in all the evaluated typologies.

KEYWORDS: Spatial structure, Conifers, Point process, Univariate marked point process

INTRODUÇÃO

A araucária (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.) é uma espécie de grande importância cultural, social e econômica para o Estado do Paraná e predomina em um dos mais importantes biomas do sul do Brasil - a Floresta Ombrófila Mista (Floresta com Araucária).

A Floresta com Araucária encontra-se bastante reduzida e fragmentada, com remanescentes localizados principalmente em propriedades rurais. Estudos recentes mostram que as áreas consideradas primárias nas décadas de 70 - 80, não existem mais, restando somente florestas em estágio avançado, médio e inicial de sucessão (Fupef, 2001).

Devido à alta qualidade de sua madeira, a araucária foi extensivamente explorada a partir

da década de 60, para atender à demanda no mercado interno e externo. Os reflorestamentos, crescentes nas décadas de 70, declinaram drasticamente nos últimos anos e foram substituídos pela introdução de espécies exóticas de rápido crescimento.

Atualmente, a araucária é incluída como espécie vulnerável na lista oficial da flora nacional ameaçada de extinção (Carvalho, 1994; Paraná, 1995), com manejo restrito pela legislação vigente e controlado pelos órgãos oficiais. A exploração de sua madeira está restrita, sendo permitido somente o corte das árvores com DAP igual ou superior a 40 cm, mediante aprovação de Plano de Manejo. Entretanto, se desconhece a estrutura espacial de suas populações naturais e os efeitos do manejo sobre a espécie.

O estudo de padrões de distribuição espacial é hoje uma das ferramentas mais utilizadas para entender o comportamento de diversos fenômenos (Anjos et al., 1998; Bailey e Gatrell, 1995; Haase, 1995; Batista, 1994; Cressie, 1993; Diggle, 1983 e Ripley, 1981). Em ciências florestais, uma grande aplicação está no estudo da distribuição espacial de árvores, principalmente daquelas no seu ambiente natural. O conhecimento do padrão de distribuição espacial pode fornecer informações sobre a ecologia, subsidiar a definição de estratégias de manejo e/ou conservação, auxiliar em processos de amostragem ou simplesmente esclarecer a estrutura espacial de uma espécie (Anjos, 1998). Entretanto, estas informações ainda são escassas para a maioria das espécies das florestas brasileiras.

Existem inúmeras metodologias criadas ou desenvolvidas para se fazer a análise de um padrão de distribuição espacial. A função K de Ripley (caso univariado) é um método baseado em contagem e em distância, exigindo o conhecimento das coordenadas (x,y) de cada ponto. Esta função permite, ainda, que sejam feitas inferências sobre os valores associados a cada ponto, denominadas marcas (caso univariado marcado). Desse modo, pode-se avaliar a correlação existente entre as marcas (altura ou diâmetro das árvores, por exemplo) em um processo espacial.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o padrão de distribuição espacial da araucária, utilizando a função K de Ripley, em algumas áreas no Estado do Paraná.

METODOLOGIA

Descrição das áreas

O levantamento foi realizado de forma expedita, analisando-se o total de cinco parcelas, com área de 6000 m² cada, distribuídas em cinco pro-

priedades (áreas), localizadas em municípios do Estado do Paraná e listadas na Tabela 1.

Todas as áreas sofreram, no passado, algum tipo de interferência ou exploração florestal, em diferentes intensidades. A maioria destas áreas foram escolhidas com base em levantamentos (Gubert Filho, 1989) realizados no final da década de 80, onde foram consideradas remanescentes de floresta primária pouco alterados, identificados como representantes típicos (inalterados) dos estádios de sucessão reconhecidos nas Florestas com Araucária (Klein, 1960). Para fins práticos, as áreas foram agrupadas nas seguintes categorias: A = araucária e campo; araucária e formações pioneiras; B = araucária e canela lajeana; araucária e imbuia.

