



Universidade Federal do Amapá  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical  
Mestrado e Doutorado  
UNIFAP / EMBRAPA-AP / IEPA / CI-Brasil



FELIPE FELIX COSTA

OCORRÊNCIA E ESTRUTURA VERTICAL DE  
FLORESTAS COM CASTANHEIRAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

MACAPÁ, AP

2018

FELIPE FELIX COSTA

OCORRÊNCIA E ESTRUTURA VERTICAL DE  
FLORESTAS COM CASTANHEIRAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical (PPGBIO), sediado na Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Biodiversidade Tropical.

Orientador: Dr. Marcelino Carneiro Guedes

MACAPÁ, AP

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá

Elaborado por Mara Patrícia Corrêa Garcia CRB2/1248

621.3678

C837o Costa, Felipe Felix

Ocorrência e estrutura vertical de florestas com castanheiras na Amazônia brasileira / Felipe Felix Costa ; orientador, Marcelino Carneiro Guedes. – Macapá, 2018.  
88 f.

Dissertação (Mestrado) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical.

1. Castanheira-da-amazônia. 2. Floresta amazônica. 3. LiDAR terrestre. 4. Resex Cajari. I. Guedes, Marcelino Carneiro, orientador. II. Fundação Universidade Federal do Amapá. IV. Título.

**FELIPE FELIX COSTA**

OCORRÊNCIA E ESTRUTURA VERTICAL DE  
FLORESTAS COM CASTANHEIRAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA



---

Marcelino Carneiro Guedes

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Amapá)



---

Lucieta Guerreiro Martorano

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Amazônia Oriental)



---

Robson Borges de Lima

Universidade do Estado do Amapá (UEAP)

Aprovada em 03 de Abril de 2018, Macapá, AP, Brasil

*Dedico em memória ao meu  
pai, Luiz Antônio Costa, e à  
toda minha família, em  
especial a minha querida  
mãe, Lenize Felix.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por tudo.

Ao CNPq, pela bolsa durante o tempo em que estive nessa jornada, ao Programa de Pós-graduação em Biodiversidade Trpical (PPGBio), pela grande oportunidade em desfrutar de excelentes disciplinas, e pelo conhecimento adquirido na área de ecologia e biodiversidade. Aos excelentes professores, que foram determinantes na minha formação, pelos conhecimentos adquiridos e compartilhados. Aos membros das bancas de qualificação (Dr. José Toledo e Dra. Ana Euler) e banca da defesa (Dra. Lucieta Martorano e Dr. Robson Lima), que se dispuseram a contribuir para melhoria dessa dissertação.

Agradeço à Embrapa Amapá, pelas excelentes oportunidade de capacitações durante o período, que foram importantes para chegar aos resultados dessa pesquisa. Aos pesquisadores e Unidades da Embrapa que tiveram participação importante nessa pesquisa, por meio do projeto Mapcast (02.13.05.001.03), que financiou a coleta de dados com o LiDAR em vários estados da Amazônia. Agradeço também à Associação dos Trabalhadores Agroextrativistas da Resex Cajari (ASTEX-CA) e instituições parceiras do projeto Carbono Cajari, pelos dados de ocorrência das castanheiras na Resex Cajari. Aos que contribuíram para a submissão do artigo. Aos meus amigos de classe, com os quais tive oportunidades de fazer grandes amizades e dividir conhecimento: Felipe Todeschini, Aldine Baia, Ana Carolina, Elis Perrone, Raimundo Baia, Haroldo Jackson e Déborah Thomaz. Aos amigos que fiz na Embrapa.

Agradeço em especial ao meu orientador, Marcelino Guedes, o qual foi fundamental e me ajudou muito com o desenvolvimento desta pesquisa, estando sempre a disposição. A minha mãe, meus irmãos, tios e primos, que sempre me apoiaram nessa caminhada. Agradeço a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para Eu chegar até aqui.

**MUITO OBRIGADO!!**

*“Viver é enfrentar um problema atrás do outro.  
O modo como você o encara é que faz a diferença.”*

Benjamin Franklin

## PREFÁCIO

Esta dissertação foi organizada em 2 capítulos: 1) sobre a estrutura vertical de florestas com castanhais na Amazônia brasileira, 2) sobre a distribuição espacial da ocorrência da castanheira-da-amazônia no Estado do Amapá. O primeiro capítulo resultou na submissão de um artigo ao periódico *Biotropica* (Qualis B1 na área de biodiversidade), de acordo com as normas definidas pelo PPGBio. O artigo (**Vertical structure of stands of *Bertholletia excelsa* Bonpl. in the Brazilian Amazon, evaluated with terrestrial LiDAR technology**) está formatado segundo as normas da própria revista e a carta de submissão está no Anexo I. O Segundo capítulo, também está estruturado em formato de artigo, seguindo as normas do PPGBio, pois ainda não foi definido para qual revista será submetido.



## RESUMO

Costa, Felipe Felix. Ocorrência e estrutura vertical de florestas com castanheiras na Amazônia Brasileira. Macapá, 2018. Dissertação (Mestre em Biodiversidade Tropical) – Programa de Pós-graduação em Biodiversidade Tropical – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação - Universidade Federal do Amapá.

A castanheira é um símbolo da teoria sobre a importância do uso moderado e manejo dos recursos florestais pelas populações que habitaram e habitam a região amazônica para a conservação da sua biodiversidade. Os fatores que explicam a ocorrência das castanheiras e suas relações com a floresta matriz, ainda não estão completamente elucidados. Para ajudar a clarear essa questão, foi testada a hipótese que, dependendo da escala de análise, as florestas com castanheiras apresentam padrão próprio de estrutura vertical e que sua distribuição potencial pode ser modelada com o algoritmo de máxima entropia (MaxEnt). Uma das abordagens principais deste estudo, além do foco na própria castanheira, foi a validação de métodos avançados de coleta e análise de dados. O uso desses métodos, como LiDAR terrestre e modelagem MaxEnt, são fundamentais para execução dessas pesquisas. O objetivo do primeiro capítulo foi avaliar se florestas com castanheiras apresentam um padrão de estrutura vertical, verificando também se a abundância de castanheiras pode estar associada com atributos do dossel florestal. O estudo foi realizado em duas escalas: 1) regional, abrangendo florestas em quatro Estados da Amazônia Legal Brasileira; 2) local, em duas áreas com tipologias florestais diferentes no sul do Amapá. Utilizou-se LiDAR terrestre, para o levantamento dos dados. As florestas na Amazônia Oriental apresentaram maior estrutura da vegetação e as maiores castanheiras. Identificou-se que a floresta no Amazonas apresentou menor estrutura em relação aos demais estados. Na Amazônia existe um padrão de distribuição da densidade foliar ao longo do perfil vertical de florestas com castanheiras, tendo maior concentração nos estratos inferiores. O estrato (8 m a 18 m) apresentou maior proporção da densidade foliar em todas as florestas. Na escala local, para os dois ambientes testados, foram encontrados resultados inversos, com diferenças ao longo do perfil e semelhanças na estrutura de altura. Isso indica que a escala espacial de análise é importante e que variações no perfil vertical de florestas com castanheiras-da-amazônia são mais dependentes da tipologia florestal do que de largas variações geográficas. O objetivo do segundo capítulo foi testar se o algoritmo MaxEnt pode ser usado para modelar a ocorrência de castanheiras no Amapá, e se os resultados são diferenciados em função do método de seleção de variáveis topobioclimáticas e da escala

de análise. A modelagem foi realizada em duas escalas: 1) Estadual, Estado do Amapá; 2) Local, na Resex Cajari. Foram utilizados 3 métodos (PCA, painel de especialistas, pré-modelagem) para selecionar 9 variáveis, 3 de cada grupo: clima, solos e topográficas. Os resultados indicam que as variáveis selecionadas como mais importantes na modelagem variam entre os métodos e escalas. Porém, todos os modelos ajustados foram significativos. De maneira geral, a modelagem com MaxEnt foi eficaz para modelar as regiões com ocorrência real da castanheira-da-amazônia em ambas as escalas, provavelmente, pela elevada densidade de pontos de presença de castanheiras que entraram na modelagem. No entanto, ainda são necessárias novos testes e abordagens, que considerem maior rarefação dos pontos de ocorrência, informações de ausência e interações com fatores bióticos, para tentar detectar o padrão agregado de ocorrência da castanheira no sul do Amapá e melhorar a previsão de áreas potencialmente aptas para o estabelecimento das castanheiras. Os métodos utilizados nessa pesquisa, demonstraram ser eficientes para estudos da estrutura do perfil vertical de floresta amazônica e da modelagem da distribuição da castanheira no Amapá.

Palavras-chave: castanheira-da-amazônia; castanheira-do-pará; castanheira-do-brasil; LiDAR terrestre; modelagem MaxEnt; índice de área foliar; estratificação da floresta; floresta amazônica; Amapá; Resex Cajari.

## ABSTRACT

Costa, Felipe Felix. Occurrence and vertical structure of forests with Brazil nut trees in the Brazilian Amazon. Macapá, 2018. Dissertação (Mestre em Biodiversidade Tropical) – Programa de Pós-graduação em Biodiversidade Tropical – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação - Universidade Federal do Amapá.

The Brazil nut tree is a symbol of the theory about the importance of the moderate use and management of the forest resources by the populations that inhabited and inhabit the Amazon region, for the conservation of its biodiversity. The factors that explain the occurrence of Brazil nut tree and its relations with the mother forest, are not yet completely elucidated. To help clarify this issue, we tested the hypothesis that, depending on the scale of analysis, Brazil nut forests present a own vertical structure pattern and that their potential distribution can be modeled with the MaxEnt algorithm. One of the main approaches of this study, besides the focus on the Brazil nut tree itself, was the validation of advanced methods of data collection and analysis. The use of these methods, such as terrestrial LiDAR and MaxEnt modeling, are fundamental for carrying out this research. The objective of the first chapter was to evaluate if forests with Brazil nut present a vertical structure pattern, also verifying if the abundance of Brazil nut can be associated with attributes of the forest canopy. The study was carried out in two scales: 1) regional, covering forests in four states of the Brazilian Legal Amazon; 2), in two areas with different forest typologies in southern Amapá. Terrestrial LiDAR was used to collect the data. The forests in the Eastern Amazon presented greater structure of the vegetation and the larger Brazil nut trees. It was identified that the forest in Amazonas presented a smaller structure in relation to the other states. In the Amazon there is a pattern of distribution of leaf density along the vertical profile of forests with Brazil nut trees, having a higher concentration in the lower strata. The stratum (8 m to 18 m) had a higher proportion of leaf density in all forests. In the local scale, inverse results were found, with differences along the profile and similarities in height structure. This indicates that the spatial scale of analysis is important and that variations in the vertical profile of forests with Amazonian Brazil nut trees are more dependent on the forest typology than on wide geographic variations. The objective of the second chapter was to test if the MaxEnt algorithm can be used to model the occurrence of Brazil nuts in Amapá and whether the results are differentiated according to the selection method of topobioclimatic variables and the scale of analysis. The modeling was carried out in two scales: 1) State, State of Amapá; 2) Location in Resex Cajari. Three methods (PCA, expert

panel, pre-modeling) were used to select 9 variables, 3 of each group: climate, soil and topography. The results indicate that the variables selected as the most important in the modeling vary between methods and scales. However, all adjusted models were significant. In general, the modeling with MaxEnt was effective to model the regions with real occurrence of Brazil nut trees on both scales, probably due to the high density of presence points that entered in the modeling. However, new tests and approaches are still needed, which consider a greater rarefaction of occurrence points, absence information and interactions with biotic factors, to try to detect the aggregate pattern of occurrence in southern Amapá and to improve the prediction of potential areas suitable for the establishment of Brazil nut trees. The methods used in this research proved to be efficient for studies of the structure of the vertical profile of the Amazon forest and the modeling of the distribution of Brazil nut trees in Amapá.

**Keywords:** Amazonian nut tree; Pará nut tree; Brazil nut tree; Terrestrial LiDAR; MaxEnt modeling; leaf area index; forest stratification; Amazon rainforest; Amapá; Resex Cajari.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>14</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 CASTANHEIRA-DA-AMAZÔNIA ( <i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.) .....	16
<b>2.1.1 Extrativismo da Castanha .....</b>	<b>17</b>
2.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA CASTANHEIRA-DA-AMAZÔNIA.....	18
<b>2.2.1 Modelagem da distribuição de espécies com o algoritmo MaxEnt (Máxima Entropia) .....</b>	<b>21</b>
2.3 ESTRUTURA VERTICAL DE FLORESTAS NA AMAZÔNIA.....	22
<b>2.3.1 Avaliação da estrutura de florestas com o LiDAR portátil terrestre .....</b>	<b>24</b>
<b>3. HIPÓTESES .....</b>	<b>26</b>
<b>4. OBJETIVOS .....</b>	<b>27</b>
4.1 GERAL .....	27
4.2 ESPECÍFICOS .....	27
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>28</b>
<b>CAPÍTULO I - APLICAÇÃO DO LIDAR TERRESTRE NA AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA VERTICAL DE FLORESTAS AMAZÔNICAS COM CASTANHEIRAS (<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.).....</b>	<b>33</b>
<b>CAPÍTULO II – MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA CASTANHEIRA (<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.) NO AMAPÁ - AMAZÔNIA ORIENTAL .....</b>	<b>65</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE II.....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>88</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A região amazônica brasileira é composta por diferentes ecossistemas, os quais detêm elevada abundância e diversidade de recursos florestais (Ab'Saber 2002). Dentre essa alta diversidade, encontra-se a espécie castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), mais conhecida como castanheira-do-brasil ou castanheira-do-pará.

A castanheira apresenta ocorrência praticamente em toda a região pan-amazônica (Thomas et al. 2014), tendo como principais países envolvidos na produção da castanha, Brasil, Bolívia e Peru (Bayma et al. 2014). Na Amazônia brasileira, a castanheira está presente em todos os estados.

No Estado do Amapá, a ocorrência das castanheiras está concentrada na região sul, abrangendo os municípios de Vitória do Jarí, Laranjal do Jarí e Mazagão. Nessa região, diversas famílias locais desenvolvem a cultura do extrativismo da castanha em seus respectivos castanhais, como alternativa de renda e alimento para própria subsistência.

O aumento pelo interesse nas amêndoas de castanha, tornou a produção de castanha uma atividade rentável. A extração da semente é considerada uma das principais atividades extrativistas de produtos não madeireiros de interesse econômico da Amazônia (Silva et al. 2013). O setor econômico se expandiu e tem incentivado o aumento da produção da castanha, em virtude dos muitos benefícios que o seu consumo pode gerar. O comércio da castanha abrange escalas nacionais e internacionais, as amêndoas são conhecidas e consumidas em várias regiões do mundo (Souza, et al. 2008).

Embora a castanheira seja uma espécie alvo de muito estudos, muitas lacunas sobre o seu desenvolvimento ecológico e distribuição de ocorrência encontram-se sem respostas. Informações sobre como as florestas com castanhais se desenvolvem, quais relações que a mesma pode apresentar com as variáveis ambientais que melhor explicam a sua ocorrência, são alguns exemplos de questões sem respostas precisas até o momento.

Em relação à própria classificação ecológica das castanheiras, ainda há elevado desconhecimento e controvérsias, sobre, por exemplo, quais as tipologias florestais onde podem ser encontradas. Muitas pessoas ainda acreditam que a castanheira só ocorre em florestas primárias preservadas, enquanto que novos estudos (Paiva et al., 2011; Guedes et al., 2014) estão confirmando que a espécie é altamente heliófita, que pode colonizar áreas abertas, ocorrendo com elevada abundância em florestas secundárias e em áreas de transição com cerrado.

Atualmente, na região amazônica estão sendo elaborados e executados projetos objetivando compreender a distribuição das castanheiras e as interações com as tipologias florestais onde elas estão inseridas. Um desses projetos é o MAPCAST (02.13.05.001.03), liderado pela Embrapa Amazônia Oriental e executado em todos os estados da Amazônia, ao qual essa dissertação está vinculada. Tais estudos são de suma importância para o desenvolvimento sustentável da região, tendo em vista a lacuna de conhecimento sobre os fatores que podem influenciar na dinâmica de distribuição e abundância da espécie na Amazônia.

Além da importância econômica, a castanheira apresenta elevada importância ambiental, visto que se trata de uma espécie ícone da Amazônia, proporcionando relações ecológicas entre a flora e fauna na região. Também possibilita o desenvolvimento social, pois a renda obtida deste recurso natural, em muitas comunidades é a única fonte de recurso monetário das famílias que vivem do extrativismo da castanha. Além disso, as famílias de castanheiros têm forte relação cultural com a espécie e com a floresta.

O presente estudo analisou os padrões da distribuição de ocorrência da castanheira-da-amazônia associados aos fatores edafoclimáticos (clima, solo e topografia), em duas escalas diferentes: escala regional, abrangendo todo o Estado do Amapá e; escala local, limitando-se apenas à Reserva Extrativista do Rio Cajari (RESEX Cajari). Também foi avaliada a abundância da espécie associada a estrutura vertical da floresta, como altura das árvores e índice de área foliar, em florestas da Amazônia e ecossistemas com diferentes tipologias florestais. Neste estudo como um todo, uma das abordagens principais, além do foco na própria castanheira, foi a validação de métodos avançados de avaliação da estrutura e distribuição da castanheira, que permitem ampliar a escala de aplicação, reduzir custos e minimizar erros de medição em campo.

Com o propósito de elucidar melhor a estrutura e os objetivos desta pesquisa, a dissertação foi estruturada em dois capítulos. O primeiro avaliou a estrutura vertical e dossel da floresta com castanheiras, utilizando o LiDAR portátil terrestre. O segundo capítulo tratou da distribuição das castanheiras no Amapá, por meio de modelagem com o algoritmo MaxEnt. A seguir, é apresentada uma revisão geral de literatura, que atende as necessidades de embasamento teórico dos dois capítulos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CASTANHEIRA-DA-AMAZÔNIA (*Bertholletia excelsa* Bonpl.)

A espécie castanheira-da-amazônia pertence à família Lecythidaceae e gênero *Bertholletia*. No século XIX, ano de 1874, havia suspeita da existência de duas espécies de castanheiras, a *Bertholletia excelsa* H. B. e K., encontrada no Sul da Venezuela e a *B. nobilis* Miers, na Amazônia, mas não houve confirmação quanto a ocorrência de duas espécies (Neves 1938, Mori and Prance 1990).

A família Lecythidaceae tem elevada importância ecológica em habitats de planícies não inundáveis, ou seja, em regiões de terra firme. A maioria das espécies dessa família não apresenta bom desenvolvimento em ambientes secundários, principalmente em área que sofreram queimadas. Porém, em algumas situações, a castanheira tem capacidade para brotar após vários distúrbios naturais (Mori 1990). Trabalhos mais recentes têm demonstrado que, além da elevada capacidade de rebrota, inclusive em áreas queimadas para agricultura itinerante, a castanheira também apresenta maior abundância de indivíduos regenerantes e melhor desenvolvimento nesses ambientes secundários de capoeiras (Paiva et al. 2011; Guedes et al. 2014).

A castanheira é uma espécie florestal endêmica da região amazônica. A espécie está inserida entre as maiores espécies arbóreas da Amazônia, podendo, em alguns casos, passar de 50 m de altura e atingir 3 m de diâmetro (Ducke and Black 1954, Salomão et al. 2006).

A *B. excelsa* ocorre nos países da América do Sul que abrangem a região da floresta tropical conhecida como pan-Amazônia, como Venezuela, Colômbia, Perú, Bolívia, Guyana, Guyana Francesa e Suriname. No Brasil, a ocorrência de castanheira abrange os estados do Pará, Acre, Rondônia, Amazonas, Roraima, Mato Grosso, Maranhão e Amapá (Neves 1938, Müller et al. 1980, Moritz 1984).

Normalmente, as castanheiras ocorrem em agrupamento, castanhal, como as comunidades locais costumam denominar, e a produção de frutos se inicia entre 25 a 30 anos de idade (Neves 1938). A frutificação das amêndoas de castanha acontece anualmente e o amadurecimento dos frutos dura aproximadamente 14 meses (Moritz 1984). A queda dos frutos ocorre entre os meses de dezembro a maio (Carvalho 1980).

