

Avaliação dos padrões espaço-temporais entre mortalidade de bambu e ocorrência de focos de calor em florestas do sudoeste amazônico

Ricardo Dalagnol ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
ricardo.silva@inpe.br

Abstract. The southwest Amazon forests are dominated of bamboo species of the genus *Guadua* and cover about 161,500 km². These individuals have a life cycle of about 28 years and present only one reproductive event followed by their death. This process accumulates dry biomass in the forest and increases the probability of fire occurrence. Since extreme drought events increase fire vulnerability, and this region has been affected by some of these events in the last decades, it is possible that bamboos are related to a higher occurrence of forest fires. In this sense, the objective of the present study was to evaluate the spatio-temporal relationship between bamboo mortality and fire occurrence. The study area corresponds to the bamboo-dominated forests located in the southwestern Amazon region that occurs in Peru and Brazilian states of Acre and Amazonas. The bamboo mortality was photointerpreted from MODIS annual images (MAIAC) from 2000 to 2011. Data from active fire data were obtained from orbital platforms (TERRA, AQUA, NPP, etc.) for the same period. It was conducted an exploratory analysis of the temporal patterns of each variable. Then, in order to assess the event locations and hotspots we used an isotropic Gaussian Kernel estimator with a bandwidth of 0.5°. The spatio-temporal patterns were evaluated using Ripley's K function on each variable and between variables. The eastern and northern regions presented active fire hotspots, meanwhile bamboo mortality hotspots were observed in a dispersed manner throughout the area. Thus, no relation was observed between the hotspots of each variable. Active fire presented clustering patterns in some years and random in others. This clustering patterns may be related to anthropic areas and to deforestation in the east and north, whilst random patterns can be related to natural fire occurrence due to thunderstorms. Meanwhile, the bamboo mortality presented a random pattern in most of the years. The analysis between bamboo mortality and active fire indicated random patterns when considering the occurrence of bamboo and intact forests as limiting factors for the spatial analysis. Hence, the evidence presented by this study indicates that the occurrence of fire is not related to bamboo mortality, and there is no change in these patterns in years of extreme drought such as 2005 and 2010.

Palavras-chave: bambu, mortalidade, queimada, bamboo, mortality, burn.

1. Introdução

O sudoeste amazônico é ocupado por vegetações do tipo floresta ombrófila aberta com dominância de espécies de bambu do gênero *Guadua*, chamado de agora em diante apenas de “bambu”. Essas florestas dominadas por bambu (FDB) ocupam uma extensão de 161.500 km² (Carvalho et al., 2013). O bambu apresenta o mecanismo de semelparidade, que implica em apenas um período reprodutivo durante a vida seguido de mortalidade. Estudos apontam que o ciclo de vida do bambu nessa região é em torno de 28 anos, e que sua floração e morte subsequente ocorrem de forma sincronizada em grandes populações (Carvalho et al., 2013). Esse processo causa um acúmulo de biomassa seca na floresta e, conseqüentemente, aumenta a probabilidade de ocorrência do fogo (Keeley e Bond, 1999).

A distribuição das FDB está associada a fatores edáficos como a presença de solos ricos em argilas expansíveis, pobremente drenados, do tipo Cambissolo e Luvisolo (Carvalho et al., 2013). Algumas hipóteses assumem que a perpetuação do bambu na floresta e sua invasão sobre áreas não dominadas são favorecidas pelas queimadas. Isto ocorre pelo aumento da entrada de luz no interior do dossel após o fogo, pela diminuição na competição por água e nutrientes no solo e pela grande resiliência dos indivíduos às queimadas (Smith e Nelson, 2011; McMichael et al., 2013). Uma vez dentro da floresta, o bambu pode, por si próprio, causar distúrbios suficientes nos indivíduos arbóreos para manter sua alta densidade (Griscom e Ashton, 2006).

Tendo em vista que eventos extremos de seca aumentam a vulnerabilidade às queimadas e que a região sudoeste amazônica tem sido epicentro de eventos de seca extrema, como em 2005 e 2010 (Aragão et al., 2007; Lewis et al., 2011), acredita-se que a dominância dos bambus nas florestas do sudoeste da Amazônia possa estar associada a uma maior ocorrência de queimadas.

Nesse sentido, pretende-se investigar a dinâmica espacial e temporal do fogo com relação a ocorrência de mortalidade de bambu em florestas no sudoeste amazônico, a fim de responder as seguintes perguntas: a ocorrência de fogo está relacionada com a mortalidade de bambus? Existe alguma alteração nesses padrões em anos de extrema seca como 2005 e 2010?

2. Materiais e métodos

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado sobre as FDB do Sudoeste da Amazônia (Figura 1). Essas florestas ocorrem no Peru e nos estados do Acre e Amazonas no Brasil. A cobertura da terra da região é predominantemente de vegetação do tipo Floresta Ombrófila Aberta, com ocorrência em menor proporção de outras classes de uso e cobertura da terra como áreas urbanas e agricultura, principalmente na região leste da imagem próximo a Rio Branco-AC, e ao longo das estradas e rios.

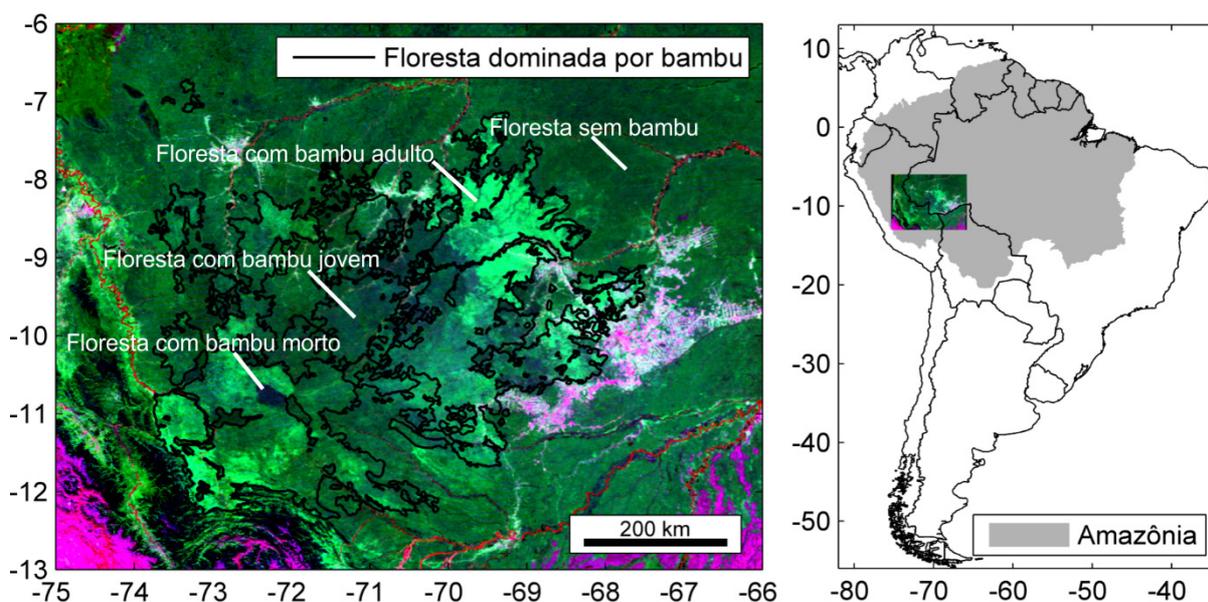


Figura 1. Florestas dominadas por bambu (FDB) no sudoeste amazônico (4 de agosto de 2013) em composição RGB com as bandas 1 (0,65 μm), 2 (0,86 μm) e 6 (1,64 μm) do MODIS. O perímetro de distribuição do bambu delimitado por fotointerpretação de imagens Landsat está indicado (Carvalho et al., 2013).

2.2. Dados e pré-processamento

Para identificação da mortalidade de bambus foram adquiridos dados de reflectância de superfície do MODIS (MAIAC) (Lyapustin et al., 2011) para o período de 2000 a 2011. A fim de minimizar as variações causadas por nuvens, aerossóis e por variações angulares do Sol e do sensor, foram selecionadas uma imagem por ano na estação seca no trimestre julho-setembro: 12-ago-2000, 31-jul-2001, 19-ago-2002, 23-set-2003, 24-ago-2004, 28-ago-2005, 31-ago-2006, 02-ago-2007, 04-ago-2008, 08-ago-2009, 27-ago-2010, e 14-ago-2011. As composições são de 16 dias, com tamanho de pixel de 1000 m, incluindo sete bandas

espectrais: 1 (620–670 nm), 2 (841–876 nm), 3 (459–479 nm), 4 (545–565 nm), 5 (1230–1250 nm), 6 (1628–1652 nm) e 7 (2105–2155 nm). Com base no trabalho de Carvalho et al. (2013), analisou-se visualmente o conjunto selecionado de imagens para identificar áreas de mortalidade de bambu de 2001 a 2011 e coletar sua coordenada geográfica. Essas áreas correspondem a floresta com dominância de bambu morto/seco que ocorre após estágio adulto.