Todas as áreas apresentam diferentes níveis de manejo, conforme Tabela 1. A área 1 foi transformada, na última década, em Unidade de Conservação (Parque Municipal), as áreas 2 e 5 permanecem sem exploração há alguns anos, com a intenção de virem a constituir áreas de proteção. A área 3 é utilizada para a criação de gado e a área 4, para criação de eqüinos.

Em todas as áreas, dentro de cada parcela, foram registradas as coordenadas (x, y), DAP (Diâmetro à altura do peito) em centímetros e altura em metros, de todas as plantas de araucária com DAP ≥ 10 cm.

Análise estatística

A função K(h) é uma função de densidade de probabilidade que considera a variância de todas as distâncias entre todos os eventos (Moeur, 1993; Haase, 1995). Basicamente, um círculo de raio h é centrado em cada evento e o número de plantas dentro de cada círculo é contado. A distância h não possui uma regra para ser determinada e depende do fenômeno a ser estudado. Assumiu-se o valor de h = 1 metro para todas as análises realizadas.

Tabela 1

Áreas de estudo da araucária
(Study areas of araucaria)

Áreas	Município	Nº da Parcela	Tamanho das Parcelas (m)	Uso Atual	Tipologia
1	Guarapuava	1	60 x 100	Não explorada	A
2	Palmas	1	60 x 100	Não explorada, coleta de pinhão não controlada	A
3	General Carneiro	1	60 x 100	Criação de gado	B
4	General Carneiro	2	60 x 100	Criação eqüinos	B
5	Bituruna	1	60 x 100	Não explorada	B

Neste trabalho, utilizou-se a função $K(h)$ de Ripley, no caso univariado, para analisar o padrão de distribuição espacial. Para a avaliação da correlação entre as marcas, utilizou-se a função $K(h)$ de Ripley no caso univariado marcado. Consideraram-se como marcas o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura das árvores.

Processo espacial pontual

Um conjunto de pontos, distribuído dentro de uma região do espaço, é denominado *padrão espacial pontual* e as locações dos pontos são chamadas de *eventos* (Andersen, 1992; Diggle, 1983). Um padrão espacial pontual pode ser definido como a presença de uma estrutura espacial repetida sobre a região de estudo (Newbery et al., 1986). Neste trabalho, portanto, cada árvore de araucária foi considerada como um evento dentro da parcela estudada e o conjunto destes pontos origina um padrão espacial pontual.

Utilizou-se o estimador da função $K(h)$ de Ripley (Ripley, 1981), dado por:

$$\hat{K}(h) = n^2 |R| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_s^{-1} I_h(x_i - x_j),$$

para $i \neq j$ e $h > 0$. (1)

Onde: $I_h(x_i - x_j)$ = função indicadora definida como sendo 1 se $(x_i - x_j) \leq h$ e 0 caso contrário; $w_s(x_i - x_j)$ = função peso para a correção de borda; n é o número de eventos dentro da parcela; R é a área da parcela; h é o raio de avaliação do padrão de distribuição espacial.

Para melhor visualizar as características de completa aleatoriedade espacial, utilizou-se a forma transformada da função K de Ripley, dada pela expressão a seguir:

$$\hat{L}(h) = \sqrt{\frac{\hat{K}(h)}{\pi h}} - h, \quad h > 0 \quad (2)$$

Para $\hat{L}(h) = \sqrt{\frac{\hat{K}(h)}{\pi h}} - h$ o valor esperado é zero, pois o valor esperado de $\hat{K}(h)$ é πh^2 (a área de um círculo de raio h). Para valores menores do que πh^2 tem-se uma distribuição regular (inibição) e para valores maiores do que πh^2 tem-se uma distribuição agregada (Diggle, 1983).

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 pa-

drões, fazendo distinção entre um padrão classificado como regular ou agregado (Diggle, 1983).

