

ESPACIALIZAÇÃO DE ESPÉCIES FLORESTAIS POR CLASSE DIAMÉTRICA USANDO MÁXIMA ENTROPIA NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA

Symone Maria de Melo Figueiredo⁽¹⁾ e Evandro Orfanó Figueiredo⁽²⁾

¹Universidade Federal do Acre, Centro de Ciências Biológicas e da Natureza. E-mail: symone.figueiredo@ufac.br; ²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa, Centro de Pesquisa Agroflorestal do Acre -CPAF – Acre . E-mail: evandro.figueiredo@embrapa.br.

RESUMO

O objetivo do estudo foi analisar a predição da distribuição de espécies florestais madeireiras, em escala local, utilizando dados de ocorrência agrupados por classe diamétrica. Para estimar a distribuição foi utilizado o método de máxima entropia (Maxent) e as ocorrências são de inventário florestal de planos de manejo. Foram selecionadas seis variáveis preditoras, por espécie, pelo método de todas as regressões possíveis. Os modelos tiveram em média bom desempenho (AUC = 0,7; taxa de omissão = 8,8%), demonstrando a viabilidade de se prever a distribuição de espécies por classe diamétrica. De acordo com os modelos, *Astonium lecointei*, *Clarisia racemosa* e *Ceiba pentandra* com diâmetro a altura do peito (DAP) ≥ 100 cm têm maior probabilidade de ocorrer em locais com altitudes mais elevadas do terreno. Esse procedimento de modelagem é eficiente para ampliar o conhecimento sobre as preferências de habitat e a distribuição geográfica de espécies na paisagem.

Palavras-chave — Maxent, Modeflora, Acre.

ABSTRACT

The aim of the study was to analyze the predicting the distribution of forest tree species, on a local scale, using occurrence data grouped by diameter class. To estimate the distribution of species was used the maximum entropy method (Maxent) and the occurrence data are forest management plan. Six predictor variables were selected by species by method of all possible regressions. The models, by species and diameter class, had an average good performance (AUC = 0.7; omission rate = 8.8%), demonstrate the viability of predicting distribution of species by diameter class. According to the models, trees *Astonium lecointei*, *Clarisia racemosa* and *Ceiba pentandra* with diameter at breast height (DBH) ≥ 100 cm are more likely to occur in localized at higher elevations. This modeling procedure is efficient to increase knowledge about habitat preferences and geographical distribution of species in the landscape.

Key words — Maxent, Modeflora, Acre.

1. INTRODUÇÃO

Nas regiões tropicais, sobretudo na Amazônia, são poucos os estudos que visam a gestão e o manejo de espécies numa escala local, utilizando como ferramenta os modelos de distribuição de espécies, devido à escala mais grosseira das variáveis ambientais e à escassez de dados de ocorrências [1].

Compreender a distribuição espacial atual das espécies é essencial para o desenvolvimento de estratégias de conservação da biodiversidade e tem implicações importantes na gestão florestal [2].

Em pequenas áreas de estudo (> 100 km²) são raros os exemplos usados para produzir predições, devido à escassa disponibilidade de variáveis ambientais compatíveis com resoluções finas (pixels >100 m) e à ausência de informações sobre as espécies nessa escala [3].

Para modelar a distribuição de uma espécie em resolução mais fina é recomendado o uso de dados de ocorrência precisos e grandes tamanhos de amostra, proporcionando melhores predições para os organismos sésseis [4].

As projeções futuras apontam para o aumento do desmatamento na Amazônia [5], causando preocupação quanto a destruição de habitats e levando ao risco de extinção espécies ainda pouco conhecidas [6]. Entre as espécies florestais, aquelas cuja madeira tem densidade básica pesada e maior diâmetro a altura do peito (DAP) são as árvores de maior interesse madeireiro, devido ao alto valor comercial e consequentemente tem maior pressão da exploração.

Diante dessa situação e considerando que a distribuição diamétrica é um potente indicador da estrutura florestal [7], o objetivo do estudo foi analisar a utilização de dados de ocorrência obtidos de inventários florestais de planos de manejo, agrupados por classe diamétrica, na predição de modelos de distribuição potencial de espécies florestais madeireiras, em escala local, incluindo variáveis ambientais e biológicas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos ocorreram na região leste do Acre com área aproximada de 34.852 ha. Os dados de ocorrência das espécies florestais foram obtidos de inventários realizados em 15 áreas de planos de manejo florestal licenciados pelo órgão ambiental estadual.