As queimadas foram representadas por dados vetoriais de focos ativos de calor medidos por várias plataformas orbitais (TERRA, AQUA, NPP, etc.). Uma série temporal de dados de 2001 a 2011 foram obtidos a partir da plataforma online BDQueimadas (INPE, 2016). A fim de capturar somente focos de calor sobre áreas de bambu, os dados foram filtrados por uma máscara de ocorrência de bambus do sudoeste amazônico (Carvalho et al., 2013).

2.3. Análise de padrões temporais

Para verificar a distribuição temporal da ocorrência dos eventos de mortalidade de bambus e queimadas foram gerados gráficos de frequência da ocorrência anual dos eventos de 2001 a 2011.

2.4. Análise de *hotspots*

Aplicou-se uma função de estimador de Kernel intensidade, com distribuição isotrópica gaussiana e banda de $0,5^\circ$, sobre cada conjunto de dados anuais para representar a distribuição espacial e temporal das variáveis e verificar a localização de *hotspots*, ou seja, locais de grande intensidade de ocorrência dos fenômenos.

A distribuição isotrópica foi escolhida, pois não se encontrou literatura que suporte a escolha da anisotropia com preferência para alguma direção específica como modelo para os fenômenos estudados.

A distribuição gaussiana foi utilizada, pois apresentou melhor suavização das superfícies de intensidade em comparação com os demais métodos presentes no pacote estatístico (“epanechnikov”, “quartic”, e “disc” referente a discretizado).

Testou-se diferentes métodos de cálculo de largura de banda presentes no pacote estatístico, porém, ao se obter tamanhos variados de largura de banda entre os anos, dificultou-se a visualização da distribuição espacial entre os anos e comparação. Diante disso, decidiu-se utilizar uma largura de banda fixa para todos os mapas. De acordo com o tamanho médio das populações de bambu da área de estudo (330 km^2), o raio médio dessas áreas seria de 10,24 km, ou aproximadamente $0,1^\circ$. Com esse tamanho de banda, nos dados de mortalidade só puderam ser observados *hotspots* (alta intensidade) nas localizações exatas das ocorrências de mortalidade, e nos dados de fogo, todo o mapa ficou preenchido por baixa intensidade e nenhum *hotspot* pode ser observado. Portanto, testou-se alternativas de banda maiores, como $0,5$ e 1° . A largura de 1° gerou *hotspots* demasiadamente grandes que envolviam quase toda a área de estudo, enquanto que $0,5^\circ$ apresentou boa suavização ao mesmo tempo que não demarcou toda a área de estudo. Portanto, selecionou-se a banda de $0,5^\circ$.

As análises foram realizadas através do pacote *Spatial Point Patterns (spatstat)* da plataforma R (Baddeley et al., 2015).

2.5. Análise dos padrões espaço-temporais

Aplicou-se a função K de Ripley com correção de janela isotrópica (Ripley, 1981) para testar se as distribuições espaciais das variáveis apresentam padrões agrupados, aleatórios ou regulares. Testou-se tanto a dependência espacial de cada variável (univariada) como a dependência espacial de uma variável contra a outra (bivariada).

Como o intuito é a investigação da escala com que os fenômenos ocorrem, testou-se um intervalo de distâncias r de 0 a 1°, variando em 0,01°. Determinou-se um raio máximo de análise de 1°, equivalente a 111 km, pois não se espera que em distâncias além desse limiar a mortalidade de bambu possa influenciar na ocorrência de queimadas.

Também se calculou um envelope para testar a hipótese de Aleatoriedade Espacial Completa (AEC). Para gerar esse envelope foram realizadas 99 simulações da função K para um mesmo número de pontos de cada ano, e obteve-se o valor mínimo e máximo do envelope, que correspondem a pontos críticos de um teste de Monte Carlo (Ripley, 1981). Os valores de K observados que estiverem fora do envelope estarão rejeitando a hipótese nula de AEC para uma dada distância r , de acordo com um nível de significância que depende do número de simulações (Equação 1). Determinou-se o número de simulações para representar um nível de significância conservador ao mesmo tempo que promovesse rápido processamento. Por isso, utilizou-se 99 simulações, representando 2% de nível de significância.

$$\alpha = 2/(1 + nsim) \quad (1)$$

onde, α corresponde ao nível de significância, e $nsim$ corresponde ao número de simulações.

Como a janela da área de estudo é fundamental na geração do envelope de AEC, testou-se dois tipos de janela. A primeira janela utilizada foi um retângulo envolvente, com as dimensões da Figura 1. A segunda janela foi um polígono composto pela interseção entre a ocorrência de bambu (Carvalho et al., 2013) com a ocorrência de florestas primárias intactas, que não foram desmatadas (Potapov et al., 2008). A ideia da janela por polígono é contemplar somente a área onde o fenômeno de mortalidade de bambu poderia ocorrer. Assim sendo, estariam sendo calculados padrões aleatórios mais próximos da realidade, excluindo áreas antropizadas em que apresentam por natureza uma frequência de fogo relacionada ao manejo do uso da terra (Lima et al., 2012).

Também foram testados os padrões espaço-temporais entre mortalidade de bambu e focos de calor com lag de um ano nos focos de calor. Como a ignição do fogo natural é um processo aleatório, essa pode não ocorrer no mesmo ano da mortalidade. Acreditamos que o teste com o lag de um ano pode dar uma boa ideia se o fenômeno acontece com algum atraso.

As análises foram realizadas através do pacote *Spatial Point Patterns (spatstat)* da plataforma R (Baddeley et al., 2015).

3. Resultados

3.1. Padrões temporais dos eventos

Observou-se que o número de focos de calor ($\bar{x} = 117$ eventos/ano) é superior ao número de eventos de mortalidade de bambu ($\bar{x} = 3,8$ eventos/ano) (Figura 2). Há um crescimento do número de focos de calor do início ao fim da série temporal e picos em 2003, 2005 e 2010 (Figura 2A). Puderam ser observados picos de focos de calor de 2005 e 2010, que condizem a eventos de seca extrema na Amazônia (Aragão et al., 2007; Lewis et al., 2011). Não se sabe exatamente a que se deve o pico de 2003, visto que não é um ano de extrema seca documentado. Quanto ao número de eventos de mortalidade, esse foi praticamente constante durante o período de análise (Figura 2B). Vale ressaltar que cada evento corresponde a uma mancha de bambu morta, e que não retrata as áreas de mortalidade de cada ano.

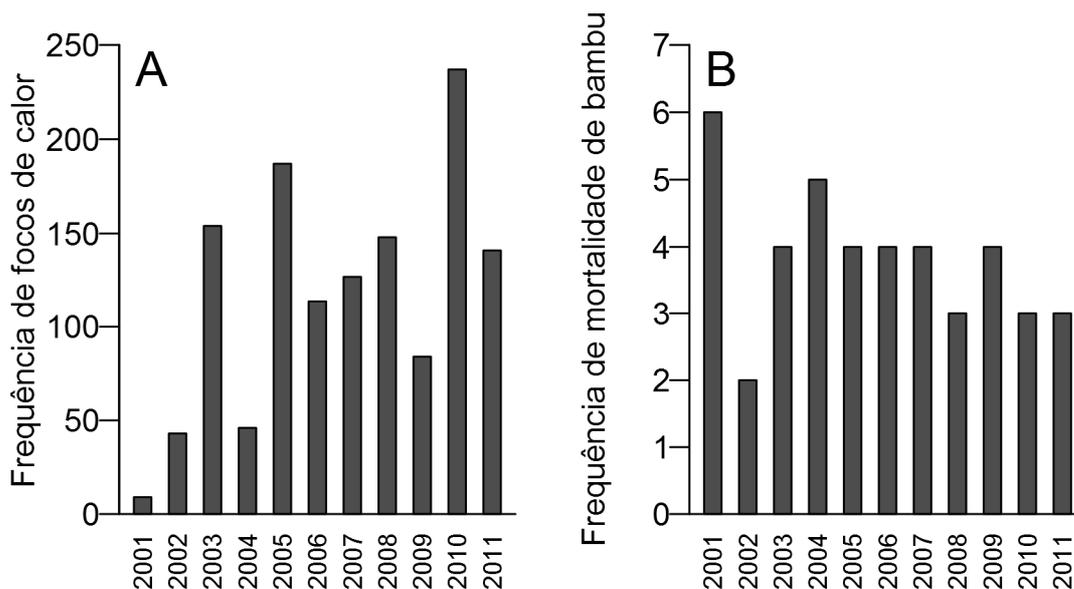


Figura 2. Distribuição temporal anual de 2001 a 2011 de: (A) focos de calor e (2) mortalidade de bambu nas florestas do sudoeste amazônico.