Deste modo, em um gráfico, picos positivos indicam padrão de agregamento e picos negativos indicam padrão de regularidade (Bailey e Gatrell, 1995). Para avaliar a significância destes picos, construíram-se envelopes de confiança ou envelopes de simulação, por simulação de m processos aleatórios com n eventos.

$$U(h) = \max_{i=1, \dots, m} \{ \hat{L}_i(h) \}$$

$$L(h) = \min_{i=1, \dots, m} \{ \hat{L}_i(h) \} \quad (3)$$

$U(h)$ e $L(h)$ são o máximo e mínimo da função K de Ripley (transformada), respectivamente, calculados a partir de m simulações de processos aleatórios com n eventos.

Se $\hat{L}_i(h)$ não permanece dentro do envelope de confiança, rejeita-se a hipótese de nulidade, onde o padrão de distribuição espacial é completamente aleatório, com um nível de confiança de $\frac{1}{(m+1)} * 100$ %. Neste trabalho, utilizou-se um nível de confiança de 1%, ou seja, 99 simulações.

Processo pontual marcado

O estimador da função de correlação de marcas (Ripley, 1981) é dado pela seguinte expressão:

$$\hat{K}_{mm}(h) = \frac{1}{\lambda^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_s I_h(x_{i1} - x_{j2}) m_{i1} m_{j2},$$

para $i \neq j$ e $h > 0$ (4)

Onde: $I_h(x_i - x_j)$ = função indicadora; $w_s(x_i - x_j)$ = função peso para a correção de borda; $m_{i1} m_{j2}$ = produto entre as marcas das árvores; λ^2 = Intensidade ou número médio de eventos por unidade de área x_{i1}, x_{j2} = são as coordenadas dos eventos do tipo 1 e 2.

Para melhor visualizar as características da inexistência de correlação espacial, utilizou-se a forma transformada da função K de Ripley, dada pela expressão a seguir:

$$\hat{L}_{mm}(h) = \sqrt{\frac{\hat{K}_{mm}(h)}{\pi \mu}} - h \quad (5)$$

A significância dos valores gerados pela função transformada em um processo univariado marcado, é avaliada utilizando-se envelopes de confiança. Os envelopes de confiança são gerados, mantendo-se fixas as posições dos eventos e distribuindo-se aleatoriamente as marcas sobre estes eventos.

$$\begin{aligned}
 U(h) &= \max_{i=1, \dots, m} \{ \hat{L}_{mm_i}(h) \} \\
 L(h) &= \min_{i=1, \dots, m} \{ \hat{L}_{mm_i}(h) \}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Se os valores gerados pela função $\hat{L}_{mm_i}(h)$, permanecerem dentro dos envelopes, não há associação entre as marcas. Caso contrário, diz-se que há correlação positiva (valores de $\hat{L}_{mm_i}(h)$ ultrapassam o envelope superior) ou correlação negativa (valores de $\hat{L}_{mm_i}(h)$ ultrapassam o envelope inferior) (Penttinen et al., 1992).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 encontram-se os dados referentes às características dendrométricas das áreas estudadas.

Considerando a tipologia A (araucária e campo; araucárias e formações pioneiras), para a área 1, encontrou-se um padrão de distribuição variando entre agregado e aleatório: o primeiro numa escala de 10 a 40 metros, e o segundo ocorrendo abaixo e acima destes valores. Na análise com as marcas, não se verificou correlação entre as alturas. Entretanto, foi observada uma correlação negativa entre os DAP's numa escala entre 12 e 32 metros, ou seja, neste intervalo espera-se encontrar árvores com DAP pequeno, ao redor daquelas com grande DAP (Figura 1). Esta correlação negativa pode estar refletindo a existência de um processo de regeneração, com a presença de árvores jovens e adultas.

Na área 2, sobre tipologia semelhante, encontrou-se um padrão de distribuição variando entre

o regular e o agregado, com predomínio deste último além dos 8 metros de distância. Numa distância de aproximadamente 5 metros, ocorreu inibição entre as árvores de araucária, ou seja, existe uma probabilidade muito pequena de se encontrar árvores próximas dentro deste raio. Não houve correlações entre as marcas.