Em relação ao seu desenvolvimento, as castanheiras podem apresentar padrões de crescimento do diâmetro e altura diferentes em razão de distintas condições ambientais (Schongart 2015). Em um estudo realizado no Estado do Pará, observou-se que em plantios



para recuperação de área degradada, a castanheira evidenciou bom desenvolvimento (Salomão 2006).

A ocorrência das castanheiras demonstra que seu habitat preferencial está relacionado com solos não alagados em áreas de terra firme. Por ser uma espécie nativa da região amazônica, a castanheira necessita de clima quente e úmido, bem como de luz para se desenvolver (Neves 1938, Müller et al. 1980). Por conta do desenvolvimento da maioria das espécies da família Lecythidaceae ocorrerem preferencialmente em habitats de terra firme e de não se desenvolverem satisfatoriamente em outros ambientes, faz-se necessário a manutenção de áreas extensas com essas características para conservação das castanheiras (Mori 1990).

### **2.1.1 Extrativismo da Castanha**

A coleta dos frutos da castanha começou a se intensificar com a baixa da exploração de outro recurso florestal da Amazônia, o látex das seringueiras (Müller et al. 1980). O consumo da amêndoa era utilizada em pequenas escalas pelos povos indígenas e animais. A partir da década de 50, com a implantação do sistema de beneficiamento, a castanha passou a ser um dos principais produtos florestais não madeireiro da região a ser exportado e consumido em diversos lugares do mundo (Ducke and Black 1954, Müller et al. 1980).

A coleta e exportação da castanha foi fortemente ameaçada nas décadas passadas devido a prática de atividades como a pecuária de larga escala na Amazônia. Outra questão foi a construção de represas nas vias fluviais onde ocorria grande parte do transporte da carga das castanhas coletadas nos castanhais de maior produção localizados no Estado do Pará (Moritz 1984).

Na região de Marabá (PA), a extração da castanha era a principal fonte de renda para as comunidades locais até os anos 70, sendo uma produção elevada quando comparadas às outras regiões que realizavam a mesma atividade na Amazônia. Contudo, durante a década de 80, com o avanço da ocupação de terra pelas grandes empresas da agropecuária, as quais substituíram as áreas florestais por lavouras e pastagens, a atividade de extração do produto vegetal decaiu significativamente (Moritz 1984).

A produção da castanha-da-amazônia ainda depende basicamente do extrativismo em florestas nativas. As castanheiras plantadas não tem tido muito sucesso na produção de castanhas, quando comparada às outras espécies que produzem outros produtos não madeireiro (Mori and Prance 1990).

A castanheira-da-amazônia tem grande importância ambiental e socioeconômica na região amazônica. Além de ser uma das espécies de grande porte que contribui para as interações e diversidade biológicas do habitat em que está inserida, é uma das principais fontes de renda das comunidades locais, as quais tem o hábito de praticar o extrativismo da semente (Salomão et al. 2006).

O Estado do Amapá tem forte potencial para a exploração e produção da semente da castanha. No ano de 1990 foi criada no Estado, a Reserva Extrativista do Rio do Cajari (Resex Cajari). A reserva pertence a categoria de uso sustentável entre as categorias de unidades de conservação (UCs) do Brasil. O principal motivo para a criação da unidade de conservação foi em relação à questão ambiental, pois busca conservar áreas com maior ocorrência da castanheira no Estado, bem como de outras espécies florestais de interesse. E ao mesmo tempo a questão socioeconômica, haja vista que busca incentivar a prática do uso sustentável da extração de recursos florestais madeireiros e não madeireiros, como extração da semente da castanha (Brasil 2009).

A extração da castanha e do açaí são os principais produtos não madeireiro das comunidades extrativista na região amazônica. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2015 a produção da castanha na Amazônia Brasileira foi de 40.643 toneladas e o Estado do Amapá 472 toneladas (Brasil 2015a).

No Amapá, o extrativismo da castanha era fonte de renda para mais de 600 famílias (Filocreão 2007). Nas últimas décadas a castanha tem sido mais valorizada. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), o preço mínimo da compra de castanha com casca *in natura* em 2015 na região Norte e Estado do Mato Grosso foi fixado em R\$ 1,18 o kg, e o preço no mercado internacional, em 2014, teve média de US\$ 8,89 o kg (Brasil 2015 b).

## 2.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA CASTANHEIRA-DA-AMAZÔNIA

A distribuição espacial de espécies florestais pode ser determinada e representada por meio de padrões identificados nas regiões de estudos, principalmente, em relação à frequência de ocorrência da espécie durante os processo de coleta e amostragem em determinada área (Jankauskis 1990).

Normalmente, as espécies florestais apresentam distribuição espacial agrupada, devido às suas condições de reprodução, distúrbios na região ou fatores ambientais. No Pará, a castanheira também ocorre de maneira agregada, ou seja, em agrupamentos de indivíduos, conhecidos como castanhais (Salomão 2009).

A distribuição de castanheira está associada a diversos fatores ambientais. Entre as variáveis naturais que podem influenciar e favorecer o aumento da população de castanheiras estão as clareiras, ocasionadas muitas das vezes por queda de árvores ou galhos, ampliando a presença de luz e as espécies de faunas, principalmente os pequenos roedores como a cotia (*Dasyprocta aguti* L.), que fazem a função de agente dispersor das sementes. Por outro lado, as variáveis não naturais que podem exercer a função de dispersar as sementes, decorrem da ação antrópica por meio das populações locais que realizam a prática de manejo florestal (Salomão 2009).

A cotia vive em uma área de aproximadamente 5 hectares (Silvius and Fragoso 2003). Embora seja uma área relativamente grande para o porte do animal, para a dispersão de sementes da castanheira não é considerada expressiva. Sendo assim, apesar de ser um dos principais dispersores da castanha, talvez a presença de cotias não seja suficiente para explicar a dispersão da castanheira por toda a Amazônia. Jorge and Peres (2005) apontam em seu estudo que a cotia apresenta área de vida maior em regiões com ausência de castanheira adultas.

A dispersão das sementes realizada pela cotia pode depender da disponibilidade de ouriços encontrados, pois quando há a escassez de sementes, a cotia apenas se alimenta, não realizando a função de dispersão (Forget 1997). Com a baixa quantidade de sementes, a cotia também pode preda as plântulas, desenterrando as sementes (Peres and Baidier 1997), causando a diminuição da taxa de regeneração da castanheira. Silvius and Fragoso (2003) apontam que em estações com baixa produtividade de sementes, a cotia faz reserva de alimentos, enterrando as sementes para depois consumi-las.

Em um estudo desenvolvido na Amazônia brasileira, peruana e boliviana, comparando populações de castanheiras, as regiões onde acontecem intensivas coletas das sementes das castanhas, têm demonstrado baixa população de indivíduos de castanheiras jovens. Enquanto nas regiões que há pouca ou nenhuma coleta, mostram que a população de castanheiras jovens é maior. Isso pode estar relacionado ao fato das mudas não se desenvolverem devido aos efeitos de sobreamento que as espécies adultas provocam e às degradações feitas pelos próprios castanheiros (Peres et al. 2003). Porém, estudos mais recentes evidenciaram resultados diferentes. Guedes et al. (2014) verificaram que abundância de castanheiras com (DAP > 10 cm) em área de agricultura itinerante é duas vezes superior à área de floresta. Scoles et al. (2011) constataram que a *B. excelsa* apresenta melhor desenvolvimento de mudas em áreas onde é praticada a agricultura de corte e queima.

A abundância e diversidade de plantas na floresta, o crescimento e a mortalidade de mudas e, a estrutura e composição da flora, estão relacionado com a intensidade da radiação

solar, bem como com a qualidade desta luminosidade que atinge as florestas tropicais. Em alguns casos, a luz pode estabelecer padrões de distribuições de espécies florestais (Engelbrecht and Herz 2001, Jardim et al. 2007)

O fator abiótico luminosidade é muito importante para o desenvolvimento de castanheiras. Por isso, há ausência de indivíduos da espécie com diâmetros menores, nas regiões onde há presença de castanheiras adultas e floresta densa, devido ao efeito do sombreamento que as árvores adultas de grande porte causam nas mudas após germinação das amêndoas, implicando no não desenvolvimento da mesma. Isso acontece principalmente em castanhais com grande abundância de castanheiras adultas. Sendo assim, só será possível ocorrer o desenvolvimento das mudas quando houver aberturas de clareiras na floresta, o que provocará a incidência de luz na área (Salomão 2009).

Da mesma forma, Albuquerque et al. (2015) verificaram em seu experimento, no qual testaram diferentes níveis de sombreamento em mudas de castanheiras, que o desenvolvimento das mudas foi melhor com níveis menores de sombreamento, ou seja, aquelas que recebem mais luminosidade. Para que as mudas de castanheiras consigam se desenvolver e atingir o dossel da floresta, Myers et al. (2000) apontam que são necessárias clareiras grandes, maiores que 95 m<sup>2</sup>, para a entrada de quantidade adequada de energia radiante para seu crescimento.

Um pesquisa realizada no platô do Almeidas, Amazônia setentrional, a qual relacionou a altura total e o diâmetro (DAP) das árvores mensuradas, mostrou que independentemente do tamanho do diâmetro, a maioria dos indivíduos estão entre 30 a 40 metros de alturas. O desenvolvimento de castanheiras em ambiente de floresta segue o mesmo modelo de crescimento que a maioria das espécies florestais, visto que o diâmetro das castanheiras não apresentou muita relação com a altura. Isso ocorre devido o dossel das floresta dificultar a penetração de luminosidade, onde há ocorrência de castanheiras, fazendo com que as espécies jovens dediquem seus anos iniciais ao desenvolvimento mais intenso quanto à altura, objetivando chegar ao dossel em que estão as copas das árvores de maior porte, para depois se dedicarem ao desenvolvimento dos troncos (Salomão 2009).

A precipitação pluvial é outra variável importante para o desenvolvimento das castanheiras. Pois como se trata de uma espécie de grande porte, com vasto sistema radicular e copas com diâmetros grandes, a castanheira tem alta capacidade de armazenar e transpirar água. Um estudo realizado na Amazônia ocidental demonstrou que o fluxo de água tende a ser mais elevado no caule de castanheiras com maior diâmetro (Schroth et al. 1999).

Alguns estudos buscam compreender as características do ponto de vista econômico das castanheiras. Para isso, é importante conhecer as regiões geográficas, a distribuição da

espécie e as variações intraespecíficas. Assim como, ter informações da produção das castanhas, da qualidade, da polinização e da dispersão do fruto.

Na região do platô Almeidas foi encontrados vários sítios arqueológicos, nos quais foi possível verificar a existências de aldeias com grande quantidade de material de terra preta. As aldeias parecem evidenciar através de vestígios antrópicos algumas características de populações permanentes naquela região, podendo ter relação com manejo antrópico de castanheiras e sua distribuição geográfica (Salomão 2009, Guedes et al. 2014).

### **2.2.1 Modelagem da distribuição de espécies com o algoritmo MaxEnt (Máxima Entropia)**

Existem diversas maneiras para estudar a distribuição de espécies florestais. Uma delas é a modelagem potencial, a qual possibilita realizar predições de áreas prováveis de ocorrência de determinada espécie modelada. Esses modelos de distribuição geográfica têm sido muito utilizados, em razão dos métodos estatísticos estarem cada vez mais elaborados (Marco Jr. and Siqueira 2009). Além disso, as dificuldades para coleta de dados em campo em escalas mais ampliadas, como em nível de Amazônia, fazem com que cada vez mais sejam utilizados os modelos estatísticos para predição da ocorrência e distribuição das espécies.

Um dos modelos estatísticos que tem sido muito aplicado em estudos ecológicos para compreender e determinar as áreas potenciais de ocorrência da espécie modelada, é o MaxEnt (Máxima Entropia). Esse algoritmo prediz a distribuição de probabilidade mais próxima em relação à distribuição uniforme, desde que os valores das variáveis utilizadas sejam semelhantes às observadas em campo (Marco Jr. and Siqueira, 2009).

As principais vantagens para escolha da utilização do modelo MaxEnt é o fato de que o modelo necessita somente de dados de presença. As variáveis utilizadas são contínuas, permitindo adequabilidade relativa em intervalo de 0 a 100 e definição de probabilidades de ocorrência. Os modelos matemáticos do MaxEnt são concisos, de fácil interpretação (Phillips et al. 2006).

A seleção de variáveis e definição das condições de contorno do modelo são essenciais para uma boa modelagem. Ultimamente, muitos métodos de modelagem de distribuição de espécies têm considerado somente dados de presença (ocorrência de espécies), devido a maioria das bases que contém esses bancos de dados não ter informações de ausência. Tais métodos que consideram somente presença, requerem informações de variáveis de previsão, como: topográficas, climáticas, edáficas, biogeográficas e de sensoriamento remoto (Phillips and Dudik 2008).

Em um estudo comparando diversos modelos, o MaxEnt foi o que apresentou maior acurácia. Segundo a autora, o modelo tende sempre a apresentar acurácia significativa, pois seu procedimento é limitante em relação à amplitude de distribuição (Elith et al. 2006).

Dentre as diferentes extensões que o modelo MaxEnt apresenta, a mais aplicada para estudos de modelos de distribuição é o logístico, o qual foi elaborado para facilitar as análises de distribuição de espécies, modelando a presença da espécie condicionada a variáveis ambientais (Phillips and Dudik 2008).

### 2.3 ESTRUTURA VERTICAL DE FLORESTAS NA AMAZÔNIA

Na Amazônia, os fatores abióticos são importantes para a manutenção da floresta, tendo em vista que as condições de clima influenciam diretamente a quantidade de material orgânico produzido, o processo de decomposição e a ciclagem de nutrientes (Stark and Jordan 1978).

Entre os principais fatores abióticos que interagem com a floresta está o clima, o qual desempenha diversas e importantes funções ecológicas no meio. As florestas são altamente influenciadas, positiva ou negativamente, pelas condições climáticas. As principais variáveis do clima que podem influenciar na vegetação são: temperatura, umidade relativa do ar, pluviosidade e iluminação, e em alguns casos, o vento também pode ter uma ação importante para a floresta (Dajoz 2005). Outros fatores que influenciam são a idade do substrato da vegetação, fertilidade do solo, composição de espécies florestais e o relevo topográfico da região (Asner 2009).

Para entender a dinâmica de manutenção e desenvolvimento da floresta, é necessário compreender primeiramente como os fatores abióticos interferem nas espécies arbóreas da Amazônia. A luz proveniente da radiação solar, é essencial na produção primária líquida e na capacidade de produção das árvores. Havendo abertura no dossel, a incidência luminosa no interior da floresta irá colaborar para a regeneração e colonização das espécies emergentes que estão sombreadas (Begon et al. 2007).

Na região amazônica, as principais causas de formação de clareiras estão relacionadas a quedas de árvores por origens naturais, como ação do vento, estruturas das árvores, características dos solos e entre outros (Vandermeer and Bongers 1996), ou através da ação antrópica, como o desmatamento e exploração madeireira (Ferreira, Almeida and Amaral 2005). A clareira é considerada como principal mecanismo de manutenção da diversidade de árvores e arbustos em florestas tropicais (Tabarelli and Montovani 1999). Os fatores climáticos,

por estarem fortemente relacionados com a capacidade de produção primária da floresta, interagem diretamente com o dossel florestal.

O dossel florestal, normalmente é composto por três estratos: o sub-dossel, o dossel e a camada emergente (Montgomery and Chazdon 2001). As espécies que ocupam a parte superior estão sujeitas a maior insolação, e portanto, seus padrões de desenvolvimento são distintos dos componentes que estão nos estratos inferiores da floresta (Marques and Oliveira 2004), como as plântulas de espécies emergentes, visto que as espécies desse grupo necessitam de mais luminosidade que as outras espécies para se desenvolverem.

A altura do dossel e das árvores dominantes é um fator que pode ser associado à pujança da floresta e à capacidade de suporte dos sítios (clima e solo). A forma mais comum e utilizada para avaliar a qualidade de sítio é verificando a altura dominante (H) da vegetação por meio da média das 100 árvores com maior diâmetro por hectare, gerando um índice de sítio (Oliveira 2011), muito aplicado nas ciências florestais. Entretanto, é importante ressaltar que a obtenção de informações precisas da altura das árvores da Amazônia é difícil, uma vez que o dossel das florestas tropicais apresentam árvores superiores a 50 m de altura.

Os atributos da estrutura da floresta podem fornecer informações importantes da vegetação, como a biomassa disponível, que é fundamental para verificar e quantificar o estoque de carbono. Essa informação é essencial para o controle e mensuração das medidas de redução das emissões por ações antrópicas ou naturais, tais como o desmatamento e a degradação da floresta (Bispo 2016). A estrutura também pode ser um excelente indicador para avaliar o funcionamento da vegetação e biodiversidade da floresta (Gao et al. 2014).

Kohyama (1991) diz que a estrutura do perfil vertical da floresta é um elemento importante para análise de estudos de processos ecológicos, quantificação de biomassa e coexistência de outras espécies.

Do ponto de vista ecológico e de estrutura da vegetação, o dossel da floresta é importante na capacidade de regeneração das árvores, principalmente as emergentes e de grande porte. Além disso, pode desempenhar papel relevante na proteção do solo, pois as copas atuam como barreira física durante os períodos de chuvas, evitando erosão do solo (Lowman and Wittman 1996). Essa função é importante quando se trata dos solos da Amazônia, já que os mesmos são de baixa fertilidade (Stark and Jordan 1978).

De acordo Song et al. (1997), as formas de estrutura e abertura do dossel das florestas são associadas à densidade de indivíduos, localização das árvores, composição de espécies e tamanho e forma das copas. A densidade de árvores é o principal fator que afeta a cobertura das copas, tendo em vista que, quanto maior a quantidade de árvores adultas, mais denso será o

dossel. Deste modo, torna-se de grande valia compreender como a estrutura pode influenciar nos processos ecológicos da floresta, pois permitirá um melhor entendimento das estruturas dos diferentes ecossistemas (Suganuma et al. 2008).

Estudos ecológicos envolvendo dossel florestal consideram como variável importante para tais pesquisas o Índice de Área Foliar (IAF). Esse índice depende da composição das espécies presentes e das condições climáticas na região, sendo muito importante para avaliação da estrutura vegetal, pois informa determinada característica da vegetação em relação a floresta e a estação (Caruzzo and Rocha, 2000).

As variáveis geomorfométricas do relevo como a elevação, declividade e orientação do declive são outras que podem afetar significativamente a estrutura da floresta (Velázquez-Rosas et al. 2002). A elevação está relacionada com o microclima, enquanto a declividade e orientação do declive determinam a intensidade e direção dos fluxos da matéria, permitindo analisar se afeta os regimes de água e energia (Bispo et al. 2016).

É necessário considerar para uma abordagem mais completa, informações dos planos e perfis do terreno (Shary and Smirnov 2013). Visto que essas variáveis estão relacionadas com fluxo da água, o que por sua vez pode afetar a vegetação indiretamente. Apesar de as características geomorfométricas afetarem a distribuição de espécies florestais, poucos estudos foram realizados para verificar realmente os efeitos que essas variáveis causam na estrutura da vegetação (Bispo et al. 2012, Jarvis and Mulligan 2009).

### **2.3.1 Avaliação da estrutura de florestas com o LiDAR portátil terrestre**

Para a avaliação de estrutura da floresta existem diferentes métodos que permitem mensuração da altura e a cobertura foliar da vegetação. Um desses métodos tem como base o uso de radiação de baixa frequência, por meio do LiDAR portátil terrestre (Giongo et al. 2010, Parker et al. 2004).

O uso de sensoriamento remoto nas aplicações para avaliações da estrutura da vegetação está diretamente relacionado à carência de métodos eficientes para avaliação da estrutura de florestas em escalas compatíveis. A tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging), tem sido aplicada para estudos de estrutura da floresta, adquirindo informações de altura das árvores e densidade de área foliar (Lefsky et al. 2002).