3.2. Localização dos eventos

Foram identificados *hotspots* de focos de calor principalmente na região norte e leste da mancha de bambu (Figura 3). As intensidades variaram bastante entre os anos, de acordo com o número de focos (relativamente menor em 2001 e maior em anos de seca) e maior agrupamento dos focos em um único local (p.ex. 2008). Muitas ocorrências de focos de calor foram encontradas ao longo das bordas das manchas de bambu e ao longo dos rios na região norte da mancha e próximo de Rio Branco-AC na região leste. Os anos de seca em 2005 e 2010 apresentaram maiores níveis de intensidade de focos de calor que os outros anos, e agruparam-se nas mesmas regiões em Lat/Lon aproximadas de 9S/71W e 9S/70W.

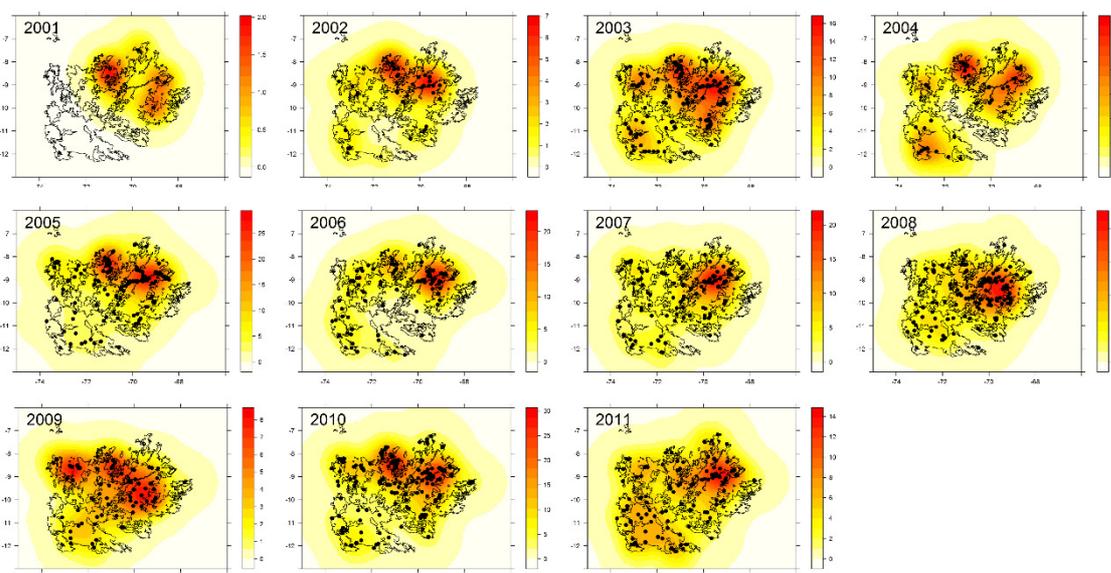


Figura 3. Intensidade espacial de focos de calor em florestas dominadas por bambu no sudoeste amazônico de 2001 a 2011 representada pelo estimador de Kernel gaussiano isotrópico com banda de 0,5°. Os pontos pretos representam as ocorrências.

A ocorrência da mortalidade de bambu de cada ano foi dispersa por toda a área, apresentando geralmente *hotspots* centralizado em cada ocorrência, devido a grande distância uma das outras (Figura 4). No entanto, os anos de 2001, 2007, e 2008, parecem apresentar *hotspots* únicos, possivelmente devido a proximidade de suas ocorrências (Figura 4). Puderam ser observados padrões temporais nos *hotspots* ao noroeste que ocorrem entre 2001 e 2005 na mesma área, e na região sul entre 2007 e 2011 (Figura 4). Nas demais regiões não puderam ser observados padrões temporais de *hotspots* evidentes. Também não foram verificados anos com intensidade de mortalidade de bambu muito superior aos demais. Nos anos de seca de 2005 e 2010 não foram observados eventos nas mesmas regiões que ocorreram focos de calor.

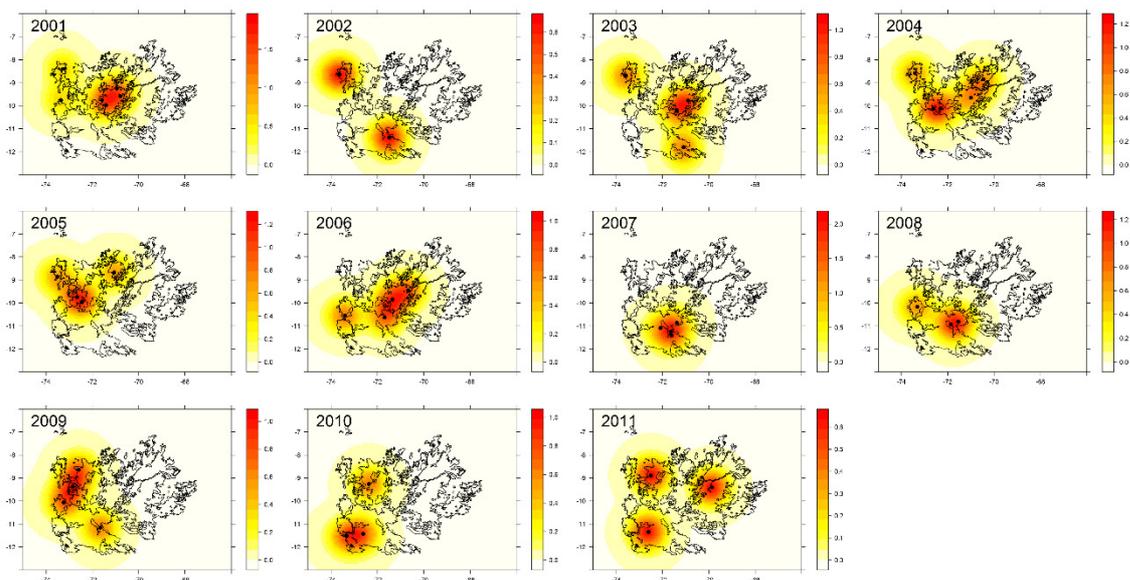


Figura 4. Intensidade espacial de mortalidade de bambu em florestas dominadas por bambu no sudoeste amazônico de 2001 a 2011 representada pelo estimador de Kernel gaussiano isotrópico com banda de $0,5^\circ$. Os pontos pretos representam as ocorrências.

3.3. Padrões espaço-temporais dos focos de calor

Os padrões espaciais de focos de calor ocorreram fora do envelope de AEC com 2% de nível de significância em todos os anos e distâncias, exceto 2001 (Figura 5). Devido as estimativas estarem acima do envelope, entende-se que exista nessa área um padrão de agrupamento de focos de calor. Observou-se agrupamento no ano de 2001 ($0 \leq r \leq 0,7^\circ$), com um envelope de AEC muito mais largo que os outros anos. Esse intervalo mais amplo que os demais anos ocorreu provavelmente devido a este ano apresentar uma quantidade de focos muito inferior aos demais.