Na tipologia B (araucária e canela lajeana; araucária e imbuia), o padrão de distribuição espacial também se mostrou bastante variável, dependendo da área sob estudo: na área 3, o padrão variou do aleatório ao agregado, com predomínio do segundo, formando agregados de vários tamanhos entre 5 e 50 metros distribuídos regularmente; na área 4, na mesma propriedade, encontrou-se um padrão de distribuição regular das árvores de araucária em toda a parcela estudada (Figura 1); a área 5, entretanto, apresentou um padrão de distribuição completamente aleatório e uma correlação negativa entre os DAP's numa escala de até 5 metros, sugerindo a existência de um processo de regeneração. Acima deste valor nesta área, e nas demais, não ocorreram correlações entre as marcas. Estes últimos foram observados em outro estudo, em tipologia semelhante, por Silva et al. (1998). Os autores, estudando a estrutura da Reserva Genética de Caçador - SC, encontraram uma distribuição regular com tendência à aleatoriedade para a araucária, utilizando o índice do grau de agregação de MacGuinnes (IGA) e o índice de dispersão de Morisita (ID).

Na Tabela 3 encontram-se os resultados das áreas analisadas.

Tabela 2

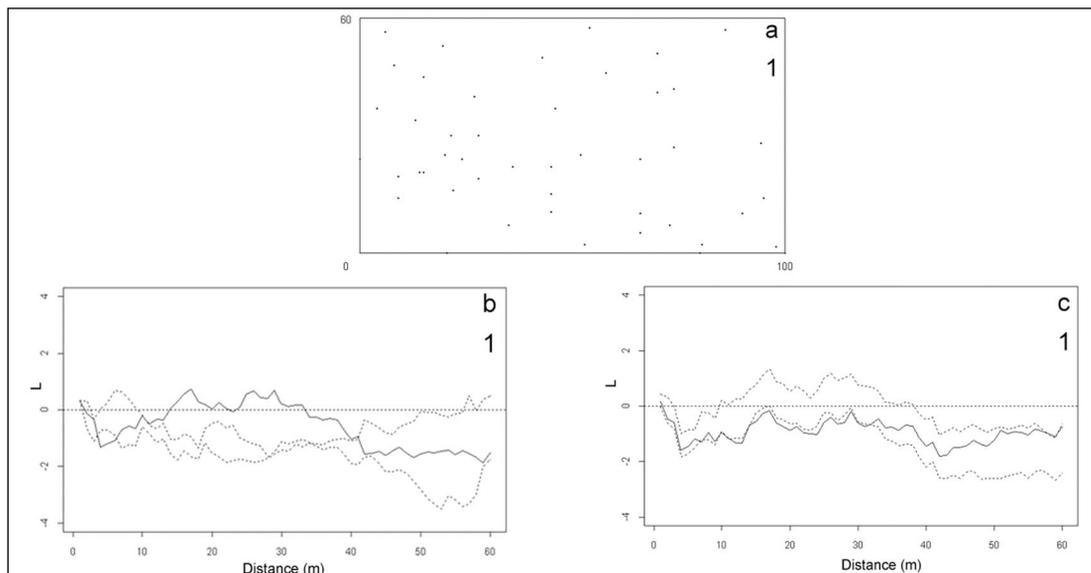
Estatísticas descritivas das variáveis altura e diâmetro à altura do peito (DAP) (Descriptive statistics of high and DBH)

Área	Altura (m)				DAP (cm)			
	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão	Máximo	Mínimo
1	25,43	3,57	30,00	11,00	70,77	19,08	115,55	16,00
2	20,14	2,30	24,00	15,00	58,82	16,72	80,00	24,00
3	16,73	3,46	22,00	5,00	48,57	13,68	68,00	10,50
4	15,53	2,85	22,00	9,00	37,35	14,73	70,00	10,00
5	13,38	3,70	32,00	8,00	25,05	17,66	120,96	10,00

Tabela 3

Padrão de distribuição espacial e correlação espacial por área de estudo
(Spatial point pattern and marked spatial point pattern by study area)