Em todas as áreas manejadas, os inventários florestais foram realizados segundo os procedimentos do Modelo Digital de Exploração Florestal – Modeflora® [8]. O banco de dados dos inventários florestais foi disponibilizado pela Embrapa Acre e pelo Instituto de Meio Ambiente do Acre.

Os modelos de distribuição de espécies foram desenvolvidos para um grupo de oito espécies florestais de valor madeireiro (*Amburana acreana* (Ducke) A.C.Sm.; *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.; *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J.F.Macbr.; *Aspidosperma macrocarpon* Mart.; *Astronium lecointei* Ducke.; *Castilla ulei* Warb.; *Clarisia racemosa* Ruiz & Pav; *Hura crepitans* L.). Foi realizada coleta de material botânico para herborização e confirmação do nome científico das espécies. As exsiccatas foram depositadas no herbário do Parque Zoobotânico da Universidade Federal do Acre (UFACPZ).

Para cada espécie, os registros de presença nos 15 inventários florestais foram compilados e divididos de acordo com o tamanho do diâmetro à altura do peito (DAP) em quatro classes com intervalo de 20 cm.

Devido à escala fina definida para o estudo, ou seja, variáveis ambientais com resolução espacial de 90 m foram usadas variáveis topográficas e de índice de vegetação para caracterizar o ambiente em curtas distâncias. Para expressar a interação biológica entre as espécies florestais foram utilizados os dados de densidade de indivíduos. Assim, as variáveis preditoras foram organizadas em dois grupos: ambientais e biológicas.

As variáveis ambientais topográficas, derivadas de dados do Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) com resolução de 90 m, foram: altitude, declividade e distância vertical à drenagem mais próxima (Height Above the Nearest Drainage – HAND). A HAND foi processada de acordo com a metodologia de [9]. O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) foi obtido a partir de um mosaico de imagens do Landsat TM (Thematic Mapper), reamostrado para resolução de 90 m, compatível com as demais variáveis. As imagens são do período seco do ano de 2011 em que se verifica pouca cobertura de nuvens e por ser uma data anterior à exploração florestal nas áreas manejadas.

As variáveis biológicas representam a superfície de densidade de pontos de cada uma das espécies florestais de interesse madeireiro, que foram construídas usando o banco de dados das ocorrências. O valor da densidade de pontos de cada pixel corresponde à média da contagem do número de ocorrência dos pixels vizinhos, considerando uma janela de 5 x 5 pixel. Dessa forma, quanto maior o número de indivíduos por unidade de área, maior o valor de densidade.

Para a seleção das variáveis explicativas dos modelos de distribuição das espécies por classe diamétrica foi utilizado o método de todas as regressões possíveis [10], que pondera a inclusão de 2 a 6 parâmetros (β_{is}), considerando os critérios: sem multicolineariedade, com distribuição normal dos resíduos, independentes e homocedásticos, para isso, são realizadas as seguintes estatísticas: matriz de

multicolineariedade, distribuição do erro padronizado, teste de Durbin-Watson (DW) e o F-máximo de Hartley [11].

Nesse procedimento, a variável dependente foi o diâmetro à altura do peito (DAP) e as variáveis explicativas foram as quatro preditoras ambientais e as sete densidades de pontos das outras espécies também presentes na área. As variáveis selecionadas foram aquelas cuja regressão apresentou o menor quadrado médio do erro (QMR) e o maior coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust}). Esse procedimento foi repetido para cada uma das oito espécies florestais.

Na modelagem da distribuição de espécies foi usado o algoritmo de máxima entropia (Maxent), um método para realizar previsão ou inferências baseado apenas em dados de presença [12], utilizando o software Maximum Entropy Species Distribution Modelling v. 3.3.3k (<www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>).

Para cada espécie selecionada foi gerado um conjunto de cinco modelos Maxent: um modelo por classe de DAP (ocorrências divididas em quatro classes) e um modelo geral, incluindo o conjunto de ocorrências.

Na construção de cada modelo foram feitas 10 partições aleatórias dos dados de ocorrência, usando a técnica de reamostragem *subsample*, gerando 10 subamostras do conjunto de dados, sem reposição. Em cada subamostra os dados foram divididos aleatoriamente, 70% para amostras de treino e 30% para amostras de teste externo.

Para a avaliação do desempenho dos modelos foram analisados os resultados da área sob a curva (Area Under the Curve – AUC) e das taxas de omissão dos modelos, considerada importante como uma medida auxiliar à AUC [13].