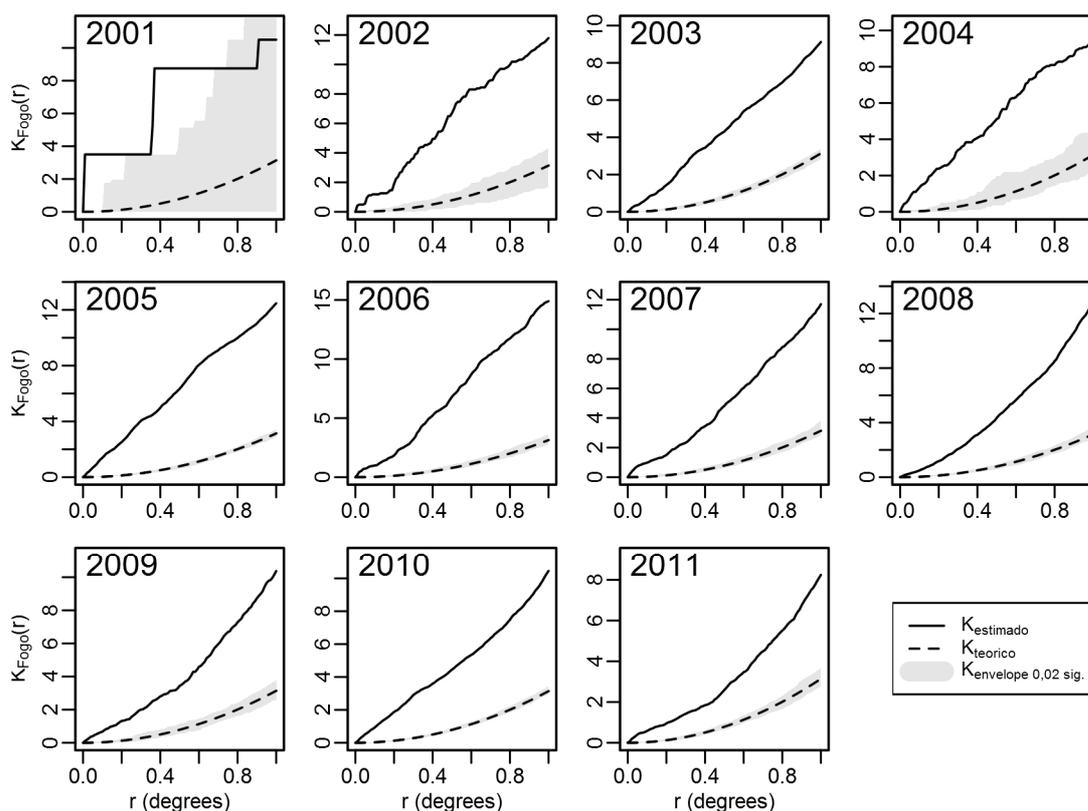


Figura 5. Padrões espaciais de focos de calor em florestas dominadas por bambu no sudoeste amazônico estimados de 2001 a 2011 pela função K de Ripley. K_{estimado} refere-se à função K estimada para cada distância r , $K_{\text{teórico}}$ refere-se ao valor teórico de K de acordo com a distribuição de Poisson, $K_{\text{envelope 0,02 sig}}$ corresponde ao envelope de 2% de significância para a hipótese de completa aleatoriedade espacial.

Analisando os padrões de focos de calor com restrição pela ocorrência de bambu e floresta intacta, observou-se um menor distanciamento entre o K estimado e o envelope de AEC e, diferente da análise pelo retângulo envolvente, alguns anos e distâncias estavam contidos dentro do envelope (Figura 6). Observou-se padrão aleatório com nível de significância de 2% nos anos 2001, 2002 ($0,7 \leq r \leq 1^\circ$), 2003 ($0,6 \leq r \leq 1^\circ$), 2004, 2009, 2010 ($0,6 \leq r \leq 1^\circ$) e 2011. Além disso, alguns anos estiveram muito próximo do envelope, como 2007 e 2008, e é possível que apresentariam padrão aleatório caso utilizado um nível de significância mais frouxo.

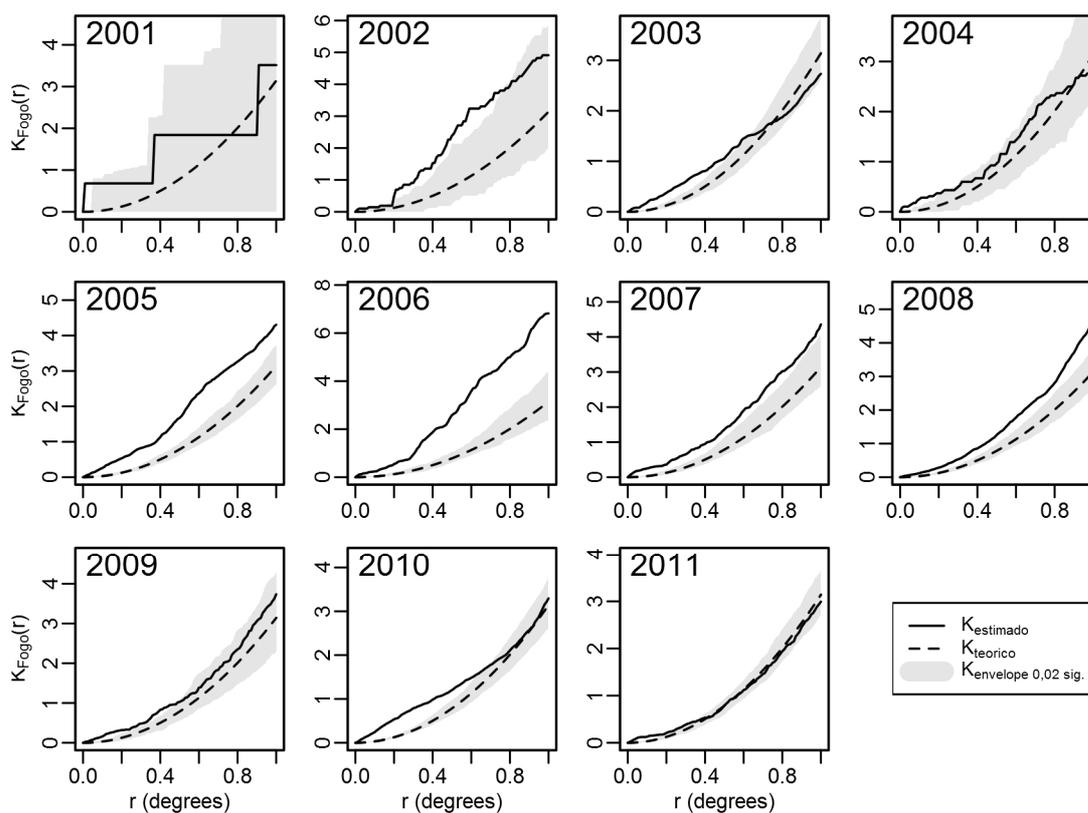


Figura 6. Padrões espaciais de focos de calor em florestas dominadas por bambu no sudoeste amazônico estimados de 2001 a 2011 pela função K de Ripley com janela de análise restrita sobre áreas de ocorrência de bambu e floresta intacta. K_{estimado} refere-se à função K estimada para cada distância r , $K_{\text{teórico}}$ refere-se ao valor teórico de K de acordo com a distribuição de Poisson, $K_{\text{envelope 0,02 sig}}$ corresponde ao envelope de 2% de significância para a hipótese de completa aleatoriedade espacial.

3.4. Padrões espaço-temporais da mortalidade de bambu

Os padrões espaciais de mortalidade de bambu ocorreram fora do envelope de AEC com 2% de nível de significância em 2001 ($0,8 \leq r \leq 1^\circ$) e 2007 ($0,6 \leq r \leq 1^\circ$) (Figura 7). Os demais anos e distâncias apresentaram padrão aleatório devido seus K estimado estar dentro dos limites críticos do envelope de 2% de nível de significância.