Áreas	Uso Atual	Tipol	N	Padrão de Distribuição Espacial	Correlação Espacial
1	Não explorada	A	47	- padrão aleatório variando entre 10 e 40 metros - padrão agregado, até 10 e acima de 40 metros	correlação negativa entre os DAPs numa escala de 28 metros (espera-se encontrar árvores de DAP baixo ao redor de árvores de DAP alto, até 28 metros),
2	Não explorada, coleta de pinhão não controlada	A	39	- padrão de distribuição variando entre regular e agregado	inexistência de correlação espacial entre as marcas considerando-se tanto DAP como altura,
3	Criação de gado	B	42	- aleatório até 5 metros e a partir de 50 metros - padrão de distribuição agregado, com agregados de vários tamanhos, entre 5 e 50 metros	inexistência de correlação espacial entre as marcas considerando-se tanto DAP como altura,
4	Criação eqüinos	B	87	- padrão de distribuição regular	inexistência de correlação espacial entre as marcas considerando-se tanto DAP como altura,
5	Não explorada	B	120	- padrão de distribuição completamente aleatório	correlação negativa entre os DAP's numa escala de 5 metros (espera-se encontrar árvores de DAP baixo ao redor de árvores de DAP alto até uma distância de 5 metros),

**Figura 1**

Processo pontual, (a) plantas de araucária mapeadas dentro da parcela, nas áreas; (b) análise do padrão de distribuição espacial através da função K de Ripley; (c) análise da correlação espacial, através da função K(h) de Ripley, para DAP, Linhas pontilhadas representam envelopes de confiança construídos com 99 simulações.

(Point process, (a) Trees of araucaria mapped inside plots by areas; (b) Spatial point pattern analysis using Ripley's K function; (c) Spatial correlation analysis using Ripley's K function for DBH; Dotted lines represent confidence envelopes built with 99 simulations)