O sistema de funcionamento do LiDAR emite uma nuvem de pulsos em direção ao dossel que retorna com a informação a que distância está o alvo, tendo uma grande precisão. É considerado sensor ativo, pois produz a sua própria energia durante o processo. Essa tecnologia



proporciona estimativas de alta precisão da altura da vegetação, cobertura e estrutura do dossel, área foliar e biomassa acima do solo (Lefsky et al. 2002, D’Oliveira et al. 2012).

Parker et al. (2004) avaliaram o potencial do LiDAR em estudos da estrutura do dossel. Em tal trabalho, comparando os resultados do sensor LiDAR com de outros métodos, verificou-se que a tecnologia LiDAR portátil terrestre apresenta grande potencial na obtenção de informações para estudos florestais. Pois, além da possibilidade de ser utilizado em diferentes escalas espaciais, desde estudo da copa de uma única árvore até quilômetros de extensão da floresta, também pode ser aplicado para estudos de avaliação do crescimento da vegetação em escalas temporais.

Alguns estudos tem utilizado a tecnologia LiDAR para avaliação da altura da vegetação e densidade de área foliar do dossel da floresta. Sumida et al. (2009) estimou um índice de área foliar e a densidade de área foliar por diferentes níveis de altura com uso de informações obtidas no LiDAR.

Diversos estudos realizados com o LiDAR portátil usaram o método desenvolvido por MacArthur and Horn (1969) para mensuração da densidade de área foliar (veja Parker et al. 2004, Sumida et al. 2009, Stark et al. 2012). A densidade da área foliar do dossel é calculado com base na altura, nos retornos de pulsos refletido pelo objeto atingido e na quantidade total de pulso emitido.

A equação para calcular a densidade de área foliar (DAF) elaborada por MacArthur and Horn (1969), é a seguinte:

$$DAF_{i,j} = \ln(\text{retorno/pulsos totais}) \times \Delta h \quad (1)$$

Onde:

*DAF*: densidade de área foliar de um “voxel” de 1m de altura x 2m de comprimento;

*i*: “voxel” no seu sentido vertical: 1-2 m, 2-3 m, 3-4m, etc;

*j*: mesmo “voxel” no seu sentido horizontal, em intervalos de 0-2m, 2-4m, 4-6m, etc;

*retornos*: número de retornos obtidos para aquele “voxel”;

*pulsos totais*: número de pulsos que entraram na base do “voxel” (ou seja, não foram refletidos pelos voxels inferiores)

$\Delta h$ : altura do “voxel” ( $\Delta h = 1m$ ).

### 3. HIPÓTESES

- Florestas com castanheiras na Amazônia brasileira apresentam padrão de estrutura ao longo do perfil vertical da vegetação, mas isso não se aplica em tipologias florestais diferentes (florestas e transição savana/floresta).
- A distribuição potencial da ocorrência da castanheira pode ser modelada com o algoritmo MaxEnt, independente da escala de análise.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 GERAL

Analisar a estrutura vertical de florestas com castanheiras em quatro Estados da Amazônia brasileira e testar o algoritmo MaxEnt para modelar a ocorrência da espécie no Estado do Amapá.

### 4.2 ESPECÍFICOS

- Verificar se sítios florestais com castanheiras em diferentes estados da Amazônia (escala regional) apresentam um mesmo padrão de altura e perfil vertical e se esse padrão também ocorre em diferentes tipologias florestais em um mesmo Estado (escala local);
- Avaliar se fatores edafoclimáticos utilizados na modelagem MaxEnt podem explicar a distribuição de castanheiras no Amapá e na Resex Cajari.
- Analisar se as respostas aos objetivos anteriores são dependentes da escala de análise.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab'Saber, A. N. 2002. Bases para o estudo dos ecossistemas da Amazônia brasileira. *Estud. av.* **16**:30p..
- Albuquerque, T. C. S., T. C. Evangelista, and A. A. R. A. Neto. 2015. Níveis de sombreamento no crescimento de mudas de castanheira do Brasil. *Revista Agro@mbiente* **9**(4): 440-445.
- Asner, G. P., R. F. Hughes, T. A. Varga, D. E. Knapp, and T. Kennedy-Bowdoin. 2009. Environmental and Biotic Controls over Aboveground Biomass Throughout a Tropical Rain Forest. *Ecosystems* **12**: 261-278.
- Bayma M. M. A., F. W. Malavazi, C. P. de Sá, F. L. Fonseca, E. P. Andrade, and L. H. O. Wadt. 2014. Aspectos da cadeia produtiva da castanha-do-brasil no estado do Acre, Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* **9**: 417-426.
- Begon, M., C. R. Townsend, and J. L. Harper. 2007. *Ecologia de Indivíduos e Ecossistemas*. Artmed, Porto Alegre, SC, Brasil.
- Bispo P. C., J. R. Santos, M. M. Valeriano, P. M. L. A. Graça, H. Balzter, H. França, P. C. Bispo. 2016. Predictive Models of Primary Tropical Forest Structure from Geomorphometric Variables Based on SRTM in the Tapajós Region, Brazilian Amazon. *PLoS ONE* **11**:1-13.
- Bispo P. C., M. M. Valeriano, and J. R. Santos. 2012. Effects of the geomorphometric characteristics of the local terrain on floristic composition in the central Brazilian Amazon. *Austral Ecology* **34**:491–499.
- Brasil. 1990. Decreto Nº 99.145 de 12 de Março de 1990:1–2.
- Brasil (b), Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). 2015. Proposta de preços mínimos (safra 2015/2016). Brasília. **2**: 1-159.
- Brasil, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2015. Produção da extração vegetal e da silvicultura. Rio de Janeiro. v. 30.
- Brasil, Ministério de Meio Ambiente (MMA). Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). 2009. Serie: Legislação ICMBio - Sistema Nacional de Unidades de Conservação. v. 1.
- Carvalho, J. O. P. 1980. Fenologia de espécies florestais de potencial econômico que ocorrem na Floresta Nacional do Tapajós. Belém. EMBRAPA-CPATU. Documentos **20**:15p.
- Caruzzo, A., and H. R., Rocha. 2000. Estimativa do índice de área foliar (IAF) em regiões de pastagem e floresta com um método indireto (gap fraction) durante o experimento AMC/LBA. In: *Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Editora, Rio de Janeiro. 2478-2485.
- Dajoz, R. 2005. *Princípios de Ecologia Geral*. Artmed, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- D'Oliveira, M.V.N., S. E. Reutebuch, R. J. Mcgaughey, and H. E. Andersen. 2012. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, **124**: 479-491.
- Ducke, A., and G. A. Black. 1954. Notas sobre a fitogeografia da Amazônia Brasileira. *Boletim Técnico do Instituto Agrônômico do Norte* **29**: 1-62.
- Elith, J., C. H. Graham, R. P. Anderson, M. Dudik, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huettmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, L. G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. M. Overton, A. T. Peterson, S. J. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberon, S. Williams, M. S. Wisz, and N. E. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography* **29**: 129-151.
- Engelbrecht, B. M. J., and H. M. Herz. 2001. Evaluation of Different Methods to Estimate Understory Light Conditions in Tropical Forests. *Journal of Tropical Ecology* **17**: 207-224.
- Ferreira, L. V., S. S. Almeida, and D. D. Amaral. 2005. Riqueza e composição de espécies da floresta de Igapó e Várzea da Estação Científica Ferreira Penna: subsídios para o plano de manejo da Floresta Nacional de Caxiuana. *Pesquisas Botânicas*. São Leopoldo: Instituto Anchieta de Pesquisas: 103-116.
- Filocreão, Antonio Sergio Monteiro. 2007. Agroextrativismo e capitalismo na Amazônia. As transformações recentes no agroextrativismo do sul do Amapá. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Pará. Belém. 442p.
- Forget, P. M. 1997. Effect of Microhabitat on Seed Fate and Seedling Performance in Two Rodent- Dispersed Tree Species in Rain Forest in French Guiana. *Journal of Ecology* **85**: 693-703.
- Gao T., M Hedblom, T. Emilsson, and A. B. Nielsen. 2014. The role of forest stand structure as biodiversity indicator. *Forest Ecology and Management* **330**: 82-93.
- Giongo, M., H. S., koehler, A., Machado, F. F. Kirchner, and M. Marchetti. 2010. LiDAR: princípios e aplicações florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira* **30**: 231-244.
- Guedes, M. C., E. de S. Neves, E. G. Rodrigues, P. Paiva, J. B. P. C. Costa, M. F. Freitas, and L. M. de Lemos. 2014. “Castanha na roça”: expansão da produção e renovação dos castanhais em áreas de agricultura itinerante no Amapá, Brasil “Castanha na roça”: increasing yields and renewing Brazil nut stands through shifting cultivation in Amapá State , Brazil. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.* **419**: 381-398.
- Kohyama, T. 1991. Simulating stationary size distribution of trees in rain forests. *Annals of Botany* **68**: 173-180.
- Jankauskis, J. 1990. Avaliação de técnicas de manejo florestal. Belém: SUDAM, 143 p.
- Jardim, F. C. S., D. R. Serrão, and T. C. Nemer. 2007. Efeito de Diferentes Tamanhos de Clareiras sobre o Crescimento e a Mortalidade de Espécies Arbóreas em Moju-PA. *Acta Amazonica* **37**: 36-48.

- Jarvis A., M. Mulligan. 2009. Terrain Controls on Tree Diversity and Structure in Tropical Forests: An Example in Two Neotropical Montane and Lowland Forests. VDM Verlag, London.
- Jorge M. S. P., and C. A. Peres. 2005. Population Density and Home Range Size of Red-Rumped Agoutis (*Dasyprocta leporina*) Within and Outside a Natural Brazil Nut Stand in Southeastern Amazonia. *Biotropica* **37**: 317-321.
- Lefsky, M. A., W. B. Cohen, G. G. Parker, and D. K. Harding. 2002. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience* **52**: 19-30.
- Lowman, M. D., and P. K. Wittman. 1996. Forest Canopies: Methods, Hypotheses and Future directions. *Rev. Ecological. System* **27**: 55-81.
- MacArthur, R. H., and J. W. Horn. 1969. Foliage profiles by vertical measurements. *Ecology* **50**: 802–804.
- Marco Jr, P., and M. F. de Siqueira. 2009. Como determinar a distribuição potencial de espécies sob uma abordagem conservacionista?. *Megadiversidade* **5**: 1-2.
- Marques, M. C. M., and P. E. A. M. Oliveira. 2004. Fenologia de espécies do dossel e do sub-bosque de duas Florestas de Restinga na Ilha do Mel, sul do Brasil. *Revista Brasil. Bot.* **27**: 713-723.
- Montgomery, R. A., and R. L. Chazdon. 2001. Forest structure, canopy architecture, and light transmittance in tropical wet forests. *Ecology* **82**: 2707-2718.
- Mori, S. 1990. Diversificação e conservação das Lecythidaceae neotropicais. *Acta Botanica Brasilica* **4**: 45–68.
- Mori, S. A., and G. T. Prance. 1990. Taxonomy, Ecology, and Economic Botany of the Brazil Nut (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.: Lecythidaceae). *Advances in Economic Botany* **8**: 130–150.
- Moritz, A. 1984. Estudos biológicos da floração e frutificação da castanha-do-brasil. Belém. EMBRAPA-CPATU. Documentos **29**:82p.
- Müller, C. H., I. A. Rodrigues, A. A. Müller, and N. R. M. Müller. 1980. Castanha-do-Brasil: resultados de pesquisas. Belém, PA, Brasil.
- Myers, G. P., A. C. Newton, and O. Melgarejo. 2000. The influence of canopy gap size on natural regeneration of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) in Bolivia. *Foreste Ecology and Management* **197**: 119-128.
- Neves, C. A. das. 1938. A castanheira do Pará. *Revista de Agricultura* **13**: 463–476.
- Oliveira, Edilson Batista. 2011. Fenologia de espécies do dossel e do sub-bosque de duas Florestas de Restinga na Ilha do Mel, sul do Brasil. EMBRAPA Florestas. Documentos 216.
- Parker, G. G., D. J. Harding, and M. L. Berger. 2004. A portable LIDAR system for rapid determination of forest canopy structure. *Journal of Applied Ecology* **41**(4): 755-767.

- Peres, C. A., and C. Baider. 1997. Seed dispersal, spatial distribution and population structure of Brazilnut trees (*Bertholletia excelsa*) in southeastern Amazonia. *Journal of Tropical Ecology* **13**: 595-616.
- Peres, C. a, C. Baider, P. a Zuidema, L. H. O. Wadt, K. a Kainer, D. a P. Gomes-Silva, R. P. Salomão, L. L. Simões, E. R. N. Franciosi, F. Cornejo Valverde, R. Gribel, G. H. Shepard, M. Kanashiro, P. Coventry, D. W. Yu, A. R. Watkinson, and R. P. Freckleton. 2003. Demographic threats to the sustainability of Brazil nut exploitation. *Science (New York, N.Y.)* **302**: 2112–2114.
- Phillips, S. J., and M. Dudik. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* **31**: 161-175.
- Phillips, S. J., R.P. Anderson, and R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**: 231-259.
- Rabelo V. R. et al. 2008. Macrodiagnóstico do estado do Amapá primeira aproximação do ZEE **3**:139p.
- Salomão, R. D. P., N. de A. Rosa, A. Castilho, and K. A. C. Morais. 2006. Castanheira-do-brasil recuperando áreas degradadas e provendo alimento e renda para comunidades da Amazônia Setentrional 1 The role of Brazil nut trees in restoring degraded forest areas and as a source of food and income for northern Amazonian communitie. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* **1**: 65-78.
- Salomão, R. P. 2009. Densidade, estrutura e distribuição espacial de castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H. & B.) em dois platôs de floresta ombrófila densa na Amazônia setentrional brasileira. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* **4**:11–25.
- Schongart J., R. Gribel, S. F. Fonseca-Junior, and T. Haugeasen. 2015. Age and Growth Patterns of Brazil Nut Trees (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) in Amazonia, Brazil. *Biotropica* **47**: 550-558.
- Schroth, G., L. F. da Silva, M. A. Wolf., W. G. Texeira, and W. Zech. 1999. Distribution of throughfall and stemflow in multi-strata agroforestry, perennial monoculture, fallow and primary forest in central Amazonia, Brazil. *Hydrological Processes* **13**: 1423–1436.
- Scoles, R., R. Gribel, and G. N. Klein. 2011. Crescimento e sobrevivência de castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) em diferentes condições ambientais na região do rio Trombetas, Oriximiná, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* **6**: 273-293.
- Shary P. A., and N. S. Smirnov. 2013. Mechanisms of the effects of solar radiation and terrain anisotropy on the vegetation of dark conifer forests in the Pechora–Ilych State Biosphere Reserve. *Journal of Ecology* **44**: 9-17.
- Silva, A. A., M. K. V. Santos, J. R. V. Gama, R. Noce, and S. Leão. 2013. Potencial do Extrativismo da Castanha-do-Pará na Geração de Renda em Comunidades da Mesorregião Baixo Amazonas, Pará. *Floresta e Ambiente* **20**: 500-509.
- Silvius, K. M., and J. M. Fragoso. 2003. Red-rumped Agouti (*Dasyprocta leporina*) Home Range Use in an Amazonian Forest: Implications for the Aggregated Distribution of Forest Trees. *Biotropica* **35**: 74-83.

- Song, B., J. Chen, P.V. Desanker, D. D. Reed, G. A. Bradshaw, and j. F. Franklin. 1997. Modeling canopy structure and heterogeneity across scales: From crowns to canopy. *Forest Ecology and Management* **96**: 217-229.
- Souza, C. R., C. P. de Azevedo, L. M. B. Rossi, and R. M. B. de Lima. 2008. Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.). Comunicado Técnico 63.
- Stark, S. C., V. Leitold, J. L. Wu, M. O. Hunter, C. V. de Castilho, F. R. C. Costa, S. M. McMahon, G. G. Parker, M. T. Shimabukuro, M. A. Lefsky, M. Keller, L. F. Alves, J. Schietti, Y. E. Shimabukuro, D. O. Brandão, T. K. Woodcock, N. Higuchi, P. B. de Camargo, R. C. de Oliveira and S. R. Saleska. 2012. Amazon forest carbon dynamics predicted by profiles of canopy leaf area and light environment. *Ecology Letters* **15**: 1406-1414.
- Stark, N. M., and C. F. Jordan. 1978. Nutrient Retention by the Root Mat of an Amazonian rain Forest. *Ecology* **59**: 434-437.
- Suganuma, M. S., et al. 2008. Comparando Metodologias para Avaliar a Cobertura do Dossel e a Luminosidade no Sub-bosque de um Reflorestamento e uma Floresta Madura. *Revista Árvore* **32**: 377-385.
- Sumida, A., T. Nakai, M. Yamada, K. Ono, S. Uemura, and T. Hara. 2009. Ground-Based Estimation of Leaf Area Index and Vertical Distribution of Leaf Area Density in a *Betula ermanii* Forest. *Silva Fennica* **43**: 799-816.
- Tabarelli, M., and W. Montovani. 1999. Clareiras Naturais e a Riqueza de Espécies Pioneiras em Uma Floresta Atlântica Montana. *Revista Brasileira de Biologia* **59**: 251-256.
- Thomas, E., C. A. Caicedo, J. Ioo, and R. Kindt. 2014. The distribution of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) through time: from range contraction in glacial refugia, over human-mediated expansion, to anthropogenic climate change. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* **9**: 267-291.
- Vandermeer, P. J., and F. Bongers. 1996. Patterns of tree-fall and branch-fall in a tropical rain forest in French Guiana. *Journal of Ecology* **84**: 19-29.
- Velázquez-Rosas N., J. Meave, and S. Vázquez-Santana. 2002. Elevation variation of leaf traits in montane rain forest tree species at La Chinantla, Sourthen Mexico. *Biotropica* **34**: 534-546.



**CAPÍTULO I - APLICAÇÃO DO LIDAR TERRESTRE NA AVALIAÇÃO DA  
ESTRUTURA VERTICAL DE FLORESTAS AMAZÔNICAS COM CASTANHEIRAS  
(*Bertholletia excelsa* Bonpl.)**

LRH: Costa *et al.*

RRH: Estrutura vertical de florestas com castanheiras

**Aplicação do LiDAR terrestre na avaliação da estrutura vertical de florestas amazônicas com castanheiras (*Bertholletia excelsa* Bonpl.)**

*Artigo submetido ao periódico Biotropica*

**Felipe Felix Costa<sup>1</sup>, Kátia Emídio da Silva<sup>2</sup>, Raimundo Cosme de Oliveira Júnior<sup>3</sup>, Hélio Tonini<sup>4</sup>, Danilo Roberti Alves de Almeida<sup>5</sup>, Diogo Martins Rosa<sup>6</sup> Troy Patrick Beldini<sup>7</sup> and Marcelino Carneiro Guedes<sup>1 8</sup>**

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Biodiversidade Tropical, Universidade Federal do Amapá, Rod. Juscelino Kubitschek, KM-02, Macapá, AP, Brasil

<sup>2</sup> Pesquisadora da Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus, AM, Brasil

<sup>3</sup> Pesquisador da Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA, Brasil

<sup>4</sup> Pesquisador da Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop, MT, Brasil

<sup>5</sup> Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil

<sup>6</sup> Professor substituto da Universidade Federal de Rondônia, Rolim de Moura, RO, Brasil

<sup>7</sup> Professor da Universidade Federal do Oeste do Pará

<sup>8</sup> Pesquisador da Embrapa Amapá, Macapá, AP, Brasil

Received\_\_\_\_\_; revision accepted\_\_\_\_\_.

## RESUMO

A análise estrutural de florestas com castanheiras-da-amazônia pode ajudar a entender variações na abundância da espécie. Foi utilizado LiDAR portátil terrestre para testar a hipótese que florestas com castanheiras apresentam padrão de estrutura vertical e que sua abundância pode ser associada com atributos do dossel, dependendo da escala de análise. O estudo foi realizado em duas escalas: (1)Regional (quatro Estados da Amazônia); (2)Local (duas tipologias no Amapá). Os sítios florestais na Amazônia Oriental apresentaram maior estrutura. Nesses sítios também estão localizadas as maiores (>50m) castanheiras. O sítio no Amazonas apresentou menor altura (<33m). As florestas com castanheiras apresentam um padrão de distribuição da densidade foliar ao longo do perfil vertical, com maior concentração nos estratos inferiores. Mesmo em florestas com diferentes alturas e densidades de castanheiras, o segundo estrato (8a18m) sempre apresentou maior proporção da densidade foliar. Nas diferentes tipologias (floresta densa x transição savana/floresta), encontramos resultados inversos, com diferenças no perfil e semelhanças na altura. A interação entre IAF e abundância de castanheira também foi diferente nas escalas distintas. Não observamos relação no sítio de floresta densa. Por outro lado, na floresta de transição, teve correlação forte e significativa com o estrato superior. Isso indica que a estrutura vertical desse ecossistema é mais dependente das castanheiras que na floresta densa, onde também ocorrem outras árvores grandes. Variações no perfil vertical de florestas com castanheiras-da-amazônia e sua associação com a abundância da espécie são dependentes da escala de análise, sendo mais afetadas pela tipologia florestal que por largas variações geográficas.