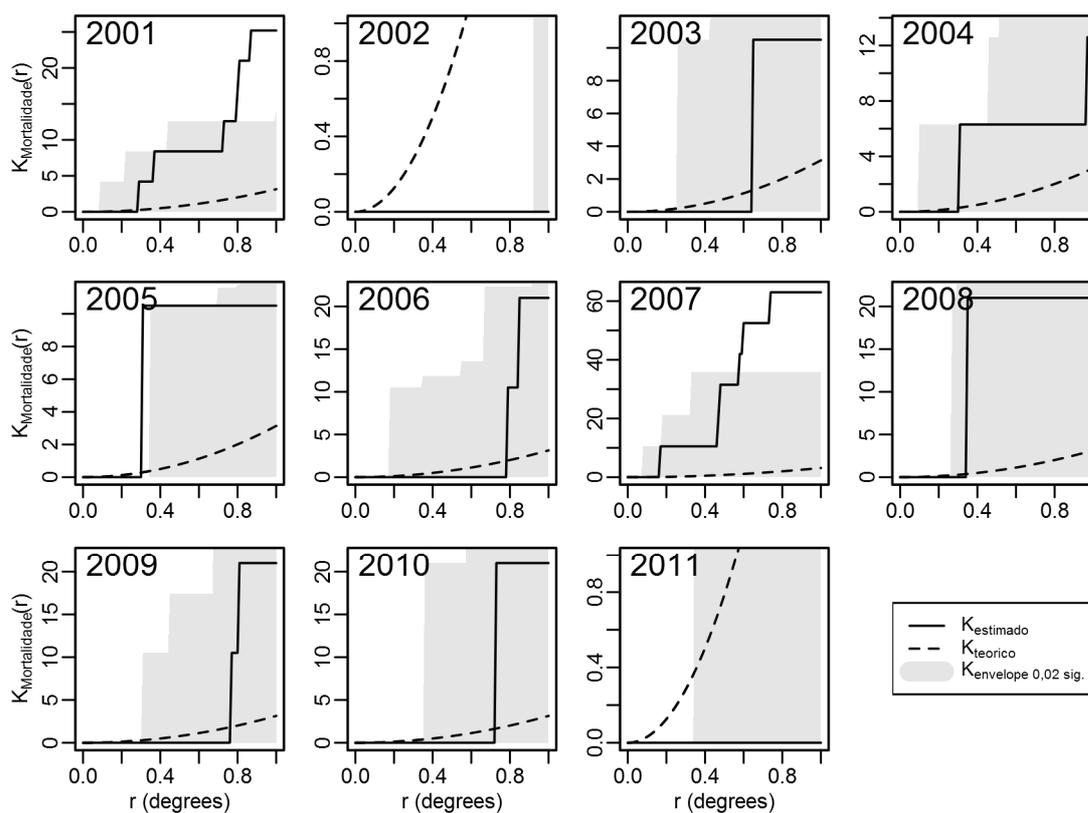


Figura 7. Padrões espaciais da mortalidade de bambu em florestas dominadas por bambu no sudoeste amazônico estimados de 2001 a 2011 pela função K de Ripley. K_{estimado} refere-se à função K estimada para cada distância r , $K_{\text{teórico}}$ refere-se ao valor teórico de K de acordo com a distribuição de Poisson, $K_{\text{envelope 0,02 sig}}$ corresponde ao envelope de 2% de significância para a hipótese de completa aleatoriedade espacial.

Considerando a restrição pela ocorrência de bambu e floresta intacta, observou-se que muitos anos apresentaram K estimado igual a 0 como em 2002, 2003, 2008, 2009, 2010, 2011 (Figura 8). No caso de 2002 e 2010 as amostras de mortalidade de bambu ocorreram fora da máscara de florestas intacta, e, portanto, não entraram na análise. Nos demais anos, não existiam amostras a menos de 1° de distância.

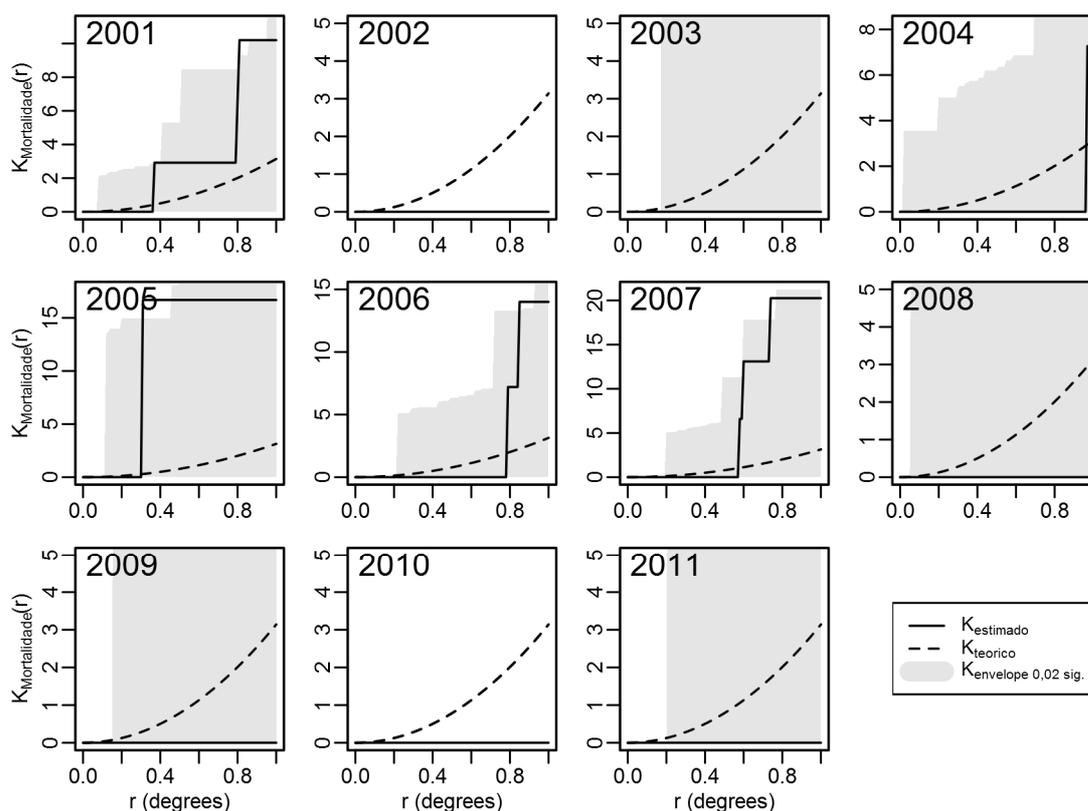


Figura 8. Padrões espaciais da mortalidade de bambu em florestas dominadas por bambu no sudoeste amazônico estimados de 2001 a 2011 pela função K de Ripley com janela de análise restrita sobre áreas de ocorrência de bambu e floresta intacta. K_{estimado} refere-se à função K estimada para cada distância r , $K_{\text{teórico}}$ refere-se ao valor teórico de K de acordo com a distribuição de Poisson, $K_{\text{envelope } 0,02 \text{ sig}}$ corresponde ao envelope de 2% de significância para a hipótese de completa aleatoriedade espacial.

3.5. Padrões espaço-temporais entre mortalidade de bambu e focos de calor

Analisando os padrões espaciais entre mortalidade de bambu e focos de calor observou-se agrupamento entre as variáveis para um nível de significância de 2% em 2003 ($r \geq 0,6^\circ$), 2005 e 2009 para todas as distâncias r , 2010 ($r \geq 0,7^\circ$), e 2011 ($r \geq 0,3^\circ$) (Figura 9). Os demais anos e distâncias apresentaram padrão aleatório por seus K estimados estarem contidos dentro do envelope de AEC com um nível de significância de 2% (Figura 9).

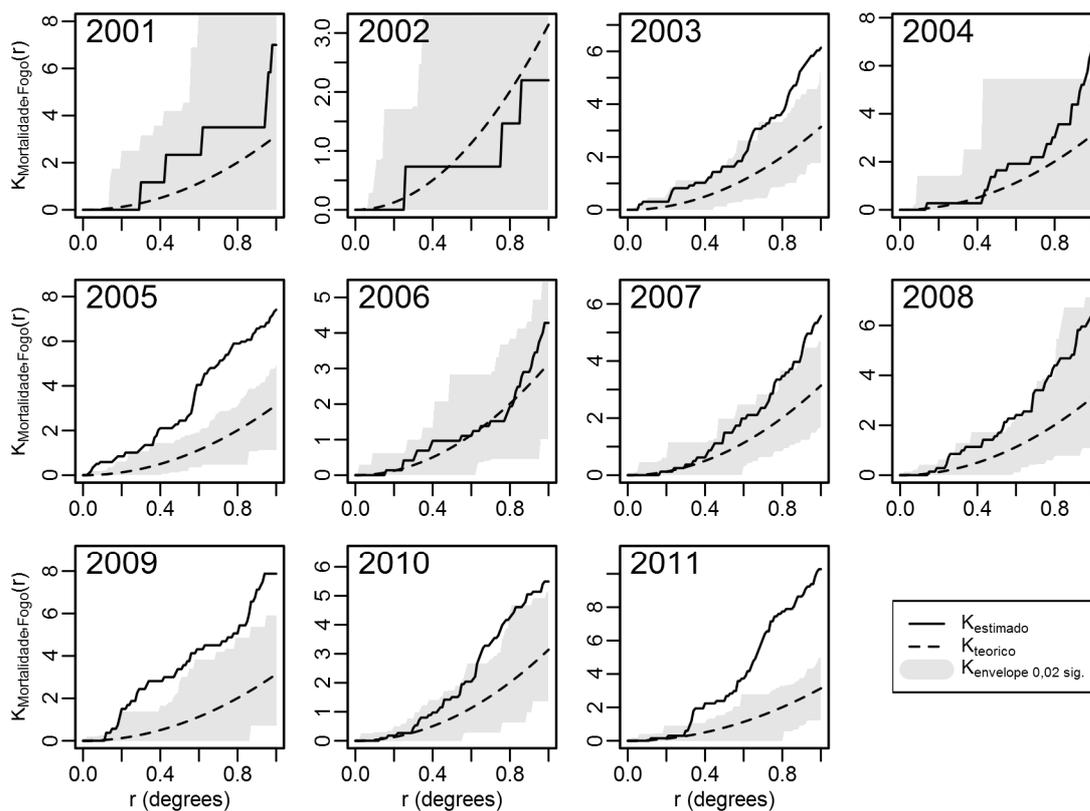


Figura 9. Padrões espaciais entre a mortalidade de bambu e focos de calor em florestas dominadas por bambu no sudoeste amazônico estimados de 2001 a 2011 pela função K de Ripley. K_{estimado} refere-se à função K estimada para cada distância r , $K_{\text{teórico}}$ refere-se ao valor teórico de K de acordo com a distribuição de Poisson, $K_{\text{envelope 0,02 sig.}}$ corresponde ao envelope de 2% de significância para a hipótese de completa aleatoriedade espacial.