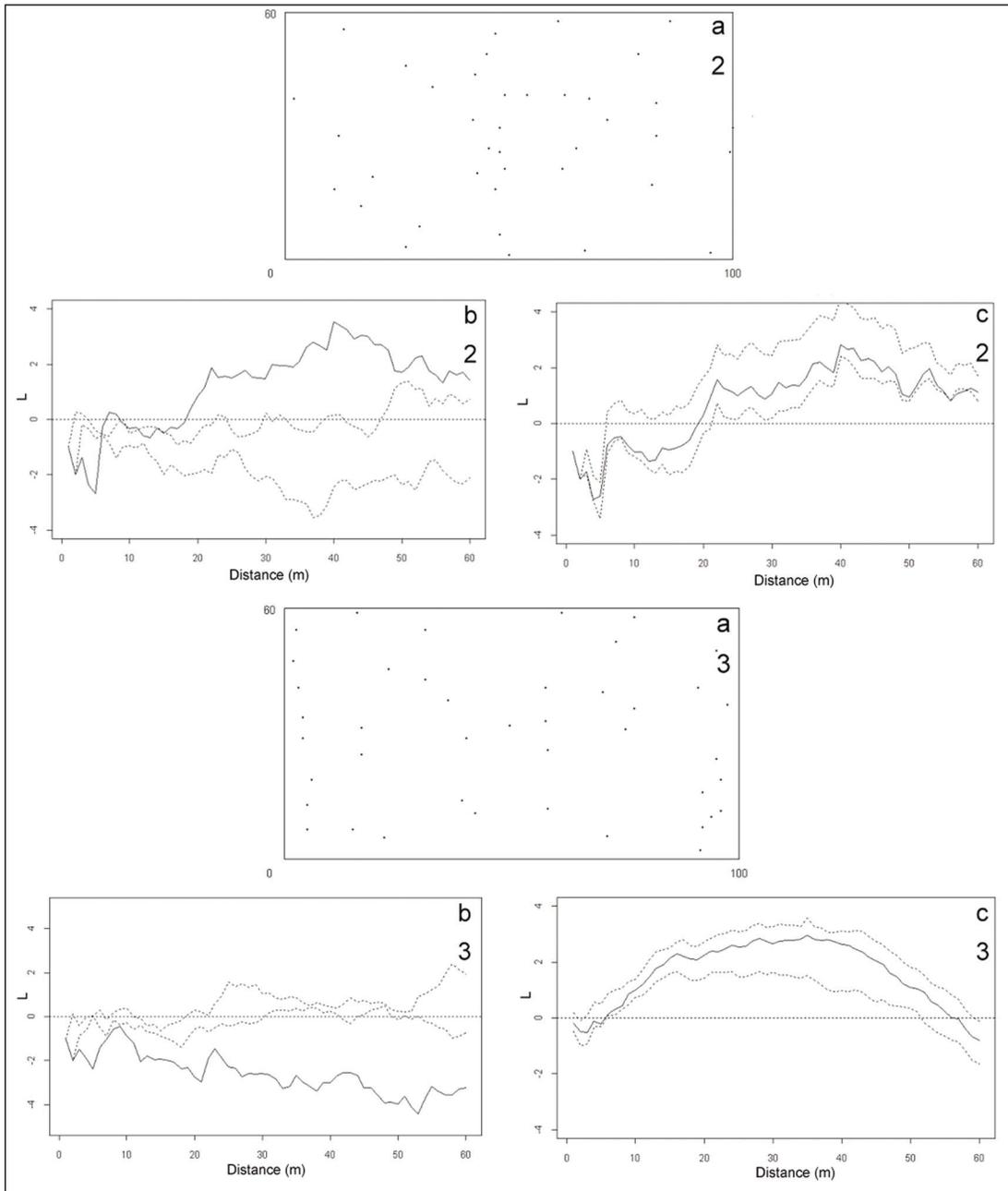


Figura 1 - Continuação

Processo pontual, (a) plantas de araucária mapeadas dentro da parcela, nas áreas; (b) análise do padrão de distribuição espacial através da função K de Ripley; (c) análise da correlação espacial, através da função K(h) de Ripley, para DAP, Linhas pontilhadas representam envelopes de confiança construídos com 99 simulações.

(Point process, (a) Trees of araucaria mapped inside plots by areas; (b) Spatial point pattern analysis using Ripley's K function; (c) Spatial correlation analysis using Ripley's K function for DBH; Dotted lines represent confidence envelopes built with 99 simulations)

