



MODELOS ESTATÍSTICOS ESPAÇO-TEMPORAIS PARA DETERMINAR FRONTEIRAS DE ÁREAS DE DESMATAMENTO PRÓXIMAS A RODOVIAS NO AMAZONAS

Palavras-Chave: ESTATÍSTICA ESPACIAL, INFERÊNCIA BAYESIANA, DESFLORESTAMENTO

Autores:

LUCAS PERONDI KIST, IMECC - UNICAMP

Prof. Dr. GUILHERME VIEIRA NUNES LUDWIG (orientador), IMECC - UNICAMP

INTRODUÇÃO

A transformação de florestas em solo para agricultura e pecuária, bem como a exploração ilegal de madeira e recursos naturais, ameaçam a floresta amazônica e podem causar danos irreversíveis à biodiversidade e equilíbrio climático do planeta (ALLAN et al., 2022; XU, 2021, entre outros). O monitoramento através de satélites da progressão de áreas desflorestadas requer ferramentas estatísticas para classificação e segmentação das imagens.

A proximidade de árvores a pastagens e sua expansão, e o raio de atuação dos exploradores levam a uma estrutura natural de dependência espaço-temporal na análise dos dados, que também é influenciada pela proximidade de rodovias e estradas. Isso se deve à necessidade de transporte da madeira, sendo que a construção de novas estradas pode provocar expansão do desmatamento na região (DALLA-NORA et al., 2014; SILVA et al., 2020).

No contexto de monitoramento do desmatamento no Brasil, foi produzido o Relatório Anual Do Desmatamento No Brasil de 2022. De acordo com ele, Apuí (AM) foi o terceiro município com maior média de desmatamento no período entre 2019 e 2022, com um aumento de 59% na área desmatada nesse período. Por isso, essa é uma localidade importante no âmbito da expansão do desmatamento e seu estudo pode auxiliar na previsão de locais suscetíveis ao desflorestamento.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é modelar a probabilidade de ocorrência de desmatamento em um determinado *pixel* no município de Apuí (AM) entre 2010 e 2021 levando em consideração a distância até a rodovia mais próxima, além de sua localização espacial. Dessa forma, foi investigado se há evidências estatisticamente significativas de que essa distância influencia a ocorrência do desmatamento, além da existência ou não de correlação espacial relevante.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados referentes ao uso da terra no município de Apuí (AM) em 2010 e 2021 foram obtidos do Projeto MapBiomas - Coleção 7.1 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Eles foram exportados em uma resolução de 2km por *pixel* e foram reclassificados em floresta (formação florestal e formação campestre), desmatamento (pastagem e área urbanizada) e corpo hídrico (rio, lago e oceano). Em relação aos *shapefiles* das rodovias estaduais e federais de 2021 que foram utilizados no estudo, estão disponíveis no site do DNIT. Por fim, os *shapefiles* dos municípios e estados de interesse são aqueles presentes no pacote *geobr* da linguagem de programação *R*.

Considerando que é de interesse modelar a probabilidade de ocorrência de desmatamento em um determinado pixel, inicialmente foi ajustado o modelo binomial, um modelo de regressão para dados binários que considera a função de ligação logito (MCCULLOCH e SEARLE, 2001). Isto é, se p_i é a probabilidade de sucesso da i -ésima observação, e ela está a x_i dezenas de quilômetros da rodovia mais próxima, então:

$$\text{logito}(p_i) = \log\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_i + \xi, \quad \xi \sim N(0, \sigma^2)$$

Posteriormente, a fim de incluir uma componente espacial no modelo, foi feito um ajuste bayesiano de um modelo logístico com efeitos espaciais. Ou seja, se o pixel S_i tem probabilidade p_i de ter sido desmatado, então

$$\text{logito}(p_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i + \eta(S_i) \quad \eta(S_i) \sim GF(0, \Sigma).$$

Para aproximar um campo Gaussiano (GF), foi considerada uma equação diferencial parcial espacial (do inglês, *SPDE*), cuja solução é um campo Gaussiano com correlação de Matérn (LINDGREN et al., 2011), dada por:

$$\text{Cor}_M(\eta(S_i), \eta(S_j)) = \frac{2^{1-\nu}}{\Gamma(\nu)} (\kappa \|S_i - S_j\|_2)^\nu K_\nu(\kappa \|S_i - S_j\|_2)$$

onde K_ν é a função de Bessel modificada de segundo tipo.