*Palavras chave:* castanheira-do-brasil; castanheira-da-amazônia; castanha-do-pará; copa; densidade de área foliar, índice de área foliar, altura da floresta, perfil vertical da floresta.

## ABSTRACT

Structural analysis of forests with Brazil nut trees can help to understand variations in the abundance of the species. We test the hypothesis that these forests present a vertical structure pattern, that can be associated with your abundance, depending on the scale of analysis. The study was carried out on two scales: (1)Regional (four Amazon states); (2)Local (two typologies in Amapá). The forest sites in the Eastern Amazon showed a larger maximum height. These sites are also located the largest (>50m) Brazil nut trees. The Amazonas site presented a smaller height (<33m). Forests with Brazil nut present a pattern of distribution of leaf density along the vertical profile, with biggest concentration in the lower strata. All forest sites presented the second strata (8a18m) with greater leaf density proportion. In different typologies, we find inverse results, with differences in profile and height similar. The interaction between leaf area and abundance of Brazil nut stems was also different in the distinct scales. We do not observe a relation in the dense forest site. In the transition savannah/forest, it had a strong and significant correlation with the upper stratum. The vertical structure of this ecosystem is more dependent on the Brazil nut stems than in the dense forest, where also occur other large trees. Variations in the vertical profile of forests with Amazon nut trees and their association with the abundance of the species are dependent on the scale of analysis, being more affected by forest typology than by wide geographical variations.

*Key words:* Brazil nut tree; castanheira-da-amazônia; castanha-do-pará; canopy; leaf area density, leaf area index, forest height, forest vertical profile.

A CASTANHEIRA-DA-AMAZÔNIA É UMA ESPÉCIE ÍCONE E ENDÊMICA DA AMAZÔNIA, OCORRENDO PRATICAMENTE EM TODOS OS PAÍSES QUE ABRANGEM A PAN-AMAZÔNIA (Thomas et al. 2014).

Nas últimas décadas houve uma intensificação de pesquisas sobre a espécie, em diversas temáticas como ecologia, saúde e economia Duchelle *et al.* (2012); Scoles and Gribel (2012); Zuidema and Boot (2002); Myers *et al.* (2000); Peres and Baider (1997). Também houve ampliação do mercado brasileiro, com crescente valorização da castanha Conab (2015).

Com aumento da demanda são ainda mais necessárias as pesquisas sobre a espécie, especialmente em escala regional. Apesar de haver diversos estudos sobre castanheira, ainda existem lacunas, sobretudo sobre aspectos que influenciam sua ocorrência e abundância nas florestas amazônicas, que pode estar relacionada com a radiação solar que atinge as florestas tropicais Engelbrecht and Herz (2001); Jardim et al. (2007). A castanheira é uma espécie heliófita e necessita de clareiras grandes para se estabelecer Myers et al. (2000), justificando os estudos de suas relações com o dossel.

No entanto, realizar estudos do dossel em florestas com castanheiras é complicado, pois as mesmas podem chegar a 50 m de altura Salomão et al. (2006); Salomão (2009). Os tradicionais métodos visuais são subjetivos, Wilson, (1958); Aber (1979) e de difícil aplicação, principalmente, em árvores com porte tão elevado. Além disso, a obtenção em campo dessas informações, como altura das árvores e estratificação do dossel, em maior escala espacial, torna-se muito onerosa. Desta forma, o uso de tecnologias de sensoriamento remoto na área florestal é cada vez mais frequente, pois apresentam maior potencial, eficiência e agilidade na aquisição dos dados Lefsky et al. (2002); D'Oliveira et al. (2012). Com o avanço do sensoriamento remoto em tecnologias aplicadas na área florestal, os métodos baseados em imagens LIDAR (Light Detection And Ranging) estão em ascensão, Lefsky et al. (2002); Parker et al. (2004); Stark et al. (2012); Stark et al. (2015); Tang and Dubayah (2017).

O LiDAR terrestre portátil (LTP) possibilita a mensuração da estrutura do dossel florestal com alta precisão e acurácia (Parker et al., 2004). A partir da nuvem de dados brutos adquiridos pelo sistema LTP, é possível gerar diferentes métricas da estrutura do dossel da vegetação, entre elas: altura, rugosidade, abertura do dossel, fração de clareiras, densidade de área foliar, índice de área foliar e biomassa Almeida et al. (2016); Stark et al. (2015); Lefsky et al. (2002); Sumida et al. (2009); Palace et al. (2016).

Essas métricas podem ser usadas em análises de processos ecológicos e serviços ecossistêmicos. A altura dominante e a biomassa de uma floresta, por exemplo, podem ser relacionadas com a qualidade do sítio Skovsgaard and Vanclay (2008). A estratificação do perfil vertical de florestas tropicais e avaliação de atributos estruturais como as clareiras, podem ser associados com a composição e riqueza de espécies (Tabarelli and Montovani 1999), estoque de carbono e coexistência de espécies Kohyama (1991), crescimento e produção de biomassa Souza and Souza (2004), com o índice de área foliar (IAF) Asner et al. (2003) e com a biodiversidade da floresta Gao et al. (2014).

Dessa forma, utilizamos informações e métricas extraídas pelo LiDAR terrestre de florestas com castanheiras em diversos estados, para testar a hipótese de que essas florestas apresentam um padrão de estrutura vertical na Amazônia, e que a abundância de castanheiras pode ser associada com atributos do dossel da floresta matriz. Nossos objetivos foram:

- (1) Averiguar se florestas com castanheiras em diferentes estados da Amazônia Legal Brasileira (escala regional) apresentam padrão semelhante de altura e perfil vertical, com maior densidade foliar nos estratos inferiores.
- (2) Verificar se esse padrão também ocorre em diferentes tipologias florestais com castanheiras em um mesmo Estado (escala local).
- (3) Analisar a associação entre abundância de castanheira e o Índice de Área Foliar (IAF) em diferentes estratos, verificando as diferenças nas relações para as duas escalas.

## MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO E DELINEAMENTO AMOSTRAL. — O estudo foi realizado em florestas com ocorrência da castanheira-da-amazônia (Fig. 1), em duas escalas diferentes: (1) escala regional, abrangendo florestas em quatro Estados da Amazônia Legal Brasileira; (2) escala local, na Reserva Extrativista do Rio Cajari (Resex do Rio Cajari), localizada no sul do Estado do Amapá, contendo duas áreas com tipologias florestais diferentes.

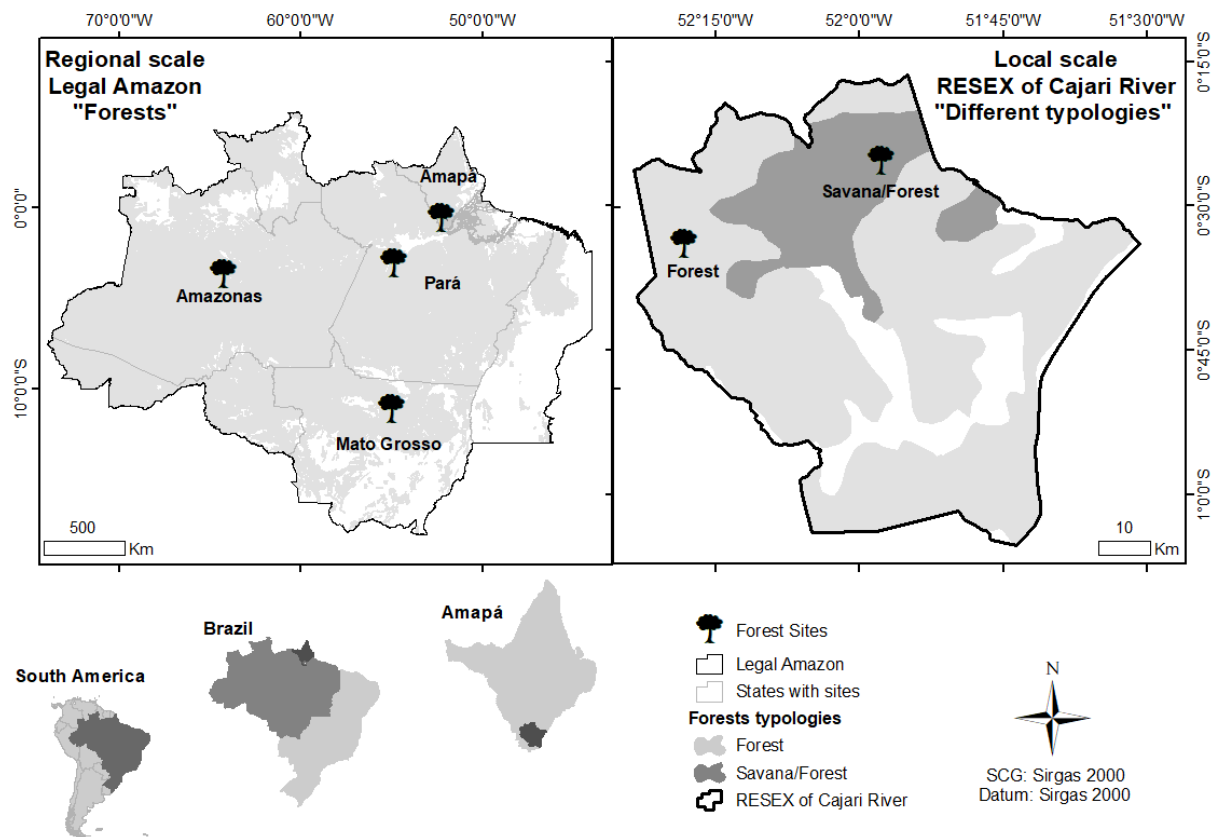


FIGURA 1. Localização das áreas de estudos de sítios florestais com castanheiras em diferentes estados da Amazônia (escala regional) e em diferentes tipologias florestais na Resex do Rio Cajari (escala local)

Na escala regional dos quatro Estados, foram amostradas três florestas ombrófilas densas (FOD) e uma estacional Ibge (2012), em áreas de ocorrência de Argissolo e Latossolo distróficos, com clima tropical Ibge (2015); Alvares et al. (2014): **Amapá** ( $0^{\circ} 33' 50,1''$  S e  $52^{\circ} 18' 23,8''$  W) - FOD submontana com dossel emergente, predominância do Argissolo Vermelho-amarelo distrófico (PVAd) e clima tropical de monções (Am); **Pará** ( $3^{\circ} 3' 18,6''$  S e

54°, 55' 41,9" W) - FOD das terras baixas com dossel emergente (Dbe), Latossolo Amarelo distrófico (LAd) e clima tropical úmido, sem estação seca (Af); **Amazonas** (3°, 38' 3,6" S e 64° 18' 37,8" W) - floresta (Dbe), solo (PVAd) e clima (Af); **Mato Grosso** (11° 5' 55,1" S e 55° 2' 12,5" W) floresta estacional semidecidual submontana com dossel emergente (Fse), Latossolo (LVd) e clima (Am).

Na escala local, foi comparada a tipologia **floresta** (0° 33' 50,1" S e 52° 18' 23,8" W) com as mesmas informações mencionadas anteriormente e uma ilha de floresta localizada em área de **savana**, transição savana/floresta (W 51° 57' 50,1" e S 0° 25' 15,5"), com floresta de galeria (Spf), solo (LAd) e (Am), no Estado do Amapá.

Em cada local de estudo foi amostrada uma área de 9 ha (300 m x 300 m), de acordo com metodologia da rede Kamukaia Guedes et al. (2017), para a coleta dos dados. Em cada área foram geradas diferentes subparcelas, em função dos objetivos da pesquisa: 1) estrutura vertical da floresta - 36 amostras de 50 m x 50 m (FIGURA 2a); 2) associação da abundância de castanheira com IAF - 12 amostras de 150 m x 50 m (Fig. 2b).

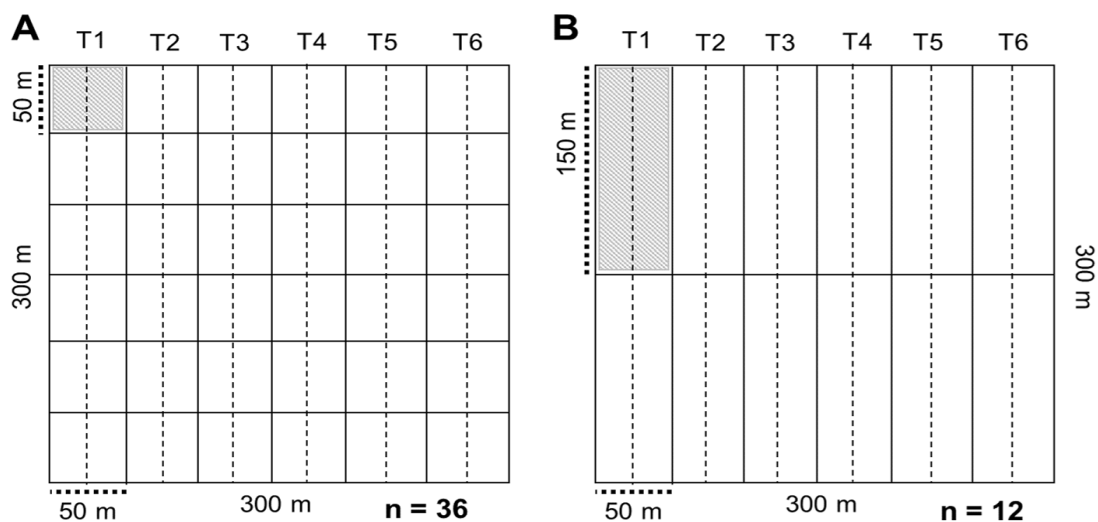


FIGURA 2. Representação das unidades amostrais em cada local, para estudos da estrutura do dossel com uso do LiDAR terrestre e da variação na densidade de castanheiras: a) modelo para avaliação das métricas do lidar e comparação de atributos do dossel; b) modelo para avaliação da abundância de castanheira e análises das relações com o IAF. Linhas tracejadas = transectos percorridos com o LiDAR; T1, T2... T6 = transectos



COLETA DE DADOS EM CAMPO. — Foi utilizado o LiDAR Rangefinder (modelo ld90-3100vhs-lp - Riegl USA, inc., Orlando-Florida-USA), operando a 2000 hz, com emissão de 2000 pulsos por segundo, em plataforma portátil terrestre, para o levantamento dos dados. O caminhamento com o LPT foi realizado em velocidade constante, no sentido ida e volta, no meio de cada transecto. Para auxiliar na manutenção da velocidade durante a caminhada, os transectos foram previamente limpos e foram realizadas marcações a cada 50 m, onde o operador parava para salvar as informações.

As alturas de quinze castanheiras em cada parcela também foram avaliadas, por meio de caminhamento com o LiDAR em oito raios de 15 m, medidos a partir do tronco de cada castanheira avaliada.

INVENTÁRIO DAS CASTANHEIRAS. — Para o levantamento da abundância de castanheira, foi realizado inventário em 100% da área (9 ha) de cada parcela em todos os Estados. Todas as árvores da espécie foram identificadas, plaqueadas e mapeadas dentro das subparcelas (150 m x 50 m).

MÉTRICAS DO LIDAR PARA ANÁLISE DA ESTRUTURA VERTICAL DA FLORESTA. — Densidade de área foliar (*DAF*): é originada dos valores obtidos ao longo de um plano vertical do transecto, gerando um campo tridimensional de densidade de folhas. Para os cálculos de *DAF* foi utilizada a equação de MacArthur and Horn (1969) (equação 1).

$$DAF_{i,j} = \ln (\text{pulses.in/pulsos totais}) \times \Delta h$$

(1)

Onde: *DAF* é a densidade de área foliar de um “voxel” de 1m de altura x 2m de comprimento;

$i$  é o “voxel” no seu sentido vertical: 1-2 m, 2-3 m, 3-4m, etc;

$j$  é o mesmo “voxel” no seu sentido horizontal, em intervalos de 0-2m, 2-4m, 4-6m, etc;

*pulses.in* é o número de retornos obtidos para aquele “voxel”;

*pulsos totais* é o número de pulsos que entraram na base do “voxel”, e

$\Delta h$  é a altura do “voxel” ( $\Delta h = 1m$ ).

Índice de área foliar (**IAF**): para calcular o IAF foi feita a soma de o perfil de DAF em diferentes intervalos de altura (estratos) (equação 2).

$$IAF_j = \sum_{i=1}^{Ni} DAF_{i,j} \quad (2)$$

Onde:

$IAF_j$  é o índice de área foliar do trecho linear  $j$  do transecto (50 m e 150 m).

Rugosidade (**R**): calculada com o desvio padrão da DAF na linha vertical pelo desvio padrão do DAF na linha horizontal Parker et al. (2004); Hardiman et al. (2011) (Equação 3).

$$R = \sigma(\sigma[DAF]i)j$$

(3)

Onde:

**R** = rugosidade

$i$  é o eixo vertical;

$j$  é eixo horizontal;

$\sigma$  é o desvio padrão.

Altura máxima (**Hmax**): é o valor mais elevado encontrado no intervalo de 50 m ou 150 m, considerando variações a cada metro no eixo do caminhamento.

Altura média (**Hmed**): é o valor médio dos pontos mais altos, considerando variações a cada metro no intervalo de 50 m ou 150 m.

Fração de clareiras (**F**): é a abertura do dossel em determinado limiar de altura (10 m ou 15 m). É calculada pela proporção de colunas de 1 m de largura no eixo x sem informação de vegetação a partir do limiar de altura definido pelo total de colunas no intervalo percorrido.

Os IAFs foram gerados em diferentes intervalos de classes de altura, para representar a estratificação vertical do perfil da floresta, segundo classificação adaptada de Souza and Souza (2004). Foram analisadas cinco classes de alturas ao longo do perfil: I - sub-bosque (1 a 7 m); II - inferior (8 a 18 m); III - intermediário (19 a 26 m); IV - superior (27 a 35 m) e V - emergentes (maior que 35 m). Foram calculados índices para cada classe de altura (IAF I, IAF II, IAF III, IAF IV, IAF V), e também para a soma do dossel superior mais emergentes (IAF IV + V) e o IAF geral para todos os estratos.

PROCESSAMENTO E ANÁLISES DOS DADOS. — Todos os cálculos e análises foram executadas no software R versão 3.4.3 R Core Team (2017).

Para a escala regional foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis para comparar as diferenças entre os atributos do perfil vertical das florestas de cada estado. Na escala local, foi aplicado teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney para comparar as respostas das duas áreas com tipologias diferentes. Também foi realizada distribuição de densidade de probabilidade de kernel para as alturas e teste de qui-quadrado nas partições do IAF ao longo do perfil.

RELAÇÃO DA ABUNDÂNCIA DE CASTANHEIRA COM O IAF. — Na avaliação da abundância de castanheiras em relação ao IAF, foi utilizada a correlação de Spearman. As análises foram realizadas para cada escala.

## RESULTADOS

ESTRUTURA VERTICAL DE FLORESTAS AMAZÔNICAS COM CASTANHEIRAS (ESCALA REGIONAL). —

— As florestas estudadas na Amazônia brasileira apresentam abundância de castanheira parecidas em três das quatro florestas avaliadas, nos Estados do Amapá, Pará e Mato Grosso. A floresta no Estado do Amazonas foi a que apresentou menor abundância, com densidade de 5 ind. ha<sup>-1</sup>. As alturas Hmax e Hmed das castanheiras são mais elevadas na floresta localizada no Amapá, quando comparadas com aquelas localizadas na Amazônia Ocidental - Amazonas e Mato Grosso (Tabela 1).