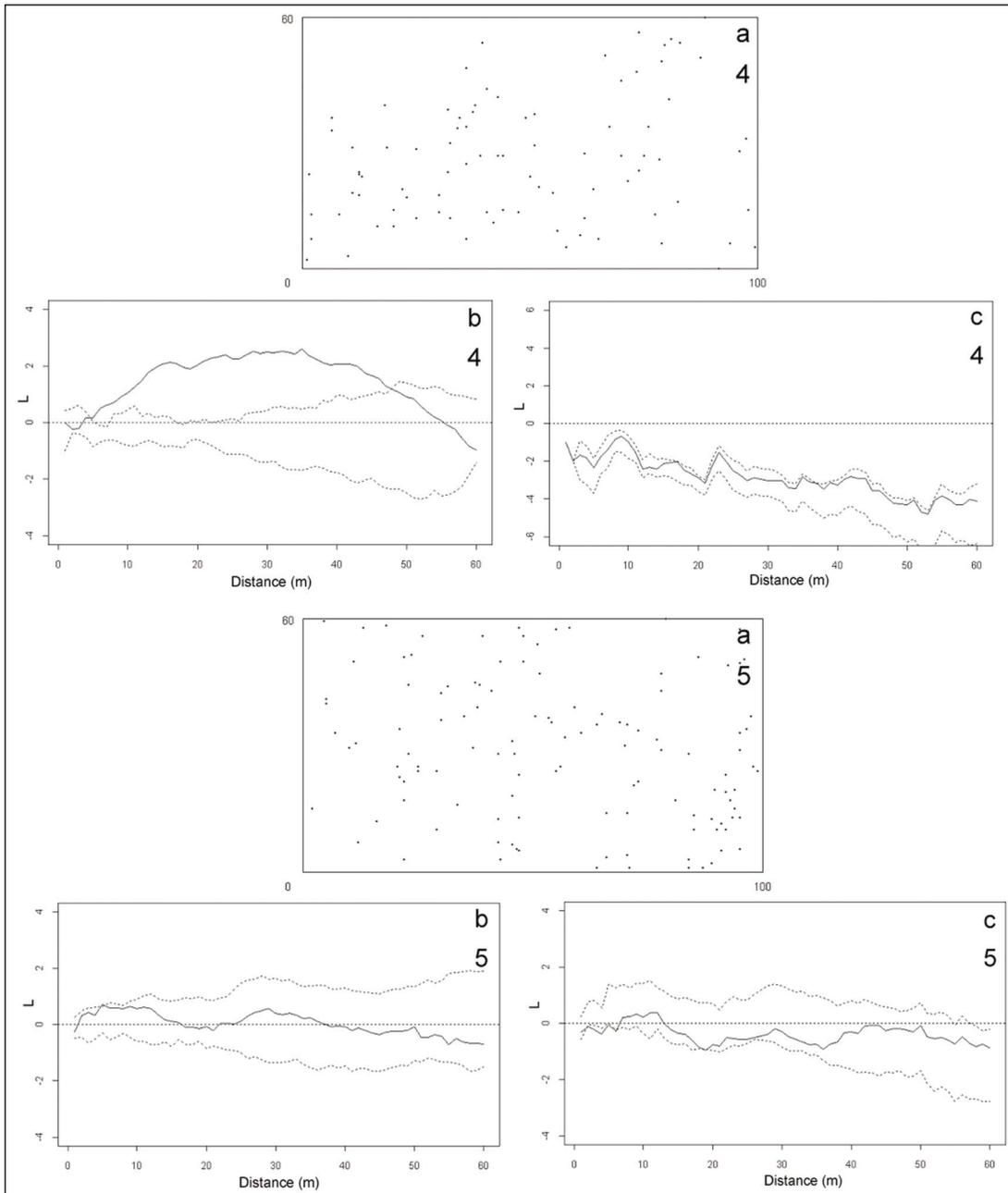


Figura 1 - Continuação

Processo pontual, (a) plantas de araucária mapeadas dentro da parcela, nas áreas; (b) análise do padrão de distribuição espacial através da função K de Ripley; (c) análise da correlação espacial, através da função $K(h)$ de Ripley, para DAP, Linhas pontilhadas representam envelopes de confiança construídos com 99 simulações.

(Point process, (a) Trees of araucaria mapped inside plots by areas; (b) Spatial point pattern analysis using Ripley's K function; (c) Spatial correlation analysis using Ripley's K function for DBH; Dotted lines represent confidence envelopes built with 99 simulations)

CONCLUSÃO

O padrão de distribuição espacial da araucária nas áreas avaliadas mostrou-se bastante variável, entre e dentro das tipologias analisadas. Entretanto, algumas tendências foram observadas, conforme segue:

- Nas áreas de araucária e campo avaliadas houve o predomínio do padrão agregado;
- Grande diversidade de padrão espacial foi verificado na tipologia araucária e imbuia, com padrões diferenciados para cada parcela analisada;

Os resultados obtidos apontam a necessidade de se ampliar às áreas de estudo, nas diferentes tipologias, na região de ocorrência do bioma, para possibilitar o estabelecimento do padrão de distribuição espacial da espécie. Recomenda-se a adição da variável sexo nestas análises, pois sendo a espécie dióica, a proporção entre árvores macho e fêmeas é de fundamental importância nos procedimentos de intervenção. Estudos futuros sobre a estrutura da Floresta Ombrófila Mista, bem como os inventários da espécie, deveriam incluir este tipo de análise, trazendo informações extremamente relevantes sobre o assunto.