Nesse sentido, o ajuste bayesiano foi realizado a partir do modelo:

$$\begin{aligned} \text{logito}(\mathbf{p}) | \beta_0, \beta_1, \mathbf{u}, \sigma_e^2 &\sim N(\beta_0 + \beta_1 \mathbf{X} + \mathbf{A}\mathbf{u}, \sigma_e^2) \\ \mathbf{u} &\sim GF(0, \Sigma), \end{aligned}$$

onde \mathbf{p} é o vetor com as probabilidades de desmatamento, \mathbf{X} é o vetor de distâncias até a rodovia mais próxima, \mathbf{A} é a matriz de projeção e \mathbf{u} é um campo Gaussiano aleatório. Isso foi realizado utilizando Aproximações de Laplace Encaixadas e Integradas (do inglês, *INLA*), conforme descrito em KRAINSKI et al..

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a localização do município de Apuí no território brasileiro (roxo), bem como as rodovias estaduais e federais mais próximas a ele (vermelho). A partir dela, nota-se que Apuí está no extremo sudeste do estado do Amazonas, próximo a Pará, Mato Grosso e Rondônia, e possui algumas rodovias em suas proximidades.

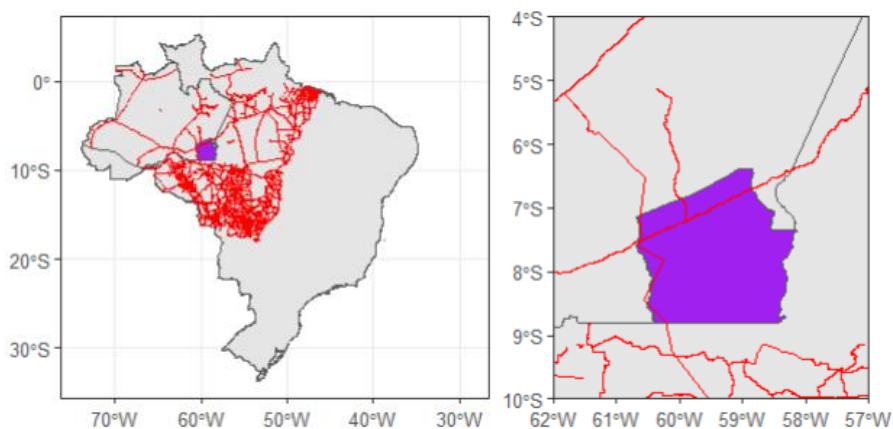


Figura 1: Localização do município de Apuí e rodovias próximas

O uso da terra no município de Apuí em 2010 e 2021 está apresentado na Figura 2, com uma resolução de 4km² em cada *pixel*. Com base nela, nota-se que houve uma expansão do desmatamento, sobretudo no norte do município no período, notavelmente ao longo das extensões das rodovias existentes na região.

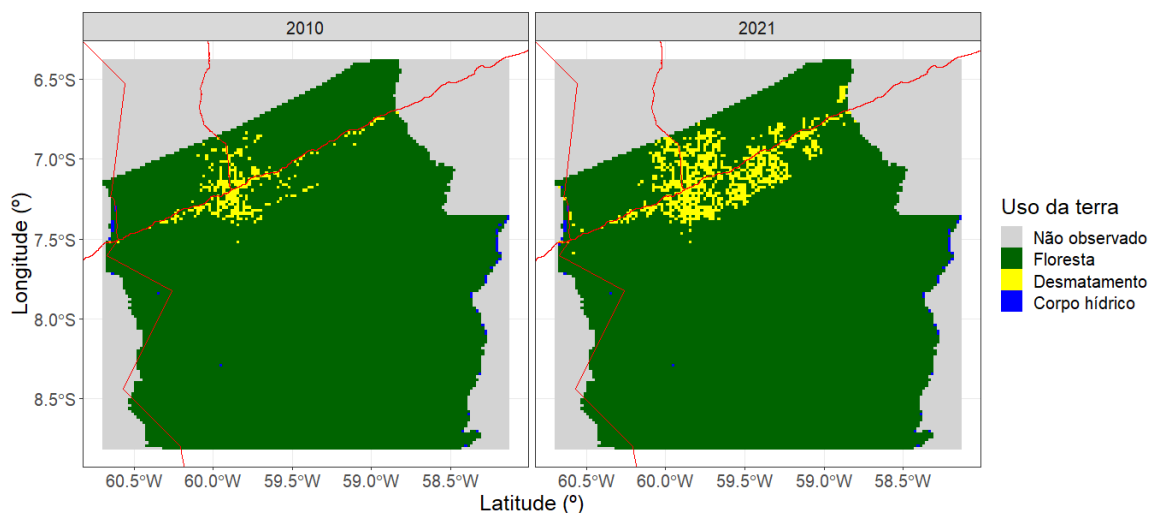


Figura 2: Uso da terra em Apuí nos anos de 2010 e 2021.