Considerando a janela restrita pela ocorrência de bambu e floresta intacta, não foi possível observar agrupamento entre as variáveis (Figura 10). Todos os anos e distâncias apresentaram padrão aleatório considerando um envelope de AEC de 2% de nível de significância, exceto o ano de 2005 ($0,6 \leq r \leq 0,7^\circ$) e 2006 ($0,7 \leq r \leq 0,8^\circ$) que apresentaram padrão regular (Figura 10).

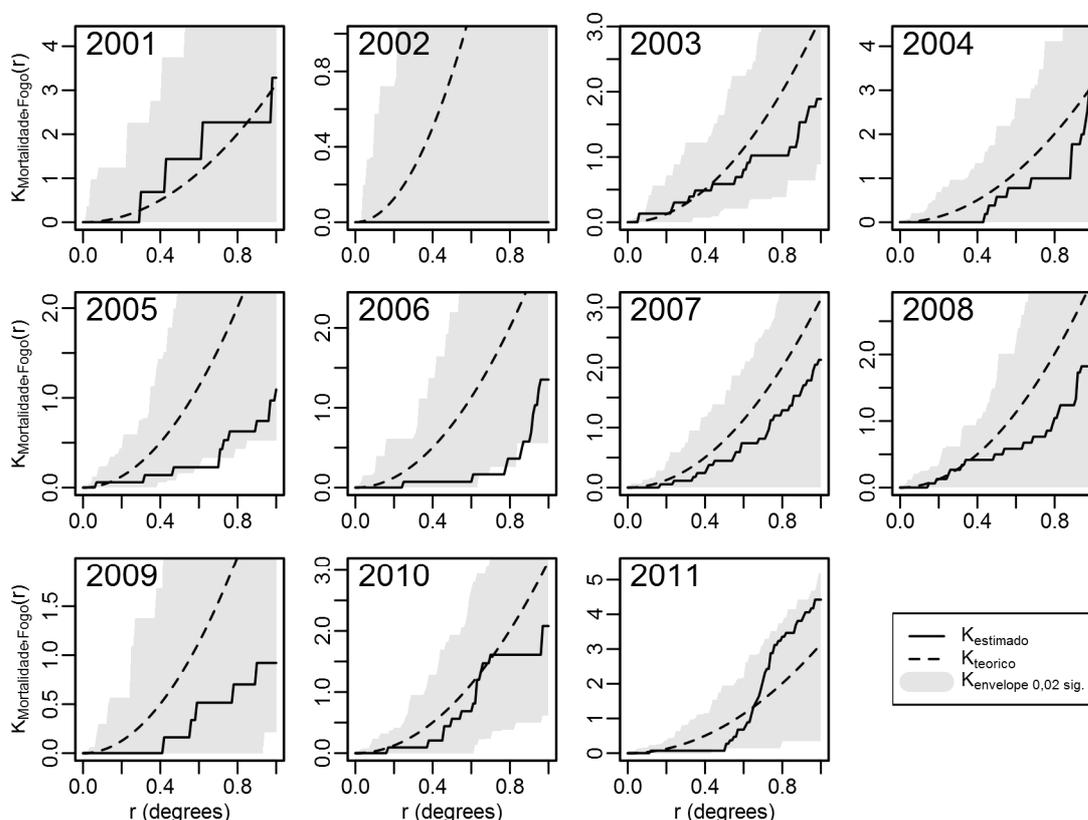


Figura 10. Padrões espaciais entre a mortalidade de bambu e focos de calor em florestas dominadas por bambu no sudoeste amazônico estimados de 2001 a 2011 pela função K de Ripley com janela de análise restrita sobre áreas de ocorrência de bambu e floresta intacta. K_{estimado} refere-se à função K estimada para cada distância r , $K_{\text{teórico}}$ refere-se ao valor teórico de K de acordo com a distribuição de Poisson, $K_{\text{envelope 0,02 sig}}$ corresponde ao envelope de 2% de significância para a hipótese de completa aleatoriedade espacial.

Quando considerado um lag de um mês nos focos de calor, com a janela tradicional, observou-se agrupamento entre mortalidade de bambu e focos de calor em 2001 ($r \geq 0,8^\circ$), 2004 ($r \geq 0,4^\circ$), 2005 e 2006 para todas as distâncias r , 2007 ($r \geq 0,4^\circ$), 2009 ($0,2 \leq r \leq 0,4^\circ$), 2010 ($r \geq 0,6^\circ$), e 2011 ($r \geq 0,3^\circ$). Os demais anos e distâncias apresentaram padrão aleatório considerando um envelope de AEC com 2% nível de significância (Figura 11).

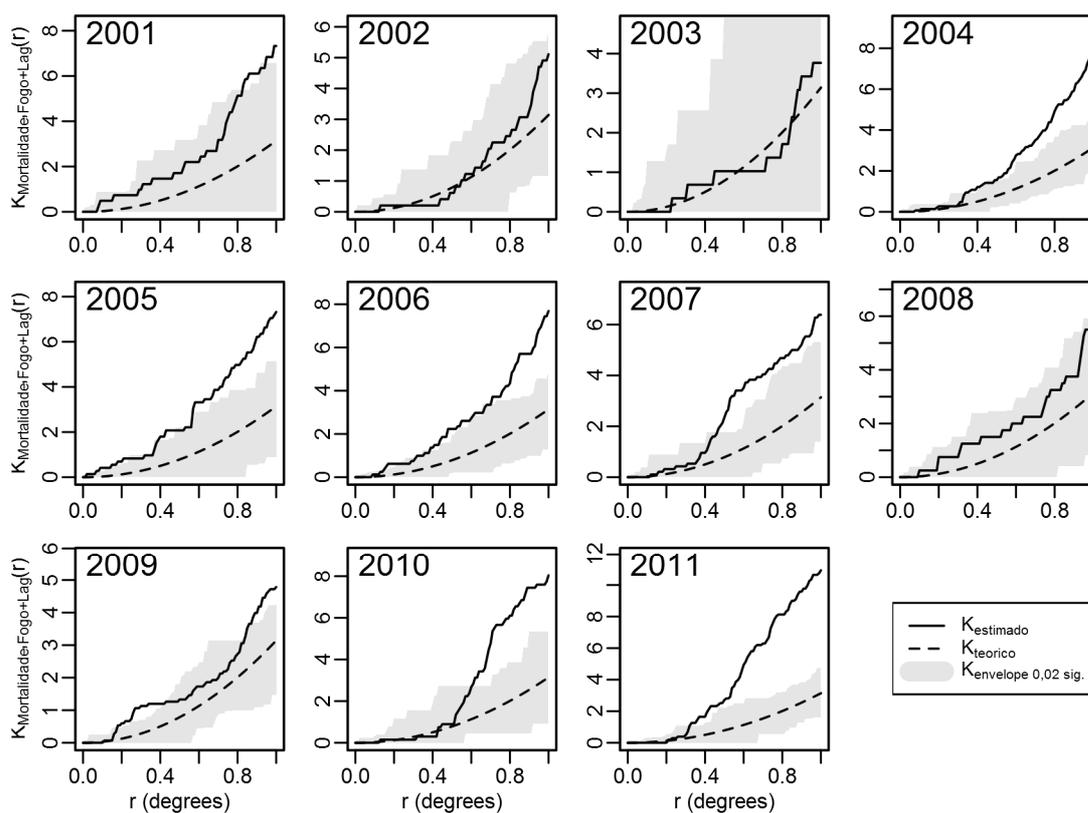


Figura 11. Padrões espaciais entre a mortalidade de bambu e focos de calor com lag de um ano em florestas dominadas por bambu no sudoeste amazônico estimados de 2001 a 2011 pela função K de Ripley. K_{estimado} refere-se à função K estimada para cada distância r , $K_{\text{teórico}}$ refere-se ao valor teórico de K de acordo com a distribuição de Poisson, $K_{\text{envelope 0,02 sig}}$ corresponde ao envelope de 2% de significância para a hipótese de completa aleatoriedade espacial.

Quando considerado um lag de um mês nos focos de calor, com a janela de ocorrência de bambu e floresta intacta, não foi possível observar agrupamento entre as variáveis (Figura 12). Todos os anos e distâncias apresentaram padrão aleatório considerando um envelope de AEC de 2% de nível de significância, exceto o ano de 2009 ($0,5 \leq r \leq 0,9^\circ$) que apresentou padrão regular (Figura 12).