Para o cálculo da taxa de omissão do modelo foi usado o limiar 10 *Percentile Training Presence*, o qual assume que 10% dos registros de treinamento do algoritmo com os menores valores de probabilidade serão descartados. Esse limiar foi escolhido por ser mais rigoroso, visto que a avaliação ocorreu dentro das áreas dos planos de manejo.

Foi aplicado o teste t para avaliar a significância ($\alpha=0,05$) da variação em torno da média do tamanho das áreas de predição dos modelos por classe de diâmetro e ainda foram computadas as áreas de consenso entre os modelos para avaliar se a área de projeção geográfica difere ou não em função do tamanho de DAP.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desempenho dos modelos de distribuição de espécies foi satisfatório, com valores de AUC $\geq 0,7$ e taxas de omissão $\leq 10\%$, na maioria dos modelos testados, permitindo identificar as características ambientais preferenciais entre as espécies florestais e distinguir geograficamente os locais da paisagem com maior probabilidade de ocorrência dos indivíduos da mesma espécie em função da classe diamétrica.

Entre as variáveis preditoras, a altitude e o NDVI foram aquelas com maior percentual de importância entre os

modelos avaliados, independente da espécie (Figura 1A). A densidade de *A. acreana* e de *C. racemosa* foi a variável biológica que se destacou na modelagem (Figura 1B).

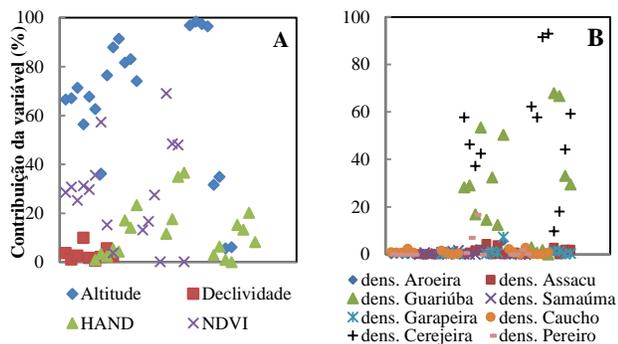


Figura 1. Variáveis ambientais (A) e biológicas (B) selecionadas e sua contribuição percentual nos modelos Maxent no leste do Acre, Brasil. dens.= densidade.

Os resultados do teste Jackknife permitem inferir que a combinação entre variáveis ambientais e biológicas tem informações importantes na predição da distribuição de espécies. Em 37,5% dos modelos avaliados, as informações mais importantes na distribuição predita foram associadas a uma variável biológica, mostrando que a densidade de ocorrência de outras espécies pode ser usada na predição de modelos em pequena escala.

Na modelagem de *C. ulei*, *A. acreana* e *C. pentandra*, a variável associada à densidade de *C. racemosa* foi considerada importante nos modelos por classe diamétrica. *C. racemosa* é uma espécie generalista [15] com distribuição ampla e capacidade de desenvolvimento em variados habitats, exceto em florestas alagadas, onde ocorre raramente [16]. Assim, podem ocorrer associações com outras espécies, compartilhando características ecológicas e uso de habitats semelhantes.

Nos modelos de distribuição de *C. ulei* e *A. macrocarpon*, independentemente da classe diamétrica, e também na predição da distribuição de *C. pentandra* com DAP ≥ 80 cm, a densidade de *A. acreana* foi a variável que parece ter a informação mais útil que não está presente nas outras variáveis.

Esse resultado pode refletir que a distribuição de *C. ulei*, *A. macrocarpon* e os indivíduos de *C. pentandra* com DAP ≥ 80 cm, ocorrem em áreas mais altas do terreno, pois nessas condições é maior a densidade de *A. acreana*. A confirmação de que as árvores de maior tamanho de *C. pentandra* estão localizadas no topo é sugerida pela análise dos resultados de modelos construídos com as ocorrências com os maiores DAPs, pois a importância da variável distância vertical à drenagem mais próxima (HAND) diminuiu em relação às classes de menores diâmetros.

As interações bióticas afetam a distribuição [17] e devem ser consideradas nos modelos. Os resultados mostraram que a densidade de ocorrência de outras espécies pode ser usada

na predição de modelos em pequena escala, seja por uma interação biótica ainda não esclarecida ou mesmo em substituição a uma informação que não está presente nas variáveis ambientais.