TABELA 1. Informações sobre as castanheiras localizadas nas áreas avaliadas em diferentes estados da Amazônia: AP = Amapá, PA = Pará, AM = Amazonas, MT = Mato Grosso

Forest Sites	Brazil nut information						vegetation information		
	A	M	D (ind. ha <sup>-1</sup> )	Havg	Hmax	Hmax A	Havg	Hmax	Hmax A
AP	106	8.8	12	38	42	51	29	38	49
PA	92	7.7	10	-	-	-	28	39	48
AM	44	3.7	5	33	36	49	24	28	40
MT	101	8.4	11	31	34	41	27	33	40

A= abundância de castanheiras em parcela de 9 ha, M = média de castanheiras por parcela de 150 m x 50 m; D = densidade de castanheiras por hectare; Havg = altura total média, Hmax = altura total máxima. Hmax A = altura máxima absoluta.

As alturas do dossel das florestas na região oriental da Amazônia são mais elevadas que das florestas do Amazonas e Mato Grosso (Fig. 3a), assim como na comparação das alturas das castanheiras (Fig. 3bc).

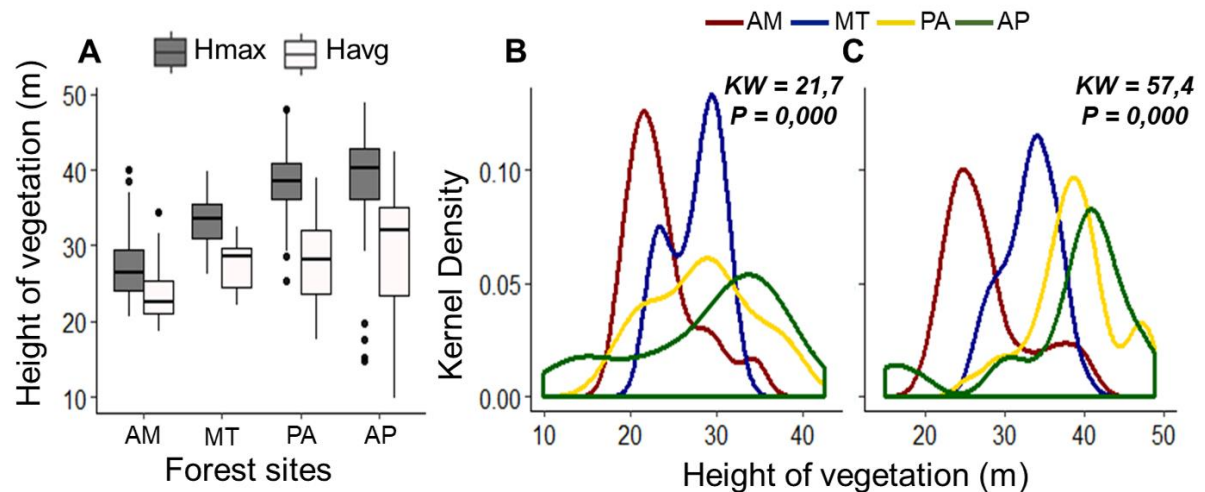


FIGURA 3. Medianas das alturas em gráficos boxplot (a) e distribuições de probabilidade de kernel das frequências das alturas médias (b) e das alturas máximas (c), de florestas com castanheiras em diferentes estados da Amazônia: AM = Amazonas, AP = Amapá, MT = Mato Grosso e PA = Pará.

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que as diferenças nas alturas Hmax e Hmed entre as florestas são altamente significativas (Tabela 2).

TABELA 2. Estatísticas, medianas (M) e desvio padrão (D), n=36, de métricas obtidas com o LiDAR terrestre, do perfil vertical de florestas com castanheiras em diferentes estados da Amazônia: Amapá - AP, Pará - PA, Amazonas – AM e Mato Grosso – MT

Métricas	AP		PA		AM		MT		Teste Kruskal-Wallis	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	$\chi^2$	p-value
Hmax	40,2	8,8	38,5	5,3	26,4	5,4	33,6	3,3	57,4	<0,001
Hmed	32,1	8,6	28,2	5,9	22,6	4,2	28,6	3,1	21,7	<0,001
R	7,9	2,5	6,5	2,8	3,2	1,6	4,8	1,6	59,2	<0,001
S (%)	1,5	4,0	0,5	1,1	1,1	1,6	1,2	3,7	25,8	<0,001
F (10m)	0,06	0,14	0,04	0,10	0,01	0,01	0,01	0,02	8,54	0,036
F (15m)	0,16	0,26	0,09	0,15	0,03	0,05	0,03	0,04	4,67	0,198
LAI I	0,86	0,79	1,29	0,43	1,22	0,34	0,81	0,28	34,5	<0,001
LAI II	1,85	0,56	1,82	0,72	2,34	0,57	2,25	0,39	16,5	0,001
LAI III	0,73	0,55	0,99	0,40	1,20	0,56	1,13	0,40	14,4	0,002
LAI IV	0,46	0,41	0,63	0,57	0,00	0,32	0,73	0,47	37,2	<0,001

LAI V	0,32	0,41	0,10	0,44	0,00	0,07	0,00	0,05	59,2	<0,001
LAI IV+V	0,92	0,65	0,93	0,84	0,05	0,34	0,76	0,46	40,8	<0,001
LAI Geral	4,85	0,56	5,27	0,89	5,11	0,45	5,01	0,47	18,5	<0,001

Hmax = altura máxima; Hmed = altura média; R = rugosidade; S = sky shots; F = fração de clareira; LAI = índice de área foliar; I, II, III, IV e V = Estratos das classes de altura da vegetação.

A proporção de sky shots é menor na floresta localizada no Pará e maior nas florestas do Amapá e Mato Grosso. A rugosidade do dossel nas florestas do Amazonas e Mato Grosso é menor, ou seja, baixa variação de altura no dossel superior da vegetação.

Apesar das diferenças nas comparações diretas das métricas do IAF entre as florestas em diversos estados, observa-se um padrão de densidade de área foliar - DAF nas florestas com castanheiras em diversos estados da Amazônia ao longo do perfil vertical da vegetação. No geral, as proporções que cada estrato acumula de densidade foliar são semelhantes entre as florestas nos diferentes estados. O IAF cumulativo mostra que a maior parte da vegetação está sempre concentrada nos estratos inferiores (Fig. 4).

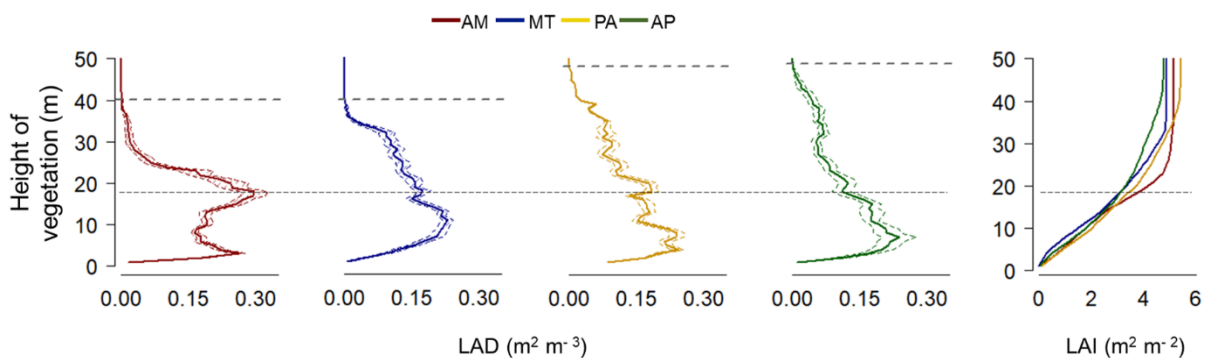


FIGURA 4. Densidade de área foliar (DAF) e Índice de área foliar (IAF) cumulativo ao longo do perfil vertical das florestas; Linhas: contínuas = média; tracejadas = erro padrão; AM = Amazonas, MT = Mato grosso, PA = Pará, AP = Amapá; Linhas pontilhadas: vertical = média de DAF; horizontal = altura máxima de cada floresta

Nos primeiro e segundo estratos juntos, a DAF foi  $\geq$  a 50% do IAF em todas as florestas, demonstrando que existe um padrão de acúmulo de área e densidade foliar nos estratos inferiores nas florestas com castanheiras nos diferentes estados. Mesmo em florestas com diferentes densidades de castanheiras, há um predomínio de folhas da vegetação de sub-bosque e de árvores dominadas, em comparação com os outros três estratos acima de 18 m. O segundo estrato (8 m a 18 m) foi o que apresentou maior proporção da densidade foliar em todas as florestas.

O teste de partição do qui-quadrado mostrou que, quando se considerada a proporção que a densidade foliar em cada estrato representa do IAF total, somente a densidade no estrato V do sítio florestal no Amapá foi estatisticamente diferente dos demais ( $\chi^2 = 10.1337$ ;  $p=0.0015$ ). No AP, esse estrato ( $> 35$  m de altura) representou 8,4% do IAF do perfil vertical, bem acima dos valores dos demais estados.

#### ESTRUTURA DE DOSSEL EM DIFERENTES TIPOLOGIAS NO ESTADO DO AMAPÁ (ESCALA LOCAL) –

— A tipologia transição savana/floresta apresentou abundância de castanheiras superior a tipologia floresta densa, com 149 castanheiras e densidade de 17 ind. ha<sup>-1</sup> (Tabela 3).

TABELA 3. Informações sobre as castanheiras localizadas em áreas com diferentes tipologias florestais (Flo = floresta; Sav = savana, transição savana/floresta), no sul do Estado do Amapá

Forest Sites	Brazil nut information						Vegetation information		
	A	M	D (ind. ha <sup>-1</sup> )	Havg	Hmax	Hmax A	Havg	Hmax	Hmax A
Forest	106	8.8	12	38	42	51	29	38	49
Savannah/Forest	149	12.4	17	36	38	42	31	37	44

Abundância = abundância de castanheira na parcela de 9 ha; M = média de castanheiras por parcelas 150 m x 50 m; D = densidade de castanheiras por hectare; Havg = altura total média; Hmax = altura total máxima; Hmax A = altura máxima absoluta.

Não houve diferenças significativas entre as alturas do dossel da floresta entre as duas tipologias (Fig. 5a), nem na distribuição de frequência das alturas médias (Fig. 5b). Apenas a distribuição de frequência das alturas máximas apresentou ligeira diferença entre as tipologias, mas que não é significativa quando se considera o nível de significância de 1% (Fig. 5c). As distribuições de densidade dos valores de alturas média e máxima da vegetação de transição savana/floresta têm menor amplitude, demonstrando que essa tipologia tem padrão de altura mais uniforme que a tipologia de floresta densa (Fig. 5bc).

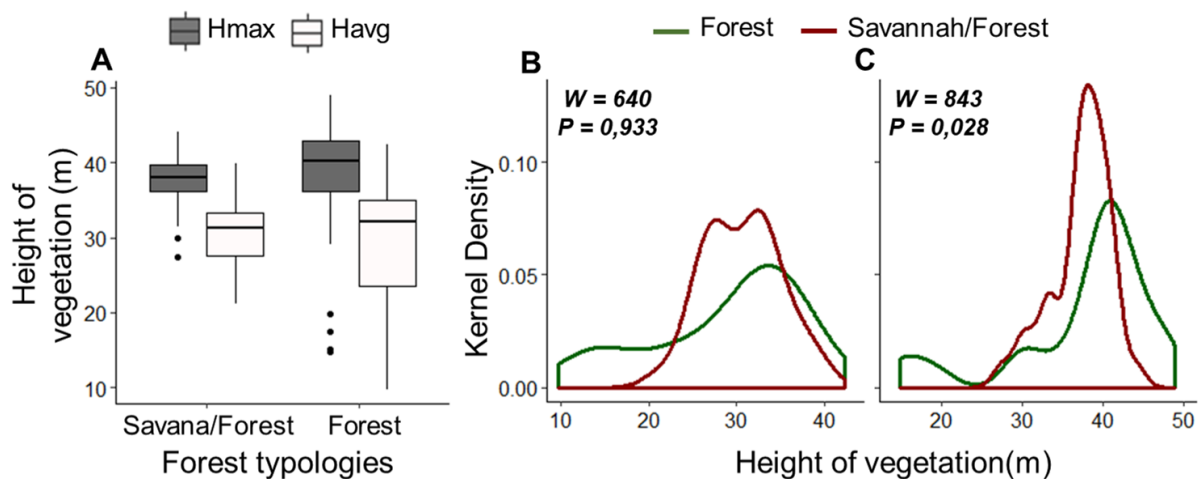


FIGURA 5. Medianas das alturas em gráficos boxplot (a) e distribuições de probabilidade de kernel das frequências das alturas médias (b) e das alturas máximas (c), de florestas com castanheiras em tipologias de floresta densa e transição cerrado/floresta, localizadas no Estado do Amapá

A área de floresta tem o dossel mais rugoso e maior proporção de clareiras, enquanto que a de cerrado/floresta apresenta maior homogeneidade e quantidade de sky shots. O IAF geral e dos estratos inferiores (I e II) na tipologia de floresta é maior e significativamente diferente da área de savana/floresta (Tabela 4).



TABELA 4. Comparação de mediadas (n=36) das métricas obtidas com o LiDAR terrestre, do perfil vertical de florestas com castanheiras em diferentes tipologias (Floresta densa e Transição Savana/Floresta)

Variáveis	Floresta		Transição Cerrado/Floresta		Teste Wilcoxon-Mann-Whitney	
	M	SD	M	SD	W	p
Hmax	40,2	8,8	38,0	3,68	843	0,028
Hmed	32,1	8,6	31,2	4,35	640	0,933
R	7,9	2,5	5,0	1,7	999	0,000
S (%)	1,5	4,0	2,6	3,10	425	0,012
F (10m)	0,06	0,14	0,01	0,01	803	0,025
F (15m)	0,16	0,26	0,02	0,04	872	0,005
LAI I	0,86	0,79	0,6	0,30	883	0,008
LAI II	1,85	0,56	1,5	0,30	947	0,001
LAI III	0,73	0,55	1,1	0,56	365	0,002
LAI IV	0,46	0,41	0,6	0,45	475	0,052
LAI V	0,32	0,41	0,1	0,33	751	0,250
LAI IV+V	0,92	0,65	0,9	0,59	761	0,205
LAI Geral	4,85	0,56	4,6	0,43	913	0,003

M = média; SD = desvio padrão; Hmax = altura máxima; Hmed = altura média; R = rugosidade; S = sky shots; F = fração de clareira e; LAI = índice de área foliar.

As diferenças significativas entre os índices de área foliar nos estratos inferiores e intermediários das duas tipologias, observadas na Tabela 5, foram confirmadas pela análise da distribuição da densidade foliar ao longo do perfil vertical. As duas tipologias têm estrutura de DAF ao longo do perfil diferentes, principalmente quando se considera os estratos intermediário e inferiores e as densidades nas alturas até 26 m (Fig. 6).

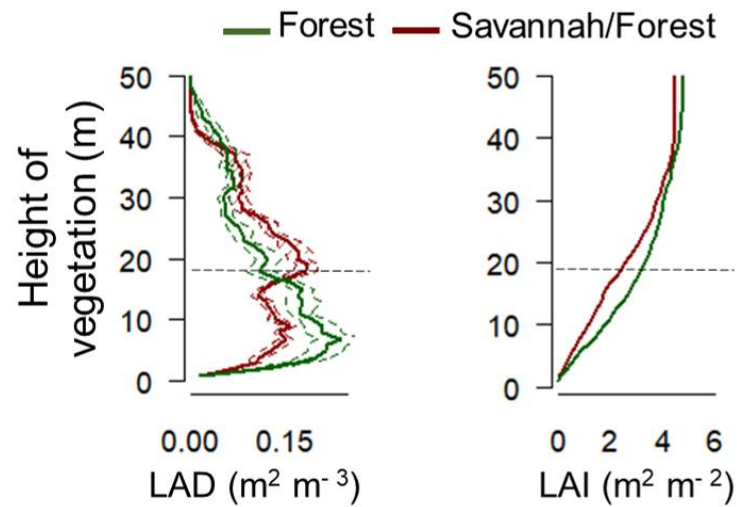


FIGURA 6. Densidade de área foliar (DAF) e Índice de área foliar (IAF) cumulativo ao longo do perfil vertical das áreas com tipologias diferentes de florestas com castanheiras no Estado do Amapá. Linhas: contínuas (Média); tracejadas (erro padrão); Cor: Vermelha = savana/floresta, Verde = floresta densa

Nos estratos intermediário (III) e superior (IV) a área savana/floresta tem IAF maior e é significativamente diferente da floresta (Tabela 4 e Fig. 6). As classes de altura (estratos) evidenciam claramente as diferenças no IAF entre as tipologias nos diferentes estratos, confirmando o maior IAF na transição para alturas variando de 19 a 35 m (Fig. 7).

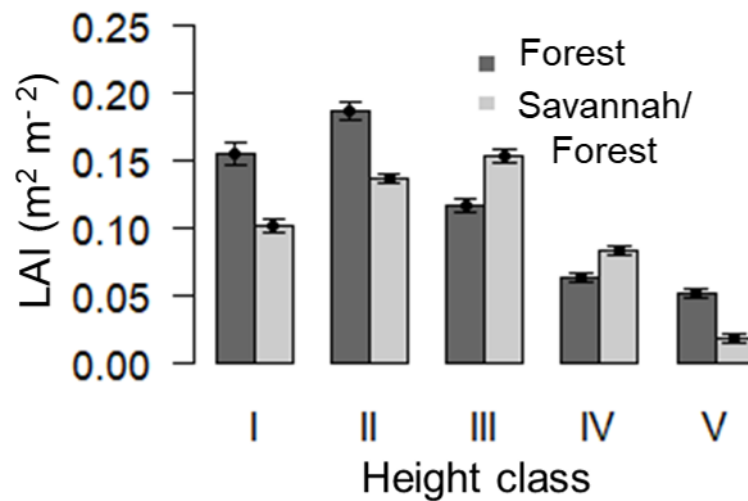


FIGURA 7. Índice de área foliar (IAF) por classes de alturas (estratos) nas áreas com tipologias florestais diferentes (Floresta e Savana/Floresta) no Estado do Amapá. Estrato I = 1 a 7m, II = 8 a 18m, III 19 a 26m, IV = 27 a 35m e V= >35m

#### RELAÇÃO ENTRE ABUNDÂNCIA DE CASTANHEIRAS E IAF EM DIFERENTES ESTRATOS DE ALTURA.

— No geral, considerando as florestas com castanheiras localizadas em quatro estados da Amazônia, a abundância da espécie teve mais associações significativas com os estratos da parte superior do dossel: inferior (II)  $\rho = -0.30$  e  $p = 0.04$ ; superior (IV)  $\rho = 0.39$  e  $p = 0.01$ ; emergentes (V)  $\rho = 0.29$  e  $p = 0.05$  e; os dois últimos estratos (IV + V)  $\rho = 0.38$  e  $p = 0.01$ .

Quando se considera as diferentes tipologias no Amapá, não houve nenhuma associação significativa da abundância de castanheiras com o IAF na floresta ombrófila densa. Na transição savana/floresta, foi observada relação significativa ( $\rho = 0.75$  e  $p < 0.01$ ) com o IAF do estrato IV, na parte superior do dossel.

Na (Fig. 8), pode-se observar as relações dos IAFs e castanheiras, na análise conjunta das florestas.