O modelo logístico ajustado considerando apenas a distância (em dezenas de quilômetros) à rodovia mais próxima em 2021 foi ajustado e os resultados estão na Tabela 1. Pode-se concluir que ambos os coeficientes são bastante significativos, além de que há um efeito negativo da distância, ou seja, que quanto mais próximo a uma rodovia, maior a probabilidade de desmatamento. Entretanto, o teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov aponta um p-valor menor do que 10^{-10} , levando à rejeição da hipótese de normalidade dos resíduos e tornando os resultados não confiáveis.

Tabela 1: Resumo do ajuste do modelo logístico

Coeficiente	Estimativa pontual	Desvio-padrão	Estatística z	p-valor
β_0	-2,43	0,07	-35,98	$< 10^{-10}$
β_1	-0,21	0,02	-13,71	$< 10^{-10}$

Na sequência, foi feito o ajuste bayesiano de um modelo logístico com efeitos espaciais. As distribuições a posteriori dos parâmetros de interesse estão apresentadas na Figura 3, através das quais pode-se concluir que há fortes evidências de que β_0 é não nulo, enquanto não há evidências de que β_1 não seja igual a zero. Dessa forma, conclui-se que a distância não influencia a probabilidade de desmatamento.

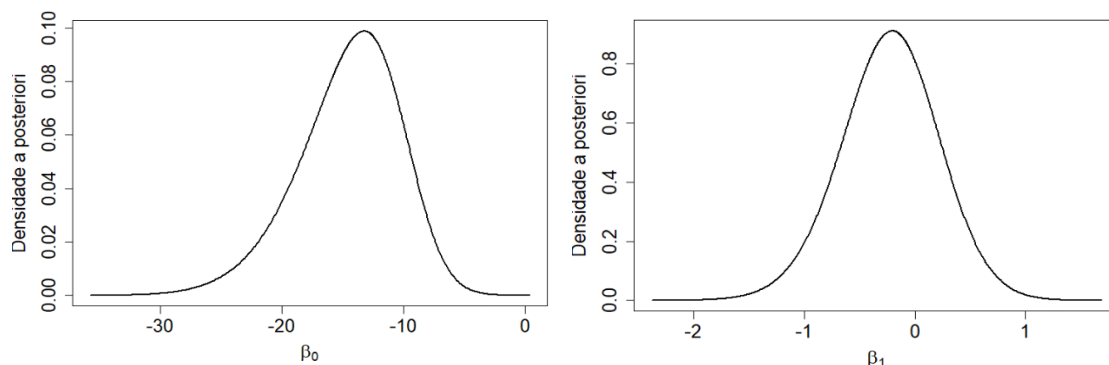


Figura 3: Distribuições a posteriori dos parâmetros de interesse.

Ademais, a Figura 4 apresenta a média e o desvio-padrão dos efeitos espaciais. É possível perceber que as regiões nas quais houve desflorestamento possuem maior média e menor desvio-padrão, evidenciando o fato de que a probabilidade de desmatamento se deve mais à localização do que à distância à rodovia mais próxima.

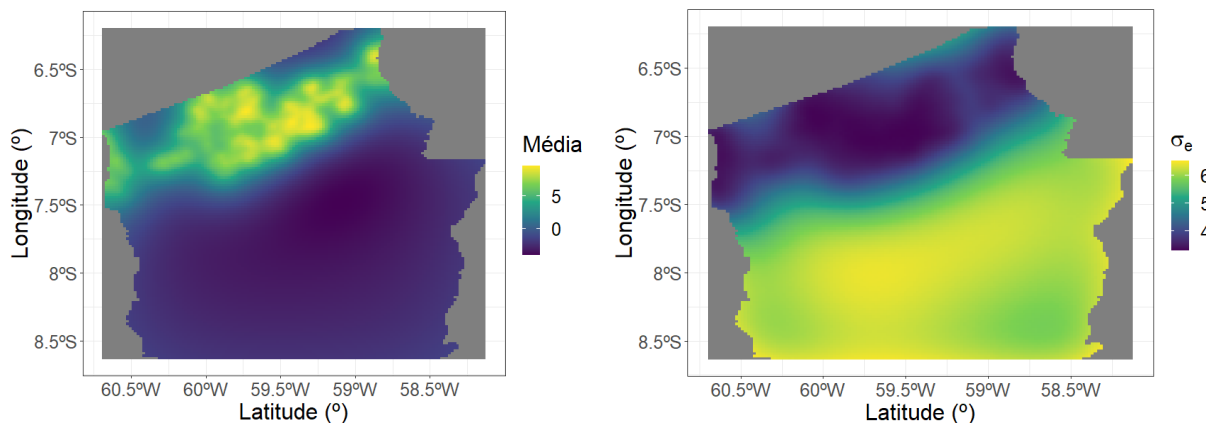


Figura 4: Média e desvio-padrão dos efeitos espaciais do modelo.