A extensão da área predita como possível presença das espécies florestais por classe de diâmetro oscilou entre aproximadamente 14,0 e 18,4 mil hectares, exceto para *A. macrocarpon* que variou em torno de 8,5 a 10,0 mil hectares (Tabela 2). Para todas as espécies, a área prevista como presença por classe diamétrica não apresentou diferença estatística significativa em relação à média ($p > 0,05$, teste t).

Tabela 2. Área predita como possível presença (ha) pelos modelos de distribuição de espécie por classe diamétrica nos planos de manejo florestal no leste do Acre, Brasil. a) *Astronium lecoitei*; b) *Hura crepitans*; c) *Castilla ulei*; d) *Amburana acreana*; e) *Apuleia leiocarpa*; f) *Clarisia racemosa*; g) *Aspidosperma macrocarpon*; h) *Ceiba pentandra*

Classe de DAP	40 + 60	60 + 80	80 + 100	≥ 100	Média
a	17.613,5	18.390,2	18.812,3	14.611,6	17.356,9
b	14.028,4	14.912,9	15.533,4	16.596,9	15.267,9
c	14.873,2	16.353,9	15.847,7	18.419,4	16.373,5
d	18.413,7	17.551,9	18.571,7	18.613,0	18.287,6
e	16.035,6	16.212,2	17.357,5	16.541,0	16.536,6
f	18.515,0	18.509,3	18.358,7	16.567,7	17.987,7
g	8.593,3	9.902,3	8.616,0	8.544,7	8.914,1
h	18.007,1	17.299,2	17.462,8	17.990,1	17.689,8

Em todos os modelos de *H. crepitans* os maiores valores de probabilidade estão localizados nas regiões com menores cotas altimétricas e mais próximas aos cursos de água, representando os requisitos ambientais da espécie.

Nos modelos de *A. lecoitei*, *C. racemosa* e *C. pentandra* foi verificado maior probabilidade de ocorrência das árvores com DAP ≥ 100 cm nas cotas mais elevadas do terreno (Figura 2).

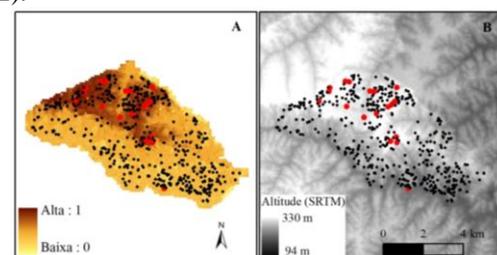


Figura 2. Modelos de distribuição de aroeira (*Astronium lecoitei*) para a classe de diâmetro à altura do peito (DAP) ≥ 100 cm (A) e gradiente de altitude (B), na Fazenda Uberaba, Acre, Brasil. Os pontos são ocorrências de indivíduos com DAP ≥ 100 cm (vermelho) e com DAP < 100 cm (preto).

Na modelagem para as espécies *A. lecoitei* e *C. racemosa*, os resultados mostraram que há uma tendência de diminuir a concordância entre as áreas preditas pelos modelos à medida que aumenta a classe diamétrica. Essa relação

mostra que os indivíduos ocupam diferentes locais no espaço geográfico em função da classe de diâmetro, particularmente aqueles com $DAP \geq 100$ cm, que pelos registros de ocorrência e os resultados da modelagem, estão mais agregados em locais com maior altitude, onde os modelos mostraram maior probabilidade de possível presença.

Dessa forma, a distribuição das árvores de maior diâmetro de *A. lecointei*, *C. racemosa* e *C. pentandra* pode ter sido influenciada pela variação química e de textura dos solos, disponibilidade de luz e/ou nas características adaptativas dessas espécies, ao longo de um gradiente topográfico ([18]; [19]; [20]).

4. CONCLUSÕES

A predição da distribuição de espécies florestais madeireiras pode ser feita por classe diamétrica, em pequena escala, com desempenho satisfatório.

A análise dos modelos permitiu distinguir geograficamente locais com maior probabilidade de ocorrência dos indivíduos da mesma espécie em função da classe diamétrica.