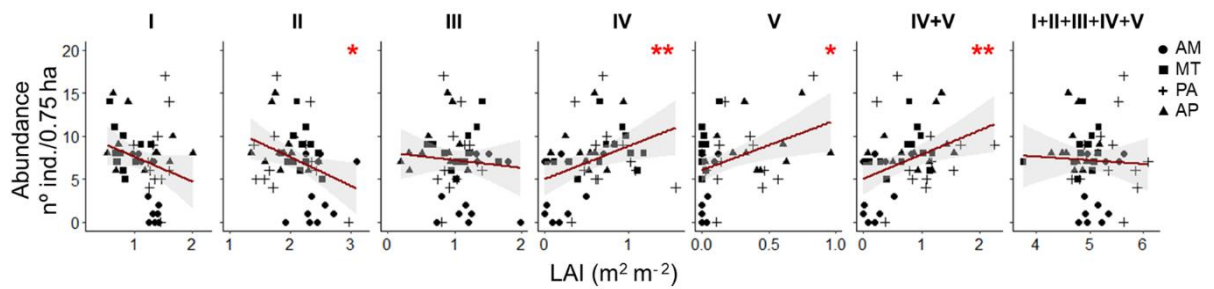


FIGURA 8. Correlação de Spearman ( $n=48$ ) entre os IAFs em diferentes estratos e abundância de castanheira em florestas com castanheiras em diferentes estados da Amazônia; (I, II, III, IV e V) = Classes de altura da vegetação; ( \* ) significativo a 5% de probabilidade de erro, (\*\*) significativo a 1% de probabilidade de erro.

O estrato superior da área de savana mostrou além de uma correlação significativa, também uma correlação forte no estrato IV (Fig. 9). Ou seja, a medida que aumenta a quantidade de castanheiras, aumenta também o IAF desse estrato, que representa variação de 27 a 35 m de altura.

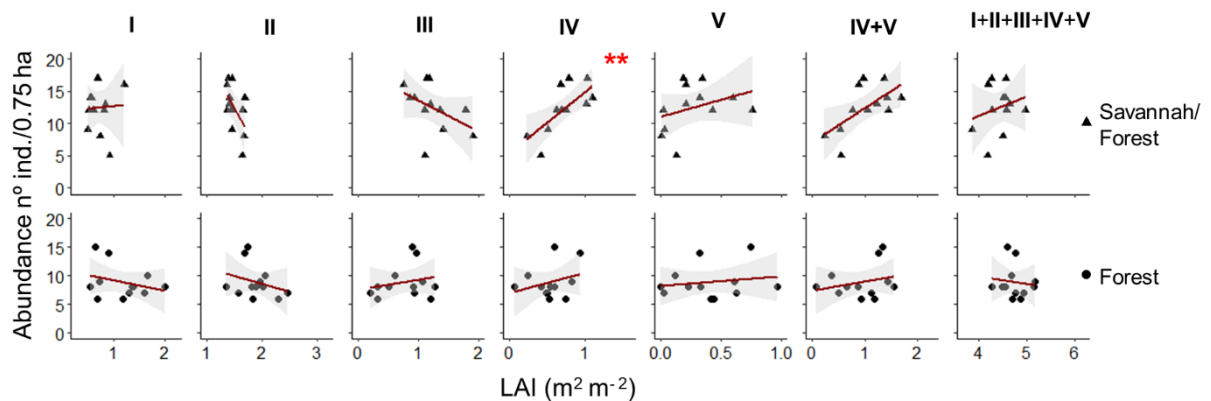


FIGURA 9. Correlação de Spearman ( $n=12$ ) entre os IAFs em diferentes estratos e abundância de castanheira em tipologias florestais diferentes no sul do Estado do Amapá. (I, II, III, IV e V) = Classes de altura da vegetação. ( \* ) significativo a 5% de probabilidade de erro, (\*\*) significativo a 1% e de probabilidade de erro.

#### 4. DISCUSSÃO

As florestas tropicais com ocorrência de castanheiras, avaliadas em diferentes Estados da Amazônia, com tipologias florestais, solos e climas parecidos, no geral apresentaram diferenças nas métricas derivadas do LiDAR, como altura e rugosidade do dossel, menos para a fração de clareiras acima de 15 m, como também observado em (Hunter *et al.* 2015).

As florestas localizadas no Amapá e Pará (Amazônia oriental) apresentaram maior estrutura, principalmente da altura máxima, em torno de 38 m. Nessas florestas também estão localizadas as maiores castanheiras, com valores acima de 40 m.

A floresta do Amazonas é a que apresenta menor estrutura de altura, com valores abaixo de 30 metros (Fig. 3bc). Essa floresta, também apresenta menor rugosidade e um IAF total elevado, demonstrando que é uma floresta densa com dossel bem homogêneo e padrão mais uniforme. Esse padrão também foi confirmado pela distribuição de frequência das alturas. A floresta localizada no Amazonas e também no Mato Grosso, têm menor amplitude na distribuição da densidade dos valores de altura, o que mostra que essas florestas tem um padrão de altura mais uniforme.

Apesar da Amazônia geralmente ser caracterizada por florestas de grande porte, observa-se que há variações em suas estruturas. Essas diferenças entre florestas em diferentes estados podem estar associadas à diversidade e predominância de espécies, abundância de castanheiras, pressão antrópica, idade da vegetação, competição. Steege *et al.* (2003) modelaram a variação de fatores abióticos na Amazônia, relacionando-os com a densidade e diversidade arbórea, e mostraram que esses atributos da floresta, assim como a precipitação, são mais elevados na Amazônia Ocidental. Essas condições podem explicar as diferenças encontradas nesta pesquisa, na medida em que a maior densidade de árvores pode gerar maior competição e um dossel mais fechado e denso, como observado no Amazonas. Isso também pode ajudar a explicar a menor abundância

de castanheiras, já que essa espécie é heliófita e dependente de clareiras grandes para se estabelecer e atingir o dossel Myers *et al.* (2000).

Embora exista diferenças significativas na comparação direta das métricas, é possível verificar um padrão em todas as florestas avaliadas nos diferentes estados, para distribuição da vegetação ao longo do perfil vertical. Sempre houve maior concentração de DAF e IAF nos estratos inferiores (Fig. 4 e 5). Há maior concentração de folhas até uma altura de 18 m, nos estratos do sub-bosque e árvores dominadas. Resultados semelhantes em florestas da Amazônia foram encontrados por (Stark *et al.*, 2012; Stark *et al.*, 2015). Portanto, a maior proporção do IAF nos estratos inferiores dessas florestas não pode ser relacionada às castanheiras, que sempre apresentam as copas acima dessa altura. Apesar da ocorrência de diferentes densidades de castanheiras, sempre predomina maior densidade foliar nas plantas do sub-bosque e estratos inferiores. Isso pode ser reflexo da necessidade dessas plantas, que recebem menos radiação, desenvolverem mecanismos como aumento da quantidade, tamanho e posição das folhas, para ampliar a capacidade fotossintética (Smith *et al.* 1992, Wirth *et al.* 2001, Jardim *et al.* 2007).

A interação entre IAF e abundância de castanheira em todas as florestas com castanheiras nos diferentes estados, mostrou que existe correlação positiva entre essas duas variáveis, principalmente nos estratos superiores, acima de 27 m. Isso indica que a área foliar desses estratos superiores pode ser associada com a abundância de castanheiras. Por outro lado, houve uma relação negativa no segundo estrato (8 a 18 m), mas que pode ser explicada pelo claro efeito local na floresta do Estado do Amazonas, que apresenta menores densidades de castanheiras e os maiores IAFs nesse estrato.

As áreas avaliadas em escala local com tipologias florestais diferentes apresentaram padrões de altura média semelhantes, em torno de 30 m. Também não houve diferenças entre os IAFs, IV, V e IV + V, nos estratos da superfície do dossel.

O fato dessas duas áreas apresentarem resultados sem diferenças na estrutura superior do dossel, pode estar relacionada à quantidade de castanheiras na área de transição, visto que há maior abundância da espécie. Conseqüentemente, isso aumenta o IAF nos estratos superior e emergente, e o porte da altura dessa vegetação, uma vez que a castanheira é uma espécie de grande porte, e compensa a baixa probabilidade da distribuição das alturas nesse estrato I da transição savana/floresta.

Apesar de não haver diferenças nas médias das alturas e IAFs superiores, a distribuição da densidade foliar ao longo do perfil vertical foi diferente. A tipologia de transição savana/floresta contém a maior parte da vegetação no estrato intermediário, diferente da floresta densa, que concentra área foliar nos estratos inferiores. Isso corrobora a hipótese de que as duas áreas têm estrutura de dossel ao longo do perfil vertical bem diferentes. Na área de transição há um pico de acúmulo de densidade foliar próximo dos 20 m de altura, que pode ser devido às copas das árvores dominadas que se encontram nesse estrato. Isso é confirmado pelas maiores médias do IAF nos estratos III e IV (19 a 35 m) na transição savana/floresta, que também reflete a maior abundância de castanheiras, com altura média em torno de 30 m.

O dossel da área de floresta na transição com a savana é menos rugoso e mais homogêneo, pois a abundância de castanheira pode ter estabelecido um padrão de uniformidade maior na altura dessa vegetação. A castanheira é uma das poucas espécies de grande porte que conseguiu se estabelecer nessas áreas de savana, onde as castanheiras apresentam distribuição diamétrica com pouca variação, indicando que podem ter se originado de um mesmo evento no passado (Neves *et al.* 2014).

Na avaliação da associação entre abundância de castanheiras e IAF nos diferentes estratos nas áreas com tipologias diferentes, não houve nenhuma correlação na vegetação de floresta. Por outro lado, na área de transição, teve correlação forte e significativa com o estrato superior. Isso mostra que a estrutura vertical desse ecossistema é mais dependente das castanheiras do que na

área de floresta densa, onde também há ocorrência de várias outras árvores de grande porte, como os angelins.

A maior associação das castanheiras com a estrutura vertical da floresta na área de transição com a savana, permite que levantemos a hipótese de que a ilha de floresta no meio do cerrado foi formada a partir do estabelecimento inicial de castanheiras sobre a vegetação de savana. Recomenda-se que sejam realizados estudos mais específicos sobre a composição da vegetação e idade das árvores, para testar essa hipótese.

Em síntese, os sítios de florestas com castanheiras localizadas nos diferentes estados apresentam um padrão de distribuição da densidade foliar ao longo do perfil vertical, com maior concentração nos estratos inferiores. Por outro lado, a estrutura de altura é diferenciada, com as florestas localizadas no Amapá e no Pará (Amazônia Oriental) apresentando maior porte, tanto das castanheiras quanto da floresta matriz na qual elas estão inseridas.

Na comparação das diferentes tipologias (floresta densa x transição savana/floresta) em um mesmo Estado, foram encontrados resultados inversos, com diferenças ao longo do perfil vertical e semelhanças na estrutura de altura. Isso indica que a escala de análise é importante e que variações no perfil vertical de florestas com castanheiras-da-amazônia são mais dependentes da tipologia florestal do que de variações geográficas.

O uso do LiDAR terrestre mostrou ser de grande valia para execução deste estudo e sua aplicação deve ser mais incentivada para pesquisas sobre a estrutura vertical de florestas amazônicas.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao CNPq pela bolsa do estudante, à Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária (EMBRAPA), pelo apoio e financiamento do projeto MAPCAST (02.13.05.001.03).



## REFERÊNCIAS

- ABER, J. D. 1979. A method for estimating foliage-height profiles in broad-leaved forests. *The Journal of Ecology*. 67: 35-40.
- ALVARES, C. A., J. L. STAPE, P. C. SENTELHAS, J. L. DE MORAES GONÇALVES, AND G. SPAROVEK. 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 22: 711–728.
- ASNER, G. P., J. M. O. SCURLOCK, AND J. A. HICKE. 2003. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecol. Biogeogr.*, 12: 191–205.
- CONAB. 2015. Proposta de preços mínimos (safra 2015/2016). Brasília. Distrito Federal. 2: 1-159.
- ALMEIDA, D. R. A., B. W. NELSON, J. SCHIETTI, E. B. GORGENS, A. F. RESENDE, S. C. STARK, AND R. VALBUENA. 2016. Contrasting fire damage and fire susceptibility between seasonally flooded forest and upland forest in the Central Amazon using portable profiling LiDAR. *Remote Sens. Environ.* 184: 153–160.
- D'OLIVEIRA, M. V. N., S. E. REUTEBUCH, R. J. MCGAUGHEY, AND H. E. ANDERSEN. 2012. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 124: 479-491.

- DUCHELLE, A.E., M. R. GUARIGUATA, G. LESS, M. A. ALBORNOZ, A. CHAVEZ, AND T. MELO. 2012. Evaluating the opportunities and limitations to multiple use of Brazil nuts and timber in Western Amazonia. *Forest Ecology and Management*. 268: 39–48.
- ENGELBRECHT, B. M. J., AND H. M. HERZ. 2001. Evaluation of different methods to estimate understory light conditions in Tropical Forests. *Journal of Tropical Ecology*. 17:207-224.
- GAO, T., M. HEDBLOM, T. EMILSSON, AND A. B. NIELSEN. 2014. The role of forest stand structure as biodiversity indicator. *Forest Ecology and Management*. 330: 82–93.
- GUEDES, M.C., H. TONINI, L. H. O. WADT, AND K. E. SILVA. 2017. Instalação e medição de parcelas permanentes para estudos com produtos florestais não madeireiros. *In* L. H. O. Wadt, L. M. H. Santos, M. P. M. Bentes, and V. B. Oliveira (Ed.). *Produtos florestais não madeireiros- Guia Metodológico da Rede Kamukaia*, pp. 13-32. Brasília, Distrito Federal.
- HARDIMAN, B. S., G. BOHRER, C. M. GOUGH, C. S. VOGEL, AND P. S. CURTIS. 2011. The role of canopy structural complexity in wood net primary production of a maturing northern deciduous forest. *Ecology*. 92: 1818-1827.
- HAUGAASEN, J. M. T., T. HAUGAASEN, C. A. PERES, R. GRIBEL, AND P. WEGGE. 2011. Fruit Removal and Natural Seed Dispersal of the Brazil Nut Tree (*Bertholletia excelsa*) in Central Amazonia, Brazil. *Biotropica* 44: 205–210.

- HUNTER, M. O., M. KELLER, D. MORTON, B. COOK, M. LEFSKY, M. DUCEY, S. SALESKA, R. C. DE OLIVEIRA, AND J. SCHIETTI. 2015. Structural dynamics of tropical moist forest gaps. *PLoS ONE*. 10: e0132144. doi: 10.1371/journal.pone.0132144.
- IBGE. 2015. Manual técnico de pedologia. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Série Manuais Técnicos em Geociências 1, 3. ed. IBGE, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- IBGE. 2012. Manual técnico da vegetação brasileira. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Série Manuais Técnicos em Geociências 1, 2. Ed. revista e ampliada. IBGE, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- JARDIM, F. C. S., D. R. SERRÃO, AND T. C. NEMER. 2007. Efeito de diferentes tamanhos de clareiras sobre o crescimento e a mortalidade de espécies arbóreas em Moju-PA. *Acta Amazonica*. 37: 36-48.
- KOHYAMA, T. 1991. Simulating stationary size distribution of trees in rain forests. *Annals of Botany*. 68: 173-180.
- LEFSKY, M. A., W. B. COHEN, G. G. PARKER, AND D. K. HARDING. 2002. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience*. 52: 19-30.
- MACARTHUR, R. H., AND J. W. HORN. 1969. Foliage profiles by vertical measurements. *Ecology*. 50: 802–804.

- MALHI, Y., D. WOOD, T. R. BAKER, J. WRIGHT, O. L. PHILLIPS, T. COCHRANE, P. MEIR, J. CHAVE, S. ALMEIDA, L. ARROYO, N. HIGUCHI, T. J. KILLEEN, S. G. LAURANCE, W. F. LAURANCE, S. L. LEWIS, A. MONTEAGUDO, D. A. NEILL, P. N. VARGAS, N. C. A. PITMAN, C. A. QUESADA, R. SALOMAÑO, J. N. M. SILVA, A. T. LEZAMA, J. TERBORGH, R. V. MARTÍNEZ, AND B. VINCETI. 2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology*. 12: 1107–1138.
- MYERS, G. P., A. C. NEWTON, AND O. MELGAREJO. 2000. The influence of canopy gap size on natural regeneration of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) in Bolivia. *Forest Ecology and Management*. 127: 119–128.
- NEVES, E. S., M. C. GUEDES, AND E. G. RODRIGUES. 2015. Relação da produção de frutos de castanha-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) com variáveis das próprias castanheiras, em capoeira e floresta da Resex Cajari. *Biota Amazônia*. 5: 31–37.
- PALACE, M, F. B. SULLIVAN, M. DUCEY, AND C. HERRICK. 2016. Estimating Tropical Forest Structure Using a Terrestrial Lidar. *PLoS ONE*. 11: e0154115. doi:10.1371/journal.pone.0154115
- PARKER, G. G., D. J. HARDING, AND M. L. BERGER. 2004. A portable LIDAR system for rapid determination of forest canopy structure. *Journal of Applied Ecology*. 41: 755- 767.

- PERES, C. A., AND C. BAIDER. 1997. Seed dispersal, spatial distribution and population structure of Brazilnut trees (*Bertholletia excelsa*) in southeastern Amazonia. *Journal of Tropical Ecology*. 13: 595–616.
- R CORE TEAM. 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- SALOMÃO, R. P., N. A. ROSA, A. CASTILHO, AND K. A. C. MORAIS. 2006. Castanheira-do-brasil recuperando áreas degradadas e provendo alimento e renda para comunidades da Amazônia Setentrional e renda para comunidades da Amazônia Setentrional e renda para comunidades da Amazônia Setentrional. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi*. 1: 65-78.
- SALOMÃO, R. P. 2009. Densidade, estrutura e distribuição espacial de castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H. & B.) em dois platôs de floresta ombrófila densa na Amazônia setentrional brasileira. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi*. 4: 11-25.
- SCOLES, R., AND R. GRIBEL. 2012. The regeneration of Brazil nut trees in relation to nut harvest intensity in the Trombetas River valley of Northern Amazonia, Brazil,” *Forest Ecology and Management*. 265: 71–81.
- SKOVSGAARD, J. P., AND J. K. VANCLAY. 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry*, 81: 13–31. doi:10.1093/forestry/cpm041.

- SMITH, A. P., K. P. HOGAN, AND J. R. IDOL. 1992. Spatial and temporal patterns of light and canopy structure in a lowland tropical moist forest. *Biotropica*. 24: 503–511.
- SOUZA, D. R., AND A. L. SOUZA. 2004. Estratificação vertical em floresta ombrófila densa de Terra firme não explorada, Amazônia oriental. *Revista Árvore*. 28: 691–698. .
- STARK, S. C., B. J. ENQUIST, S. R. SALESKA, V. LEITOLD, J. SCHIETTI, M. LONGO, L. F. ALVES, P. B. CAMARGO, R. C. DE OLIVEIRA. 2015. Linking canopy leaf area and light environments with tree size distributions to explain Amazon forest demography. *Ecology Letters*. 18: 636–645.
- STARK, S. C., V. LEITOLD, J. L. WU, M. O. HUNTER, C. V. DE CASTILHO, V. CAROLINA, F. R. C. COSTA, S. M. MCMAHON, G. G. PARKER, M. T. SHIMABUKURO, M. A. LEFSKY, A. MICHAEL, M. KELLER, L. F. ALVES, J. SCHIETTI, Y. E. SHIMABUKURO, D. O. BRANDÃO, T. K. WOODCOCK, N. HIGUCHI, P. B. DE CAMARGO, R. C. DE OLIVEIRA, AND S. R. SALESKA. 2012. Amazon forest carbon dynamics predicted by profiles of canopy leaf area and light environment. *Ecology Letters*. 15: 1406–1414.
- SUMIDA, A., T. NAKAI, M. YAMADA, K. ONO, S. UEMURA, AND T. HARA. 2009. Ground-Based Estimation of Leaf Area Index and Vertical Distribution of Leaf Area Density in a *Betula ermanii* Forest. *Silva Fennica*. 43: 799–816.
- TABARELLI, M., AND W. MONTOVANI. 1999. Clareiras Naturais e a Riqueza de Espécies Pioneiras em Uma Floresta Atlântica Montana. *Revista Brasileira de Biologia*. 59: 251–256.