AUTORES E AGRADECIMENTOS

ADILSON DOS ANJOS é Professor do Departamento de Estatística da Universidade Federal do Paraná - Centro Politécnico - Jardim das Américas - Caixa Postal 19081 - Curitiba, PR - 81531-990 - E-mail: aanjos@est.ufpr.br

MARIA CRISTINA MEDEIROS MAZZA é Pesquisadora da Embrapa Florestas - Estrada da Ribeira - km 111 - Caixa Postal 319 - Colombo, PR - 83411-000 - E-mail: cristina@cnpf.embrapa.br

AUGUSTO CÉSAR MAZZA CANEDO DOS SANTOS é estatístico formado pelo Departamento de Estatística da Universidade Federal do Paraná - Centro Politécnico - Jardim das Américas - Caixa Postal 19081 - Curitiba, PR - 81531-990 - Foi estagiário da Embrapa Florestas.

LICIANE TERUKO DELFINI é Estatística formada pelo Departamento de Estatística da Universidade Federal do Paraná - Centro Politécnico - Jardim das Américas - Caixa Postal 19081 - Curitiba, PR - 81531-990

Os autores agradecem à Engenheira Agrônoma Maria Izabel Radomiski, ao Técnico Florestal Arnaldo de Oliveira Soares e ao Auxiliar de Operações Wilson Maschio, pessoas que auxiliaram na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, M. Spatial analysis of two-species interactions. *Oecologia*, v.91, p.134-140,1992.
- ANJOS, A. **Análise do padrão de distribuição espacial do palmitreiro (*Euterpe edulis*) utilizando a função K de Ripley**. Piracicaba, 1998. 110p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo
- ANJOS, A.; COUTO, H.T.Z.; BATISTA, J.L.F.; REIS, A. Análise do efeito de um manejo em regime de rendimento sustentável sobre o padrão de distribuição espacial do palmitreiro (*Euterpe edulis* Martius), utilizando a Função K de Ripley. *Revista árvore*, v.22, n.2, p.215-225, 1998.
- BAILEY, T.C.; GATRELL, A.C. **Interactive spatial data analysis**. Essex: Longman Scientific & Technical, 1995. 413p.
- 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
- CARVALHO, P.E.R. **Espécies florestais brasileiras: potencialidades e uso da madeira**. Brasília: EMBRAPA-CNPQ/SPI, 1994. 640p.
- CRESSIE, N.A.C. **Statistic for spatial data**. New York: John Wiley, 1993. 900p.
- DIGGLE, P.J. **Statistical analysis of spatial point patterns**. London: Academic Press, 1983. 148p.
- FUPEF - FUNDAÇÃO DE PESQUISAS FLORESTAIS DO PARANÁ. **Conservação do bioma floresta com araucária: relatório final – diagnóstico dos remanescentes florestais**. Curitiba: FUPEF, 2001. 2v.
- GUBERT FILHO, F.A. **Proposta para a criação de um sistema de unidades de conservação da *Araucaria angustifolia* no Paraná**. Curitiba: IAP, 1989. (não publicado.)
- HAASE, P. Spatial pattern analysis in ecology on Ripley's K-function: introduction and edge correction. *Journal of vegetation science*, v.6, p.575-582, 1995.
- KLEIN, R.M. O aspecto dinâmico do pinheiro do Paraná. *Sellowia*, v.12, p.17-43, 1960.
- MOEUR, M. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data. *Forest science*, v.39, n.4, p.756-775, 1993.
- NEWBERY, D.M.C.; RENSHAW, E.; BRÛNIG, E.F. Spatial pattern of trees in Kerangas forest, Sarawak. *Vegetatio*, v.65, p.77-89, 1986.
- PARANÁ. SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE. **Lista vermelha de plantas ameaçadas de extinção no Estado do Paraná**. Curitiba, 1995.
- PENTTINEN, A.; STOYAN, D.; HENTTONEN, H.M. Marked point processes in forest statistics. *Forest science*, v.38, n.3, p.806-824, 1992.
- RIPLEY, B.D. **Spatial statistics**. London: John Wiley, 1981. 252p.
- SILVA, J.A.; SALOMÃO, A.N.; MARTINS NETTO, D.A. Natural regeneration under *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze forest in the genetic reserve of Caçador-SC. *Revista árvore*, v.22, n.2, p.143-153, 1998.