6. REFERÊNCIAS

- [1] CAYUELA, L.; GOLICHER, D. J.; NEWTON, A. C.; KOLB, M.; ALBURQUERQUE, F.S. de; ARETS, E.J.M. M.; ALKEMADE, J. R. M.; PÉREZ, A. M. "Species distribution modeling in the tropics: problems, potentialities, and the role of biological data for effective species conservation", *Tropical Conservation Science*, Menlo Park, v. 2, n. 3, p. 319-352, 2009.
- [2] PIEDALLU, C.; GÉGOUT, J.C.; LEBOURGEOIS, F.; SEYNAVE, I. "Soil aeration, water deficit, nitrogen availability, acidity and temperature all contribute to shaping tree species distribution in temperate forests", *Journal of Vegetation Science*, Malden, v.27, n. 2, p. 387-399, 2016.
- [3] KHATCHIKIAN, C.; SANGERMANO, F.; KENDELL, D.; LIVDAHL, T. "Evaluation of species distribution model algorithms for fine-scale container-breeding mosquito risk prediction", *Medical and veterinary entomology*, Oxford, v. 25, n. 3, p. 268-275, 2011.
- [4] GUIBAN, A.; THUILLER, W. "Predicting species distribution: offering more than simple habitat models", *Ecology letters*, Oxford, v. 8, n. 9, p. 993-1009, 2005.
- [5] SOARES-FILHO, B.S.; NEPSTAD, D. C.; CURRAN, L. M.; CERQUEIRA, G. C.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; VOLL, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. "Modelling conservation in the Amazon basin". *Nature*, London, v.440, n.7083, p. 520-523, 2006.
- [6] FEARNSIDE, P.M. "Deforestation in Brazilian Amazonia: History, rates and consequences", *Conservation Biology*, Malden, v. 19, n. 3, p. 680-688, 2005.
- [7] SCOLFORO, J.R.S. "Biometria florestal: Modelos de crescimento e produção florestal". UFLA/FAEPE, Lavras, 393 p. 2006.
- [8] FIGUEIREDO, E.O.; BRAZ, E.M.; D'OLIVEIRA, M.V.N. "Manejo de Precisão em Florestas Tropicais: Modelo Digital de Exploração Florestal". Rio Branco: Embrapa Acre, 2007, 183 p.
- [9] RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; MARTIN, V. S.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. J. "HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia", *Remote Sensing of Environment*, New York, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.
- [10] RYAN, T. P. "Estatística moderna para engenharia". Rio de Janeiro: Elsevier, 324 p. 2011.
- [11] STATGRAPHICS. "Statgraphics Centurion XV: user's guide". New York. 299 p. 2006.
- [12] PHILLIPS, S.J.; ANDERSON, R.P.; SCHAPIRE, R.E. "Maximum entropy modeling of species geographic distributions", *Ecological modelling*, Amsterdam, v. 190, n. 3, p. 231-259, 2006.
- [13] LOBO, J. M.; JIMÉNEZ-VALVERDE, A.; REAL, R. "AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models", *Global ecology and Biogeography*, Oxford, v. 17, n. 2, p. 145-151, 2008.
- [14] MEROW, C.; SMITH, M. J.; SILANDER, J. A. "A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter", *Ecography*, Copenhagen, 36, n. 10, p. 1058-1069, 2013.
- [15] FIGUEIREDO, S.M. de M.; VENTICINQUE, E.M.; FIGUEIREDO, E.O.; FERREIRA, E. J. L. "Predição da distribuição de espécies florestais usando variáveis topográficas e de índice de vegetação no leste do Acre, Brasil", *Acta Amazonica*, Manaus, v. 45, n. 2, p. 167-174, 2015.
- [16] CARDONA-PEÑA, V.; FUENTES, A.; CAYOLA, L. "Las moráceas de la región de Madidi, Bolivia", *Ecología en Bolivia*, La Paz, v. 40, n. 3, p. 212-264, 2005.
- [17] SOBERÓN, J.; PETERSON, A.T. "Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas", *Biodiversity Informatics*, Lawrence, v. 2, p. 1-10, 2005.
- [18] REES, M.; CONDIT, R.; CRAWLEY, M.; PACALA, S.; TILMAN, D. "Long-term studies of vegetation dynamics", *Science*, Washington, v. 293, n. 5530, p. 650-655, 2001.
- [19] TUOMISTO, H.; POULSEN, A. D., RUOKOLAINEN, K., MORAN, R. C., QUINTANA, C., CELI, J.; CAÑAS, G. "Linking floristic patterns with soil heterogeneity and satellite imagery in Ecuadorian Amazonia", *Ecological Applications*, Washington, v. 13, n. 2, p. 352-371, 2003.
- [20] VALENCIA, R.; FOSTER, R. B.; VILLA, G., CONDIT, R., SVENNING, J-C., Hernández, C., Romoleroux, K., Losos, E., Magård, E. and Balslev, H. Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: large forest plot in eastern Ecuador. *Journal of Ecology*, Oxford, v. 92, n. 2, p. 214-229, 2004.