- TANG, H, AND R. DUBAYAH. 2017. Light-driven growth in Amazon evergreen forests explained by seasonal variations of vertical canopy structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 114: 2640–2644. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616943114>
- TER STEEGE, H., N. PITMAN, D. SABATIER, H. CASTELLANOS, P. V. D. HOUT, D. C. DALY, M. SILVEIRA, O. PHILLIPS, R. VASQUEZ, T. V. ANDEL1, J. DUIVENVOORDEN, A. A. DE OLIVEIRA, R. EK, R. LILWAH, R. THOMAS, J. V. ESSEN, C. BAIDER, P. MAAS, S. MORI, J. TERBORGH, P. N. VARGAS, H. MOGOLLÓN, AND W. MORAWETZ. 2003. A spatial model of tree  $\alpha$ -diversity and -density for the Amazon. *Biodiversity and Conservation*. 12: 2255–2277.
- THOMAS, E., C. A. CAICEDO, J. LOO, AND R. KINDT. 2014. The distribution of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) through time: from range contraction in glacial refugia, over human-mediated expansion, to anthropogenic climate change. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* 9: 267–291.
- WILSON, J. W. 1958. Analysis of the spatial distribution of foliage by two-dimensional point quadrats. *New Phytologist*. 59: 92–101.
- WIRTH, R., B. WEBER, AND R. J. RYEL. 2001. Spatial and temporal variability of canopy structure in a tropical moist forest. *Acta Oecologica*. 22: 1–10.

ZUIDEMA, P. A., AND R. G. A. BOOT. 2002. Demography of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) in the Bolivian Amazon: impact of seed extraction on recruitment and population dynamics. *Journal of Tropical Ecology*. 18: 1–31.



**CAPÍTULO II – MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA  
CASTANHEIRA (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) NO AMAPÁ - AMAZÔNIA ORIENTAL**

## **Modelagem da distribuição espacial da castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) no Amapá - Amazônia Oriental**

Felipe Felix Costa<sup>1</sup>, Diana C. M. Tourne<sup>2</sup>, Lucieta Guerreiro Martorano<sup>3</sup>, Ana Margarida de Castro Euler<sup>4</sup>, Marcelino Carneiro Guedes<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Biodiversidade Tropical, Universidade Federal do Amapá, Rod. Juscelino Kubitschek, KM-02, Macapá, AP, Brasil <sup>2</sup> Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil <sup>3</sup> Pesquisadora da Embrapa Amazônia Oriental/NAPT Médio Amazonas, Santarém, PA, Brasil <sup>4</sup> Pesquisador da Embrapa Amapá, Macapá, AP, Brasil

### **Resumo**

A castanheira é uma espécie endêmica da Amazônia, ocorrendo praticamente em toda a pan-amazônia. Os fatores que explicam a ocorrência das castanheiras ainda não estão completamente elucidados. Essa pesquisa testou a hipótese de que a distribuição da castanheira pode ser modelada com o algoritmo MaxEnt. O uso de técnicas mais avançadas, como modelagem MaxEnt, são fundamentais para execução dessas pesquisas. O objetivo foi testar se o algoritmo MaxEnt pode ser usado para modelar a ocorrência de castanheiras no Amapá, e se os resultados são diferentes em função do método de seleção de variáveis topobioclimáticas que entram no modelo e da escala de análise. A modelagem foi realizada em duas diferentes escalas: 1) Escala estadual, considerando, todo o Estado do Amapá; 2) Escala local, na Resex Cajari. Na seleção de variáveis, foram utilizados 3 métodos (PCA, painel de especialistas, pré-modelagem), sendo categorizadas nove (9) variáveis de entrada (3 de cada grupo: clima, contendo 28 variáveis; solos 32 variáveis; topográficas 7 variáveis). Os resultados evidenciaram que a seleção das variáveis e a escala de análise não alteraram a significância dos modelos. A modelagem potencial foi significativa em todos os modelos (valor-p <0,001 e erro de omissão próximos de 0,15). Para thresholds mínimos, na escala estadual (modelo MaxEnt) e na escala local (Modelo PCA), foram considerados os melhores, não somente pelos valores das estatísticas, mas também pelo desempenho do modelo em relação aos dados de ocorrência real da espécie. De maneira geral, a modelagem com MaxEnt foi eficaz para modelar as regiões com ocorrência real da castanheira-da-amazônia em ambas as escalas, provavelmente, pela elevada densidade de pontos de presença de castanheiras que entraram na modelagem. No entanto, ainda são necessárias novos testes e abordagens, que considerem maior rarefação dos pontos de ocorrência, informações de ausência e interações com fatores bióticos, para tentar detectar o padrão agregado de ocorrência da castanheira no sul do Amapá e melhorar a previsão de áreas potencialmente aptas para o estabelecimento das castanheiras.

Palavras-chave: modelagem MaxEnt; castanheira-da-amazônia; castanheira-do-brasil; Amapá, Resex Cajari; variáveis topo climáticas.

## 1. INTRODUÇÃO

A modelagem ambiental, como a de distribuição de espécies florestais usando o algoritmo MaxEnt, é uma ferramenta importante para realização de estudos ecológicos dessa natureza, tendo em vista a capacidade de otimização de resultados para grandes áreas, além da possibilidade de geração de cenários atuais e potenciais da distribuição da espécie (Merow et al. 2013). A modelagem também pode ser considerado um método relativamente de baixo custo, quando comparados aos métodos tradicionais existentes para verificação de ocorrência de espécie.

Existem muitos métodos de modelagem para estudos de distribuição de espécies florestais. Dentre eles, encontra-se o MaxEnt, método muito aplicado atualmente para tais estudos. O MaxEnt apresenta acurácia significativa em seus resultados gerados (Elith et al. 2011), devido sua capacidade de utilizar como variáveis de entrada nos modelos de distribuição de espécies, dados ambientais e biológicos (Phillips et al. 2006, Phillips and Dudík 2008).

A distribuição de espécies florestais no bioma amazônico pode ser associada a fatores topobioclimáticos, sendo que essa associação pode ser modelada com algoritmos como o MaxEnt, que usa a função logística para representar a relação de variáveis abióticas com a ocorrência da espécie (Elith et al. 2006; Phillips et al. 2006). Alguns trabalhos têm usado o MaxEnt para modelar com sucesso a ocorrência de algumas espécies amazônicas (Thomas et al. 2014) e a distribuição de espécies em grandes áreas (Phillips et al. 2017b, Radosavljevic and Anderson 2014, Thomas et al. 2014). No entanto, a eficiência da modelagem pode ser afetada pela escala de análise, e sua aplicação pode ser limitada em áreas com maior detalhamento espacial. Em áreas mais restritas, a variação dos fatores abióticos, como o clima, é menor, e nessa escala os fatores bióticos, como os distúrbios antrópicos, podem ser mais decisivos para a ocorrência da espécie.

Outro fator que pode afetar a modelagem é que para espécies como a castanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), cujo estabelecimento pode ser fortemente associado com fatores bióticos e antrópicos (Jorge and Peres 2005, Silvius and Fragoso 2003, Salomão 2009, Guedes et al. 2014), apenas as variáveis ambientais podem não ser suficientes para explicar os padrões de ocorrência.

Determinar quais padrões estão associados à distribuição da castanheira, torna-se de grande valia para melhor compreensão da dinâmica de distribuição que a espécie apresenta

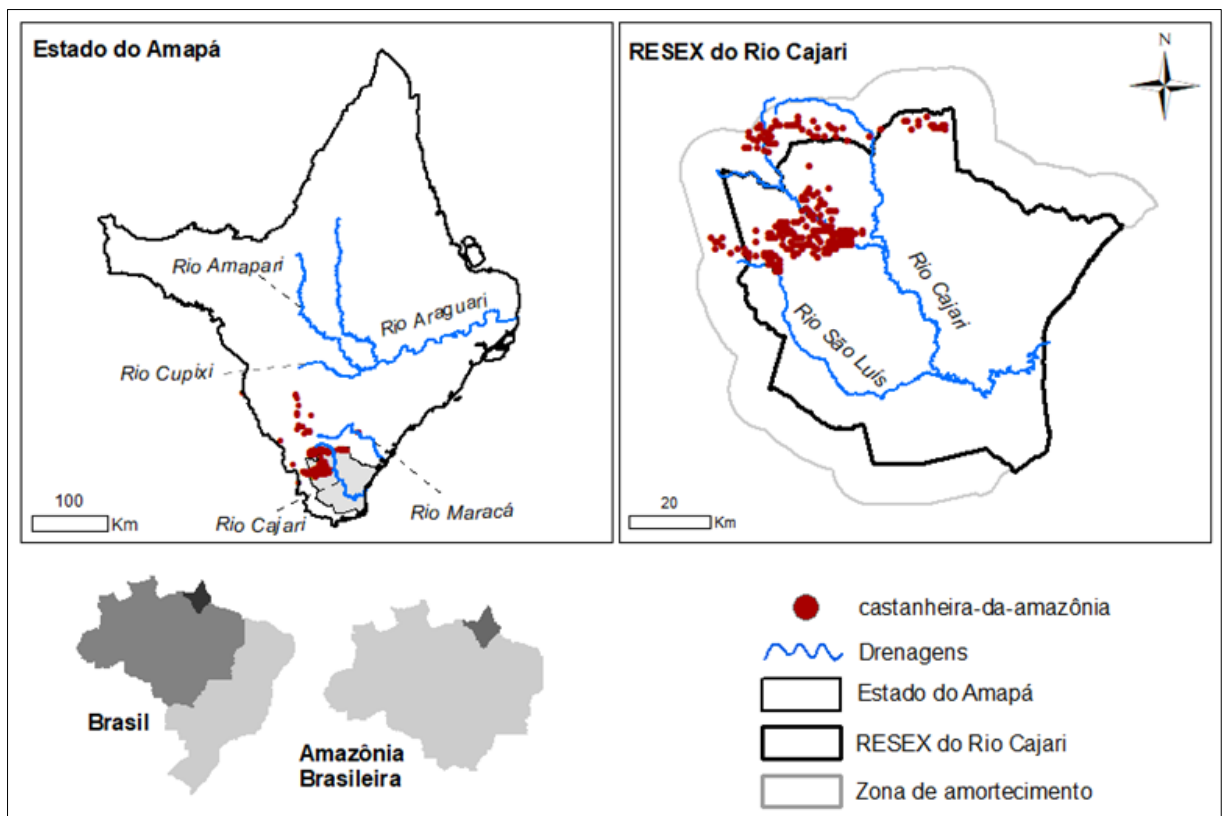
atualmente na Amazônia, visto que se trata de uma espécie de grande interesse e potencial econômico.

Esse capítulo teve como objetivo analisar a distribuição da castanheira-da-amazônia associada aos fatores edafoclimáticos, por meio da modelagem com algoritmo MaxEnt, em duas escalas diferentes: estadual - Estado do Amapá e local - Resex Cajari, verificando se o método de seleção de variáveis afeta a acurácia da modelagem.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

Essa pesquisa foi realizada em duas escalas diferentes: 1) Escala estadual, envolvendo todo o Estado do Amapá; 2) Escala local, na Resex Cajari e sua zona de entrono (10 km), localizada na região Sul do Estado do Amapá (Figura 1).



**Figura 1** – Localização das áreas de estudo – Estado do Amapá e Resex do Rio Cajari, com as principais redes de drenagem e pontos de ocorrência das castanheiras.

A cobertura do solo do Amapá apresenta as seguintes fisionomias vegetais: manguezal, floresta de várzea, floresta de terra firme, floresta de transição, cerrado e campo de várzea (Rabelo et al. 2008). A floresta ombrófila densa de terra firme é o ecossistema mais extenso do Estado e o ambiente principal de ocorrência da castanheira. No Amapá, há registro de ocorrência das espécie na parte sul do Estado, principalmente nas áreas de floresta de terra firme, porém, há ocorrência também em tipologia florestal de transição savana/floresta.

A atividade extrativista de exploração da castanha está concentrada nas regiões sul e sudoeste do Amapá, abrangendo três municípios: Mazagão, Vitória do Jari e Laranjal do Jari. Tendo também exploração próximo a região do Cupixi, centro oeste do Estado. Devido a região Sul do Estado apresentar potencial para atividades extrativistas, foram criadas Unidades de Conservações de Uso Sustentável (Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Rio Iratapuru e Reserva Extrativista do Rio Cajari - RESEX Cajari).

A RESEX Cajari tem uma área de 532.397,20 hectares, abrangendo partes dos três municípios da região Sul do Amapá. Foi criada para promover a atividade de extrativismo de produtos florestais' madeireiros e não madeireiros, pelas comunidades locais residentes na região (Brasil 1990). A sua região é composta por ecossistemas de terra firme, como floresta ombrófila densa de grande porte, área de savana, transição savana/floresta e floresta de várzea. A área onde predomina a ocorrência das castanheiras na Resex, encontra-se no alto cajari, uma das principais regiões do Estado que apresenta relevos acidentados.

O clima do Amapá e da Resex é classificado como clima tropical de monções (Am), com duas estações bem definida, período chuvoso (Janeiro a Junho) e período menos chuvoso (Julho a Dezembro) (Alvares et al. 2014; Rabelo et al. 2008).

## 2.2 COLETA DE DADOS

### 2.2.1 *Variáveis ambientais*

Foram selecionadas, para cada modelo, nove variáveis topobioclimáticas, sendo as três principais variáveis de cada grupo: **clima** com 28 variáveis; **solos** com 32 variáveis e; **topográficas** com 7 variáveis. Assim, foi padronizado o número de variáveis que entrou em cada teste de modelagem realizado. As informações referente às variáveis ambientais foram adquiradas nas seguintes bases de dados: a) Consortium de informação geográfica (CGIAR-CSI), que contém variáveis de evapotranspiração e aridez; b) WorldClim, com variáveis bioclimáticas, como: precipitação pluvial, temperatura máxima, mínima, média do ar, umidade relativa do ar e outras variáveis derivadas; c) United States Geological Survey (USGS), modelo global de elevação e; d) World soil information (ISRIC), com informações do uso do solo até o nível quatro de profundidade (60 cm).

Todas essas bases fornecem os arquivos em formato raster com resolução de, aproximadamente, 1 km. As informações estão disponíveis em um raster abrangendo todo o

globo terrestre. Desta forma, foi feito um recorte de todas as variáveis ambientais para as áreas de interesse (Estado do Amapá e Resex do Rio Cajari). Utilizou-se para fazer o recorte, a extensão “LEEC\_SDM\_Toolbox” no software ArcGIS v.10.1.

Após o recorte de todas as variáveis ambientais dos diferentes grupos (climáticas, solos, e topográficas) para as duas escalas, foram selecionadas as variáveis que melhor poderiam explicar a distribuição da castanheira. Para a seleção das variáveis ambientais, considerando cada grupo topobioclimático (clima, solo e topografia) separadamente, foram utilizados três métodos: 1) análise de componentes principais (ACP), executada no software R versão 3.4.3 R Core Team (2017), selecionando as três variáveis com maior contribuição para explicar a variância nos dados dentro de cada conjunto raster; 2) por meio de Painel de Especialistas, profissionais da área que realizam pesquisas sobre a ecologia da castanheira, indicando quais variáveis dentre as que estão disponíveis, podem ser mais associadas à distribuição da espécie. Nesse método, utilizou-se as mesmas variáveis para ambas as escalas; 3) através de uma pré-modelagem realizada separadamente para cada grupo das variáveis topobioclimáticas, executada no MaxEnt. Esse método levou em consideração a variável de ocorrência.

### *2.2.2 Variável ponto de ocorrência da castanheira*

Para a seleção dos pontos de ocorrência da castanheira-da-amazônia para a escala regional, Estado do Amapá, foi considerada na modelagem, a base de dados do Projeto Carbono Cajari, o qual realizou o mapeamento participativo de mais de 70.000 castanheiras distribuídas em aproximadamente 300 castanhais, em 13 comunidades da Resex do Rio Cajari, além de outros pontos que estão distribuídos em outras áreas do Estado, que estão fora dos limites da Reserva. Para a escala local, Resex, foram utilizados somente os pontos adquiridos no Projeto Carbono Cajari. Foi aplicada técnica de rarefação, variando a distância (1 km, 2 km e 3 km) entre os pontos, para selecionar as castanheiras que entraram nas modelagens para ambas as áreas.

## 2.3 ANÁLISES DOS DADOS

Após a seleção das 9 variáveis ambientais (as 3 principais de cada grupo – clima, solo, topográficas) e dos pontos de ocorrência da castanheira para alimentar o modelo, foi realizada a modelagem da distribuição da espécie no software Maxent v. 3.4.1 (Phillips et al. 2009,

Phillips et al. 2017). O modelo utilizado foi o logístico, que considera somente dados de presença da espécie, correlacionando a localização dos pontos de ocorrência da espécie com as variáveis ambientais inseridas (Phillips and Dudik 2008).

Para cada escala considerada, foram realizadas nove diferentes modelagens da distribuição da castanheira, sendo três modelos: 1) modelo de distribuição da ocorrência para as variáveis selecionada pela ACP; 2) modelo de distribuição pelas variáveis determinadas no painel de especialistas e; 3) modelo com as variáveis derivadas da pré-modelagem no MaxEnt. Para cada método de seleção de variáveis, três modelagens foram testadas com as diferentes rarefações.

Os parâmetros utilizados nas modelagens foram: algoritmo logístico; 30 % dos pontos para teste e validação; 10 replicações tipo bootstrap e máximo de 5.000 interações. As demais configurações foram aquelas padrões do software MaxEnt. A quantidade de pontos de entrada em cada rarefação foi: 1 km (426 na escala estadual e 395 na local), 2 km (140 na escala estadual e 120 na local) e 3 km (92 na escala estadual e 74 na local).

Foi realizada comparação dos resultados das distribuições geradas pela modelagem para as diferentes escalas, métodos de seleção de variáveis e rarefação, por meio da significância e acurácia (AUC) de cada modelo e análise dos erros de omissão.

Para análise visual das áreas de distribuição da espécie modeladas, foi utilizada a base de dados do mapeamento das castanheiras do Projeto Carbono Cajari, somente para a escala local, e informações ecológicas da região, para ambas as escalas.

A fim de melhor representar os resultados da modelagem, foram gerados mapas das distribuições da castanheira-da-amazônia de todos os modelos com threshold máximo para as duas escalas espaciais, utilizando software de SIG para confecção dos mapas.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variáveis selecionadas foram diferentes entre as escalas de avaliação (Estado do Amapá e Resex Cajari) e entre os métodos de seleção (PCA, Painel de Especialistas (PE) e MaxEnt), conforme pode ser observado na (Tabela 1).

**Tabela 1** – Variáveis selecionadas com análise de componentes principais (PCA), Painel de Especialistas (P.E) e pré modelagem com o Maxent, para utilização na modelagem de áreas potenciais de ocorrência de castanheira-da-amazônia.

Método	Variáveis	Estado do Amapá			RESEX do Rio Cajari		
PCA	Clima	Bio_9	Bio_13	Pet_5	Pet_anual	Bio_6	Bio_19
	Solo	Ph_2	Silte_3	Argila_1	Ctc_1	Areia_4	Crffvol_1
	Topo	Cti	Slope	Aspecto	Cti	Spi	Aspecto
P.E	Clima	Bio_17	Bio_7	Bio_13	Bio_17	Bio_7	Bio_14
	Solo	Crffvol_4	Carbono_1	Ctc_2	Crffvol_4	Carbono_1	Ctc_2
	Topo	MDE	Slope	Fdirt	MDE	Slope	Fdirt
MaxEnt	Clima	Bio_19	Bio_3	Bio_13	Bio_16	Bio_13	Bio_19
	Solo	Argila_1	Ctc_2	Carbono_1	Crffvol_3	Silte_1	Crffvol_4
	Topo	MDE	Slope	Spi	MDE	Slope	Cti

**Clima:** *Bio\_3* = Isotermalidade ( $Bio_2/Bio_7 (* 100)$ ); *Bio\_6* = temperatura mínima do mês mais frio; *Bio\_7* = faixa anual de temperatura ( $Bio_5 - Bio_6$ ); *Bio\_9* = média de temperatura do trimestre mais quente; *Bio\_13* = precipitação do mês mais chuvoso; *Bio\_14* = precipitação do mês mais seco; *Bio\_16* = precipitação do trimestre mais chuvoso; *Bio\_17* = precipitação do trimestre mais seco; *Bio\_19* = precipitação do trimestre mais frio; *Pet\_5* = potencial de evapotranspiração do mês de maio; *Pet\_anual* = potencial de evapotranspiração anual; **Solo:** *Areia\_4* = areia (30 – 60 cm); *Argila\_1* = argila (0 – 5 cm); *Carbono\_1* = carbono (0 – 5 cm); *Ctc\_1* = capacidade de troca de cátion (0 – 5 cm); *Ctc\_2* = capacidade de troca de cátion (5 – 15 cm); *Crffvol\_1* = % de fragmentos grosseiros (0 – 5 cm); *Crffvol\_3* = % de fragmentos grosseiros (15 – 30 cm); *Crffvol\_4* = % de fragmentos grosseiros (30 – 60 cm); *Ph\_2* = pH em H<sub>2</sub>O (5 – 15 cm); **Topográficas:** *Aspecto* = aspecto do terreno; *Cti* = índice topográfico composto; *Fdirt* = direção do fluxo; *MDE* = modelo digital de elevação; *Slope* = declividade; *Spi* = índice de potência de fluxo.