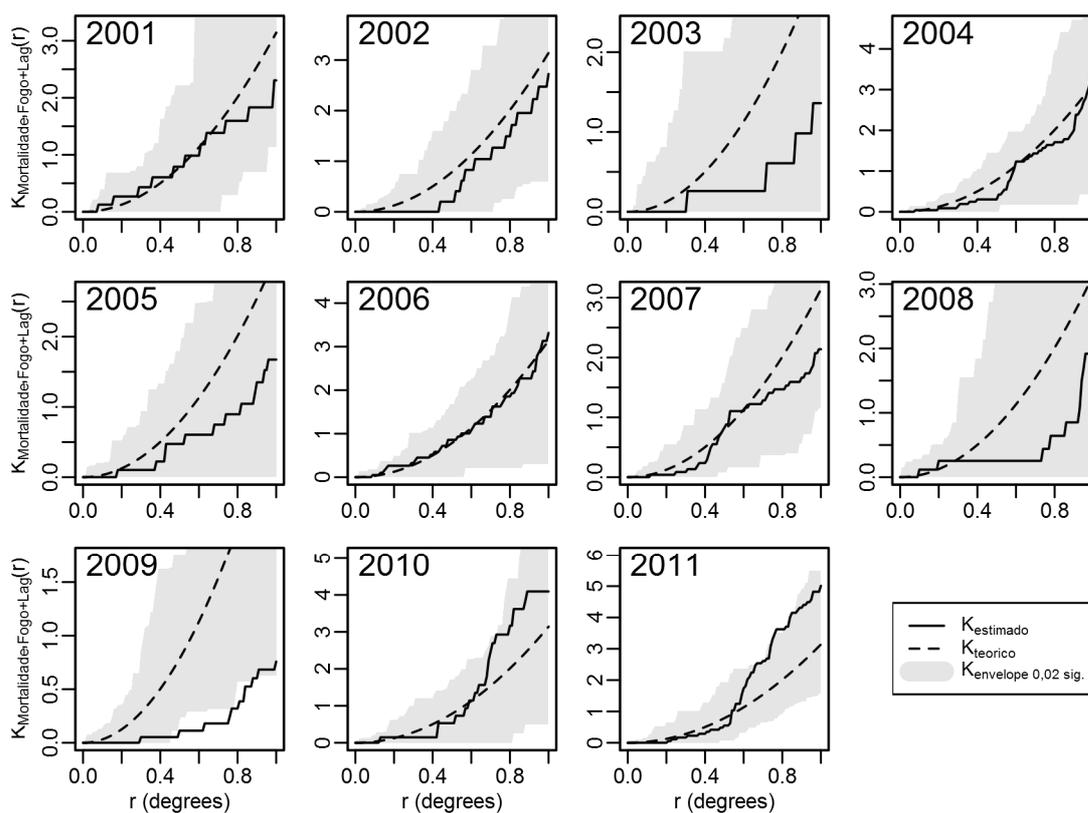


Figura 12. Padrões espaciais entre a mortalidade de bambu e focos de calor com lag de um ano em florestas dominadas por bambu no sudoeste amazônico estimados de 2001 a 2011 pela função K de Ripley com janela de análise restrita sobre áreas de ocorrência de bambu e floresta intacta. K_{estimado} refere-se à função K estimada para cada distância r , $K_{\text{teórico}}$ refere-se ao valor teórico de K de acordo com a distribuição de Poisson, $K_{\text{envelope 0,02 sig}}$ corresponde ao envelope de 2% de significância para a hipótese de completa aleatoriedade espacial.

4. Discussão

4.1. Padrões temporais

Acredita-se que o número crescente de focos de calor de 2001 para 2011 possa estar relacionado principalmente a dois fatores: (1) a inclusão de dados de novos sensores, causando um aumento do número de focos medidos; (2) ao desmatamento e sua associação com as queimadas, como já foi demonstrado em outros estudos (Lima et al., 2012). Para esta análise deveriam ter sido filtrados os focos de calor sobre áreas de florestas intactas, pois provavelmente haveria uma diminuição da frequência de ocorrência.

Nos anos de seca de 2005 e 2010 foi possível constatar uma maior frequência de eventos de focos de calor nos anos de seca e não foram observadas diferenças na mortalidade de bambu. Esses fenômenos eram esperados, pois durante secas extremas há uma maior ocorrência de focos de calor relacionada a uma maior concentração de material seco na floresta e espalhamento do fogo, enquanto que não era esperado um padrão diferenciado na mortalidade de bambu, pois o ciclo é dominado por fatores genéticos (Carvalho et al., 2013).

4.2. Localização dos eventos

Os padrões temporais de *hotspots* de focos de calor mostraram que a região leste e norte da mancha de bambu foram as mais afetadas. Acredita-se que a ocorrência de queimadas nessa região esteja associada a presença humana, que ocorre ao longo dos rios e próximo de

Rio Branco-AC, e que a queimada é geralmente utilizada como método de manejo das áreas recém-desmatadas para limpeza e posterior utilização na agricultura.

Os padrões temporais de *hotspots* de mortalidade de bambu podem estar relacionados ao ciclo fenológico sincronizado entre populações vizinhas de bambu, como observado também em Carvalho et al. (2013). No entanto, para obter uma maior confiança nessa hipótese acreditamos que deveria ser realizada uma análise considerando padrões de áreas entre cada população e relações de “toque” entre os polígonos, pois o tamanho de cada população pode variar, e a distância do centroide das populações poderia enviesar o resultado.

A partir das evidências apontadas não se observou uma relação clara entre os *hotspots* de focos de calor e mortalidade de bambu. A maior ocorrência de *hotspots* de focos de calor foi na região leste, enquanto que a mortalidade de bambu ocorreu de forma dispersa por toda a área. No entanto, apesar da maior intensidade de *hotspots* de foco de calor ocorrerem na região leste, também existem ocorrências dispersas por praticamente toda a área. Dessa forma, ainda que não exista sobreposição dos *hotspots* de focos de calor e mortalidade de bambu, ainda existe a possibilidade de uma relação entre a ocorrência de fogo em áreas de mortalidade de bambu a ser explorada nas análises de padrão de pontos.

Alguns fatores relacionados a parâmetros da técnica Kernel e a filtragem dos dados podem ter influenciado o resultado de forma negativa. No caso da mortalidade de bambu, acredita-se que o Kernel utilizado com banda de $0,5^\circ$ tenha sido adequado, pois não existe uma frequência de eventos muito grande. Enquanto que para os focos de calor, a utilização de uma banda menor que $0,5^\circ$ poderia mostrar o surgimento de outros *hotspots* nas demais regiões. Ainda sobre os focos de calor, como a filtragem não foi realizada para florestas intactas, verificou-se muitos *hotspots* relacionados possivelmente a desmatamento, e caso tivesse sido realizada a filtragem, outros padrões poderiam ter emergido dos dados.

4.3. Padrões espaço-temporais

Dentro de um ambiente de floresta, sem ação humana, não é esperado que os focos de calor, ou as queimadas, apresentem padrões espaciais agrupados em 100% dos casos, pois o fogo depende, além do material combustível e do oxigênio, de uma ignição. Essa ignição em processos naturais vem da ocorrência de raios, e esses não deveriam apresentar um padrão agrupado em uma floresta natural. Dessa forma, acredita-se que os padrões de agrupamento dos focos de calor nessa região estejam relacionados a ação humana. Quando analisado os padrões sobre áreas de floresta intacta, era esperado que houvesse uma diminuição do padrão agrupado, para um padrão mais próximo do aleatório, e isso foi confirmado na maior parte dos anos.

No caso da mortalidade de bambu, um padrão agrupado significa que populações vizinhas florescem e morrem em sincronia. Esse fenômeno é conhecido como ondas de floração e tem sido demonstrado na literatura de bambus (Franklin, 2004). Os anos de 2001 e 2007 apresentaram padrão agrupado devido a proximidade das ocorrências de mortalidade nesses anos e há possibilidade de apresentarem populações sincronizadas. Quando considerada somente a janela restrita pela ocorrência de bambu e floresta intacta, o resultado de aleatoriedade foi unânime. Apesar disso, vale ressaltar que o uso da máscara de florestas intactas estarem excluindo grandes áreas de bambu, que possivelmente não foram antropizadas, mas apenas que possivelmente ao gerar a máscara de florestas intactas, os autores tenham classificado essas áreas como desmatamento.