Por fim, a Figura 5 ilustra a probabilidade de desmatamento ajustada. A partir dela, percebe-se que, conforme esperado, ela é maior nas regiões onde houve desflorestamento entre 2010 e 2021.

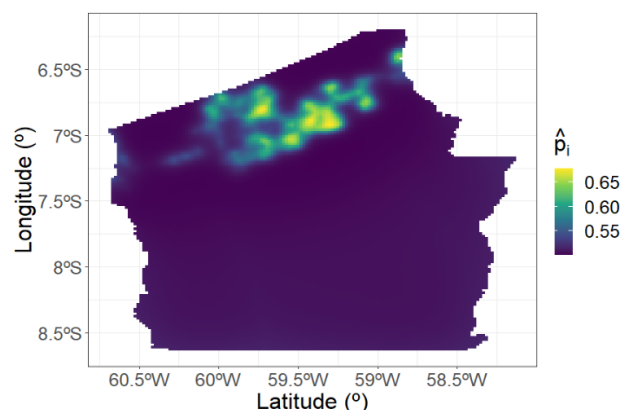


Figura 5: Probabilidade de desmatamento ajustada

CONCLUSÕES

A partir das figuras apresentadas e dos modelos ajustados, é possível concluir que, entre 2010 e 2021, houve desmatamento principalmente no norte do município de Apuí, sobretudo ao longo das rodovias que passam nessa região. Além disso, percebeu-se que o modelo logístico com apenas a distância até a rodovia mais próxima como covariável não foi capaz de captar bem a dinâmica dos dados.

Por outro lado, a introdução de uma componente espacial modificou o impacto de β_1 : de extremamente significativo passou a ter alta probabilidade de ser nulo. Ademais, os valores ajustados, bem como a média e desvio-padrão do campo Gaussiano, mostram-se bastante relevantes para explicar a variação da probabilidade de ocorrência de desmatamento.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador por todos os ensinamentos. Aos meus pais pelo apoio. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa concedida, processo nº 2022/11029-9.

BIBLIOGRAFIA

ALLAN, James R. et al. The minimum land area requiring conservation attention to safeguard biodiversity. **Science**, v. 376, n. 6597, p. 1094-1101, 2022.

AZEVEDO, Tasso et al. **Relatório anual do desmatamento no Brasil 2022**. São Paulo: MapBiomas, 2022.

DALLA-NORA, Eloi Lennon et al. Why have land use change models for the Amazon failed to capture the amount of deforestation over the last decade?. **Land use policy**, v. 39, p. 403-411, 2014.

DNIT. **Visualizador de dados do DNITGeo**. Disponível em: <https://servicos.dnit.gov.br/vgeo/>. Acesso em: 15 de julho de 2023.

KRAINSKI, Elias et al. **Advanced spatial modeling with stochastic partial differential equations using R and INLA**. Chapman and Hall/CRC, 2018.

LINDGREN, Finn; RUE, Håvard; LINDSTRÖM, Johan. An explicit link between Gaussian fields and Gaussian Markov random fields: the stochastic partial differential equation approach. **Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology**, v. 73, n. 4, p. 423-498, 2011.

MCCULLOCH, Charles E.; SEARLE, Shayle R. **Generalized, linear, and mixed models**. John Wiley & Sons, 2004.

PEREIRA, R.H.M.; GONÇALVES, C.N.; et. all (2019) **geobr: Loads Shapefiles of Official Spatial Data Sets of Brazil**. GitHub repository - <https://github.com/ipeaGIT/geobr>.

SILVA, Alexsandro CO et al. A spatio-temporal Bayesian Network approach for deforestation prediction in an Amazon rainforest expansion frontier. **Spatial statistics**, v. 35, p. 100393, 2020.

XU, Alice. **The Political Origins of Deforestation in the Brazilian Amazon, 2000-2012**. Disponível em SSRN 3707331, 2020.