Para obter uma resposta que atendesse a hipótese da mortalidade de bambu estar relacionada a queimadas, deveriam ser observados padrões de agrupamento entre as ocorrências de mortalidade de bambu e focos de calor. Quando considerada uma janela por retângulo envolvente, e a ocorrência de focos de calor e mortalidade de bambu em um mesmo ano, a hipótese de AEC foi rejeitada a 2% nível de significância para uma parte dos anos

analisados, e foi constatado agrupamento. No entanto, quando considerada uma janela pela ocorrência de bambu e florestas intactas, nenhum dos anos rejeitou a hipótese de AEC a 2% nível de significância, e, portanto, foi constatado aleatoriedade. Os padrões espaço-temporais entre mortalidade de bambu e focos de calor (com lag de um ano) de cada janela obteve resultado similar. No teste da janela por retângulo envolvente as variáveis apresentaram padrão agrupado em vários anos, e até mais anos que o teste dos focos de calor sem lag, enquanto que no teste com a janela pela ocorrência de bambu e florestas intactas as variáveis apresentaram padrão aleatório, como no teste sem lag. Uma limitação do teste pela análise K de Ripley, da forma como foi feita nesse estudo, é que não foi considerado o que veio antes, o fogo ou a mortalidade. No entanto, como não se constatou agrupamento, isso não foi realmente um problema.

Considerando que a máscara de florestas intactas exclui todas, ou pelo menos a maior parte das áreas antropizadas, ou seja, que teriam possibilidade de haver queimada por ignição humana, acredita-se que o resultado obtido a partir da janela por ocorrência de bambu e florestas intactas esteja mais coerente com o teste da hipótese. Portanto, as evidências apontam que não haja relação entre a mortalidade de bambu e focos de calor no sudoeste amazônico. Os anos de seca também não apresentaram padrão diferenciado dos demais anos.

Identificaram-se alguns fatores que podem ter influenciado nos resultados e limitam a confiabilidade na afirmação das hipóteses, como: (1) baixo número de amostras devido ao método de detecção da mortalidade de bambu; (2) resolução temporal da análise não separar populações que morrem no mesmo ano; (3) geo-localização das manchas não estar centralizada; e (4) a máscara de florestas intactas pode ter considerado áreas de mortalidade de bambu como desmatamento e as excluído. No primeiro ponto, como a detecção foi realizada a partir de fotointerpretação, e essa depende principalmente na percepção da mudança de uma área de um ano para outro, foram detectadas principalmente manchas maiores, onde a mortalidade é mais facilmente distinguível pela análise visual. Dessa forma, é possível que ocorrências de mortalidade de bambu em manchas menores tenham ficado de fora, e que poderiam ter sido detectadas caso fosse utilizado um método mais robusto de detecção semi-automática. No segundo ponto, como a fotointerpretação foi realizada sobre imagens anuais, perdeu-se a separação espacial entre populações de bambu que morreram dentro de um mesmo ano. Dessa forma, mais uma vez, é possível que tenha ocorrido uma diminuição do número de amostras possíveis. No terceiro ponto, a geo-localização das manchas de bambu não foi realizada a partir de um método pré-definido, como pelo centróide de cada população. Essa geo-localização foi realizada pela captura de uma coordenada geográfica dentro de cada mancha, sem muito cuidado em sua posição relativa, e, certamente isso tem influência sobre a análise dos padrões espaciais. Levando essas considerações em conta, e que existem populações de tamanhos diferentes, é possível que uma análise considerando padrões de áreas poderia ser uma alternativa mais interessante que padrões de pontos, pois diminuiria o efeito do tamanho da área de cada população. Por fim, no quarto ponto, a máscara de florestas intactas foi responsável por remover amostras de mortalidade de bambu que não foram consideradas de floresta intacta. Nesse caso, é possível que a máscara tenha considerado erroneamente algumas áreas de mortalidade de bambu como desmatamento. Informações extra-oficiais com relação ao programa PRODES de monitoramento de desmatamento do INPE relatam que no passado o programa passou por esse tipo de dificuldade, e que o problema foi sanado após idas a campo para entendimento dos padrões “estranhos” que a mortalidade do bambu causava nas imagens de satélite.

5. Conclusões

Nesse estudo investigou-se a dinâmica espacial e temporal do fogo com relação a ocorrência de mortalidade de bambu em florestas no sudoeste amazônico. As evidências

trazidas pelo presente estudo apontam para que ocorrência de fogo não esteja relacionada com a mortalidade de bambus, e que não existe alteração nesses padrões em anos de extrema seca como 2005 e 2010. Identificaram-se alguns fatores que podem ter influenciado nos resultados e limitam a confiabilidade na afirmação das hipóteses, como: (1) baixo número de amostras devido ao método de detecção da mortalidade de bambu; (2) resolução temporal da análise não separar populações que morrem no mesmo ano; (3) geo-localização das manchas não estar centralizada; e (4) a máscara de florestas intactas pode ter considerado áreas de mortalidade de bambu como desmatamento e as excluiu. Trabalhos futuros ou ainda devem considerar a utilização de um método de detecção semi-automática da mortalidade de bambu com base em toda série temporal de dados, e que permita a detecção sistemática das manchas de bambu, com atribuição da data mais próxima de ocorrência da mortalidade. Além disso, é possível que uma análise considerando padrões de áreas poderia ser uma alternativa mais interessante que padrões de pontos, pois diminuiria o efeito do tamanho da área de cada população. A utilização de uma máscara de florestas intactas mais condizente com a realidade também trará benefícios para o estudo.

Referências

- Aragão, L. E. O. C.; Malhi, Y.; Roman-Cuesta, R. M.; Saatchi, S.; Anderson, L. O.; Shimabukuro, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. **Geophys. Res. Lett.**, v.34, L07701, 2007. doi:10.1029/2006GL028946.
- Baddeley, A.; Rubak, E.; Turner, R. **Spatial Point Patterns: Methodology and Applications** with R. Chapman and Hall/CRC Press, 2015.
- Carvalho, A.L.; Nelson, B.W.; Bianchini, M.C.; Plagnol, D.; Kuplich, T.M. Bamboo-Dominated Forests of the Southwest Amazon: Detection, Spatial Extent, Life Cycle Length and Flowering Waves. **PLoS ONE**, v.8, n.1, e54852, 2013. doi: 10.1371/journal.pone.0054852
- Franklin, D. C. Synchrony and asynchrony: observations and hypotheses for the flowering wave in a long-lived semelparous bamboo. **Journal of Biogeography**, v.31, p.773-786, 2004.
- Griscom, B.; Daly, D.; Ashton, M. Floristics of bamboo-dominated stands in lowland forests of SW Amazonia. **Bull. Torrey Botanical Society**, v.134, n.1, 2007.
- INPE. **Banco de dados de Queimadas**. 2016. Disponível em: <www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>. Acesso em 11/10/2016.
- Keeley, J. E.; Bond, W. J. Mast flowering and semelparity in bamboos: The bamboo fire cycle hypothesis. **American Naturalist**, v. 154, p. 383-391, 1999.
- Lewis, S. L.; Brando, P. M.; Phillips, O. L.; Van Der Heijden, G. M. F.; Nepstad, D. The 2010 Amazon drought. **Science**, v.331, p.554, 2011.
- Lima, A.; Silva, T. S. F.; Aragão, L. E. O. C.; Feitas, R. M.; Adami, M.; Formaggio, A. R.; Shimabukuro, Y. E. Land use and land cover changes determine the spatial relationship between fire and deforestation in the Brazilian Amazon, **Applied Geography**, v.34, 2012.
- Lyapustin, A.; Wang, Y.; Laszlo, I.; Kahn, R.; Korkin, S.; Remer, L.; Levy, R.; Reid, J.S. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, 116, D03211, 2011.
- McMichael, C. H.; Bush, M. B.; Silman, M. R.; Piperno, D. R.; Raczka, M.; Lobato, L. C.; Zimmerman, M.; Hagen, S.; Palace, M. Historical fire and bamboo dynamics in western Amazonia. **J. Biogeogr.**, v.40, p.299-309, 2013. doi:10.1111/jbi.12002

Potapov P., Yaroshenko A., Turubanova S., Dubinin M., Laestadius L., Thies C., Aksenov D., Egorov A., Yesipova Y., Glushkov I., Karpachevskiy M., Kostikova A., Manisha A., Tsybikova E., Zhuravleva I. Mapping the World's Intact Forest Landscapes by Remote Sensing. **Ecology and Society**, v.13, 2008.

Ripley, B.D. **Spatial statistics**. John Wiley and Sons, 1981.

Smith, M.; Nelson, B.W. Fire favours expansion of bamboo-dominated forests in the south-west Amazon. **Journal of Tropical Ecology**, v.27, n.1, p. 59-64, 2010. doi: 10.1017/S026646741000057X.