Considerando todos os métodos de seleção, na escala estadual foram selecionadas mais variáveis diferentes de clima, enquanto na escala local, para a Resex, foram selecionadas mais variáveis diferentes de solos. Isso indica que para modelagens em escalas geográficas mais ampliadas, as variáveis climáticas apresentam maior variabilidade e podem ser mais interessantes. Já em escalas com maior nível de detalhamento, atributos do solo apresentam maior variabilidade, ampliando o número de variáveis que podem ser importantes para a modelagem da distribuição da espécie. Em relação ao local estudado, Resex Cajari, as

delimitações dos solos são bem definidas, apresentando diferentes classes de solo, inclusive, em escalas menores que 1 km.

Assim, a probabilidade de seleção de variáveis diferentes em função da escala, também aumenta, como observado para o grupo solos. Nos dois métodos (PCA e MaxEnt), somente o grupo solos não teve variáveis repetidas entre as escalas, considerando as três variáveis mais importantes de cada grupo em cada método. As variáveis relacionadas com a porcentagem de fragmentos grosseiros no solo e teor de areia só foram selecionadas na escala local – Resex, com exceção do PE, que selecionou as mesmas variáveis.

Analisando em relação aos métodos na mesma escala de análise, no Estado do Amapá, a única variável que entrou em todos os métodos foi declividade. Na escala local, não teve variável presente em todos métodos, se considerada a mesma profundidade do solo. A variável fragmentos grosseiros maiores > 2 mm, foi selecionada em todos os métodos da escala local, quando consideradas as diferentes profundidades.

As variáveis mais frequentes em todos os métodos e escalas foram, grupo topográficas: declividade, seguida de MDE. No grupo clima, foram: precipitação do mês mais chuvoso e precipitação do trimestre mais frio. No grupo solo foram: fragmentos grosseiros (> 2mm 30 – 60 cm), matéria orgânica e capacidade de troca de cátion (Tabela 1). A variação na escala de análise é importante para seleção de variáveis, visto que foram observados resultados distintos nas duas escalas, em ambos os métodos não subjetivos.

Em relação aos resultados da modelagem, todos os modelos alimentados com as variáveis ambientais selecionadas nos três métodos e em ambas as escalas, independente da rarefação dos pontos, apresentaram valor significativo ( $p\text{-value} < 0,001$ ) e excelente acurácia (AUC) (Tabela 2). Em todas as modelagens da escala estadual, o erro de omissão ficou próximo de 0,15 para a maioria dos limites (thresholds), enquanto na escala local, o thresholds do limiar 10%, rarefação 2 e 3 km, ultrapassaram o limite considerado adequado (0,2) para uma boa modelagem. Observa-se também que as modelagens com maior distância entre os pontos, rarefação de 2 km e 3 km, em ambas as escalas, apresentaram maior erro de omissão. A análise das diferenças entre as escalas, demonstra que o erro é maior na escala local - Resex Cajari, que tem maior nível de detalhamento.

**Tabela 2** – Principais resultados da modelagem da distribuição potencial de castanheira-da-amazônia com algoritmo MaxEnt, considerando diferentes métodos de seleção de variáveis: (PCA, Painel de especialistas e pré-modelagem com MaxEnt); duas escalas de análise: 1) Estado do Amapá e 2) Resex do Rio Cajari e; três níveis de rarefação: distância entre os pontos de ocorrência (1km, 2km e 3km).

<b>Área</b>									
<b>Estado do Amapá</b>									
Rarefação	1 km			2 km			3 km		
Seleção de variáveis	PCA	P.E	M.Ent	PCA	P.E	M.Ent	PCA	P.E	M.Ent
Nº p/ criar modelos	299	299	299	98	98	98	65	65	65
Nº p/ validar modelos	127	127	127	42	42	42	27	27	27
AUC	0,973	0,977	0,977	0,972	0,981	0,98	0,973	0,979	0,973
SD AUC	0,003	0,002	0,002	0,006	0,004	0,005	0,007	0,005	0,005
Valor do threshold mín.	0,017	0,017	0,009	0,037	0,056	0,023	0,054	0,081	0,114
Erro de omissão	0,004	0,004	0,002	0,022	0,012	0,012	0,019	0,019	0,019
valor-p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Valor do threshold 10 %	0,372	0,375	0,381	0,311	0,313	0,32	0,337	0,333	0,32
Erro de omissão	0,136	0,121	0,127	0,176	0,176	0,179	0,152	0,179	0,167
valor-p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Valor do threshold máx.	0,111	0,13	0,147	0,089	0,129	0,093	0,183	0,162	0,162
Erro de omissão	0,031	0,022	0,023	0,027	0,029	0,026	0,033	0,011	0,004
valor-p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

<b>Área</b>									
<b>RESEX do Rio Cajari</b>									
Rarefação	1 km			2 km			3 km		
Seleção de variáveis	PCA	P.E	M.Ent	PCA	P.E	M.Ent	PCA	P.E	M.Ent
Nº p/ criar modelos	277	277	277	84	84	84	52	52	52
Nº p/ validar modelo	118	118	118	36	36	36	22	22	22
AUC	0,884	0,909	0,913	0,875	0,895	0,889	0,843	0,857	0,858
SD AUC	0,01	0,009	0,008	0,021	0,018	0,019	0,029	0,029	0,027
Valor do threshold mín.	0,073	0,032	0,034	0,11	0,106	0,094	0,198	0,157	0,191
Erro de omissão	0,009	0,001	0,003	0,042	0,02	0,017	0,059	0,046	0,064
valor-p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Valor do threshold 10 %	0,308	0,269	0,259	0,335	0,31	0,319	0,383	0,37	0,352
Erro de omissão	0,164	0,152	0,142	0,225	0,183	0,206	0,227	0,236	0,209
valor-p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Valor do threshold máx.	0,251	0,222	0,202	0,259	0,259	0,222	0,326	0,295	0,337
Erro de omissão	0,077	0,081	0,069	0,095	0,081	0,07	0,1	0,086	0,123
valor-p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

A escala regional apresentou AUC superior à escala local, entre os mesmos modelos. Os modelos das PCAs, em ambas as escalas, tiveram menor AUC quando comparados aos do PE e do MaxEnt. Em relação à rarefação dos pontos, na escala regional não se observou grandes diferenças nas AUC entre as distâncias dos pontos. Enquanto que na local, quanto maior a distância entre os pontos, menor a AUC.

O método de seleção de variáveis pela PCA se mostrou menos eficientes que os PE e MaxEnt para realizar a modelagem da distribuição da castanheiras, visto que não leva em consideração as características específicas que podem influenciar na ocorrência da espécie, considerando somente a variabilidade das informações dentro do conjunto de dados das variáveis topobioclimáticas de entrada. O modelo PE mostrou ser eficiente, pois o modelo é alimentado com dados que podem ter associação com a espécie, conforme conhecimento dos pesquisadores que trabalham com a espécie. A pré-modelagem com o MaxEnt, em cada grupo de variáveis separadamente, também apresenta bons resultados. Porém, deve-se considerar o fato de ter tido informações importantes para selecionar as variáveis, como a localização da ocorrência da espécie, e que essa modelagem pode ser direcionada pela densidade dos pontos de ocorrência.

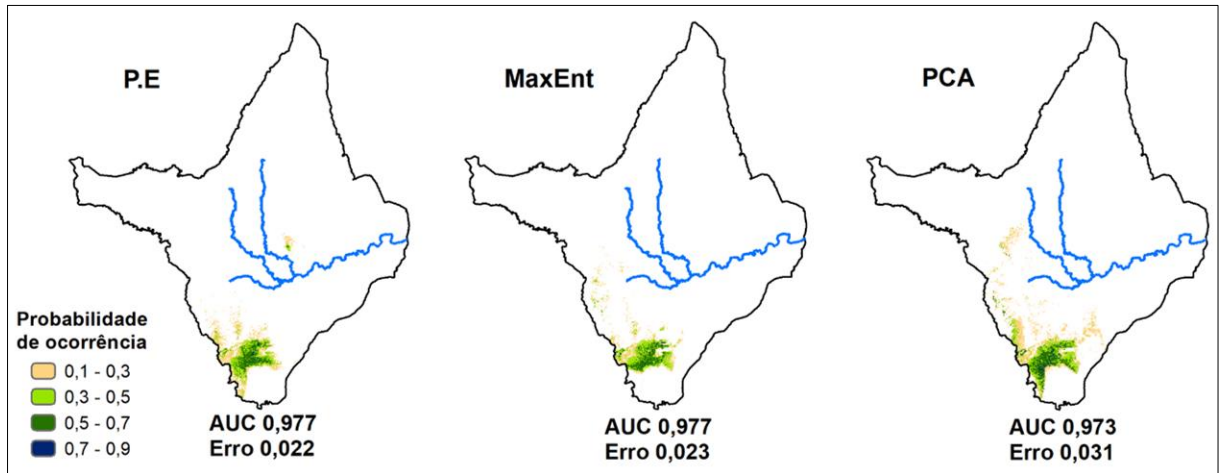
As variáveis climáticas, nas modelagens com rarefação de 1 km, que mais contribuíram com modelagem de distribuição das castanheiras para a escala estadual, foram: precipitação do mês mais chuvoso (44,5%) no modelo PCA e (39%) no PE, e precipitação do trimestre mais frio (32,5%) no modelo pré-modelagem MaxEnt (Tabela 3). Nota-se que a variável que mais contribuiu para o modelo PCA representou quase metade da variabilidade explicada pelo modelo, mostrando que a precipitação é uma variável importante que pode ajudar a distinguir as áreas de ocorrência e potencialmente aptas para a castanheira no Amapá. Observa-se ainda que os modelos tiveram contribuições de variáveis climáticas mais do período chuvoso.

**Tabela 3** – Porcentagem de contribuição das variáveis mais importantes, dentre as nove pré selecionadas, para explicar a variabilidade na modelagem da distribuição da castanheira-da-amazônia no Amapá, para cada método de seleção das variáveis de entrada no modelo.

Modelagem com rarefação 1 km					
PCA		PE		MaxEnt	
Variáveis	%	Variáveis	%	Variáveis	%
Bio_13	44,5	Bio_13	39	bio_19	32,5
Pet_5	36,4	Bio_17	18,2	bio_13	26,7
Argila_sd1	10	Bio_7	15,8	bio_3	20,6
Total	90,4	Total	73	Total	79,8

**Clima:** *Bio\_3* = Isotermalidade ( $Bio_2/Bio_7 (* 100)$ ); *Bio\_7* = faixa anual de temperatura ( $Bio_5 - Bio_6$ ); *Bio\_13* = precipitação do mês mais chuvoso; *Bio\_17* = precipitação do trimestre mais seco; *Bio\_19* = precipitação do trimestre mais frio; *Pet\_5* = potencial de evapotranspiração do mês de maio; **Solo:** *Argila\_sd1* = argila (0 – 5 cm).

As modelagens, com exceção do PE, não projetaram a ocorrência da espécie para a região noroeste e central do Estado do Amapá (Figura 2), onde chove mais durante o ano e ocorrem as maiores precipitações no período chuvoso.



**Figura 2** – Representação da modelagem da distribuição de castanheira-da-amazônia no Estado do Amapá com algoritmo MaxEnt, thresholds máximos e métodos de seleção (PCA=análise de componentes principais; PE=painel de especialistas; MaxEnt=pré modelagem com MaxEnt) das variáveis de entrada no modelo.

Na opinião dos especialistas, as variáveis do período seco podem ser mais importantes para determinar a ocorrência da espécie, pois o estresse hídrico pode influenciar na ocorrência e estabelecimento de espécies florestais. Assim, o quantitativo de chuvas durante o período seco, pode ser uma variável mais importante do que a precipitação no período mais chuvoso.

De forma geral, o PE teve contribuições mais proporcionais entre as variáveis, evidenciando que tal método leva em consideração mais variáveis que podem explicar a distribuição da castanheira, de maneira mais equilibrada, pois boa parte das variáveis tiveram contribuições significativas.

Além das variáveis de clima que mais contribuíram na modelagem da castanheira na escala estadual, também observou-se a presença de variáveis de solo. No modelo PCA foram as variáveis mais relacionadas a textura (granulometria), enquanto nos modelos PE e MaxEnt foram aquelas ligadas à matéria orgânica no solo. Porém, esse resultado está atrelado às variáveis de entradas pré-selecionadas antes dos modelos, visto que a PCA selecionou mais variáveis de textura, enquanto que o PE e MaxEnt selecionaram diferentes tipos, textura, matéria orgânica e química do solo.

No geral, as variáveis ligadas à topografia não tiveram contribuições importantes para nenhuma das modelagens realizadas, apesar da proporcionalidade entre os grupos (clima, solo e topografia) durante a seleção das variáveis de entrada.

Dentre os diferentes modelos gerados a partir dos resultados da modelagem para a escala estadual, mostrados na (Figura 2), foi escolhido o threshold máximo para representar a distribuição da castanheira no Amapá. O modelo PE foi o que teve menor erro de omissão e maior AUC, junto com modelo MaxEnt (AUC 0,977), e portanto foi considerado, estatisticamente, o mais adequado. Porém, este previu ocorrência de castanheira para região central acima do rio Araguari, onde até o momento não se tem relatos de ocorrências da espécie, mas que pode ter condições climáticas parecidas com a área de ocorrência e ser uma área potencialmente apta à espécie.

O modelo MaxEnt foi mais realista em relação à distribuição estadual da espécie, e previu castanheira em regiões que podem realmente ter ocorrência da espécie. Ressalta-se que os dados de ocorrência da espécie inseridos no modelo são de fontes confiáveis. Além disso, o conhecimento dos pesquisadores que estudam a espécie no Amapá, indicam que há probabilidade da espécie ocorrer nas áreas apontadas, principalmente pelo modelo MaxEnt, até as proximidades do rio Cupixi.

No geral, a modelagem a partir das variáveis selecionadas pela PCA foi a que apresentou menor acurácia e maior erro. Essa modelagem projetou áreas depois da bacia do rio Araguari como áreas de potencial ocorrência, assim como áreas de savanas próximas à região dos pontos de presença, que têm condições ambientais distintas, e onde não há registro de ocorrência das castanheiras. Mas esse modelo também foi significativo e pode ser considerado adequado à realidade atual de distribuição da espécie no Amapá, na medida em que não projetou a potencial ocorrência da espécie para as áreas mais ao norte e oeste do Estado, onde até o momento não foi registrada ocorrência da espécie.

Na modelagem considerando os recortes para a escala local - Resex Cajari, as variáveis climáticas também foram as que mais contribuíram para a modelagem. As três variáveis do grupo de clima selecionadas para entrada em cada modelo, sempre estiveram entre as que mais contribuíram para cada modelagem. Aquelas com maior contribuição foram: precipitação do trimestre mais frio (38,6%) no modelo PCA, precipitação do mês mais chuvoso (31,3 %) no modelo PE e MaxEnt (31,6%) (Tabela 4).

**Tabela 4** – Porcentagem de contribuição das variáveis mais importantes para explicar a variabilidade na modelagem da distribuição da castanheira-da-amazônia na RESEX Cajari (escala local), para cada método de seleção das variáveis de entrada no modelo.

PCA		PE		MaxEnt	
Variáveis	%	Variáveis	%	Variáveis	%
Bio_19	38,6	Bio_13	31,3	Bio_13	31,6
Pet_anual	31,5	Bio_14	22,7	Bio_19	25,8
Areia_sd4	7,5	Bio_17	17,2	Bio_16	21,2
Total	77,6	Total	71,2	Total	78,6

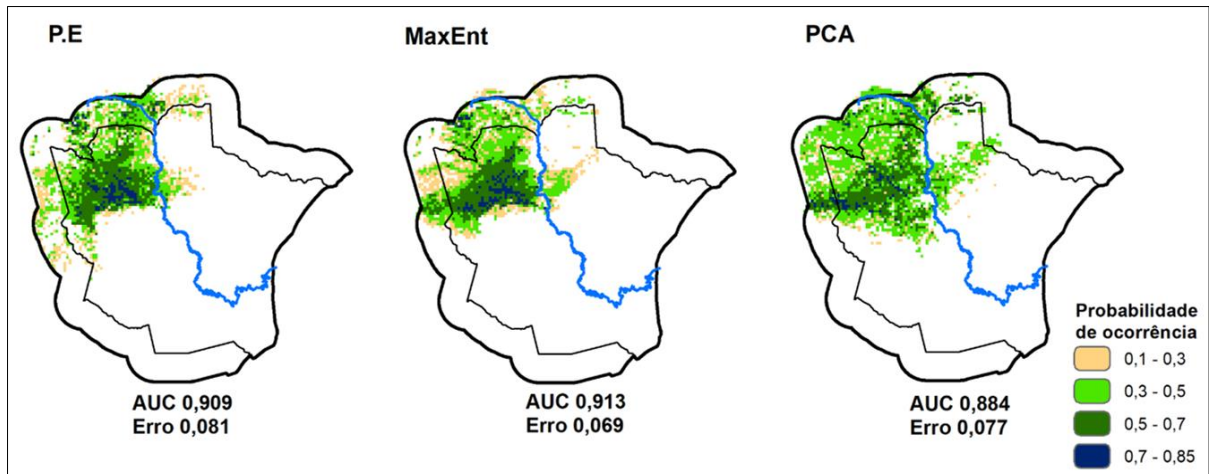
**Clima:** *Bio\_13* = precipitação do mês mais chuvoso; *Bio\_14* = precipitação do mês mais seco; *Bio\_16* = precipitação do trimestre mais chuvoso; *Bio\_17* = precipitação do trimestre mais seco; *Bio\_19* = precipitação do trimestre mais frio; *Pet\_anual* = potencial de evapotranspiração anual; **Solo:** *Areia\_sd4* = areia (30 – 60 cm).

Além das variáveis de precipitação e temperatura, a variável potencial de evapotranspiração anual, modelo PCA, mostrou ser eficiente para avaliar a variabilidade ambiental existente na Resex, que pode ser associada à distribuição potencial da castanheira, tendo em vista as distintas fitofisionomias existentes na região. Essa variável acaba tendo valores de evapotranspiração diferentes entre as tipologias, e conseqüentemente, torna-se importante para explicar a ocorrência da castanheira, que ocupa ambientes com maior evapotranspiração.

A amplitude de temperatura não apareceu entre as variáveis com maior contribuição em nenhum dos modelos nessa escala mais restrita, diferente do que ocorreu na escala estadual. O modelo digital de elevação e fragmentos grosseiros, foram considerados importantes, tanto no painel de especialistas quanto na pré-modelagem MaxEnt.

A ocorrência das castanheiras está concentrada na região mais elevada da Resex, em altitudes acima de 100 m, e isso foi importante para que os modelos não projetassem a ocorrência da espécie para as áreas do médio e baixo Cajari, próximas ao canal norte do rio Amazonas.

Os modelos gerados para a escala local com distância entre os pontos de 1 km foram os mais adequados, não só do ponto de vista estatístico, mas também biológico e visual de sua projeção (Figura 3). Foram selecionados os limiares máximos, visto que foi o que melhor representou a área adequada de ocorrência da castanheira para a Resex Cajari. Os modelos MaxEnt e PE obtiveram maior AUC e menor erro comparado ao modelo PCA. O PE não previu ocorrência de castanheira para a região onde encontra-se a ilha de floresta na área de transição savana/floresta, enquanto o PCA extrapolou as áreas de ocorrência quando visto com as castanheiras plotadas.



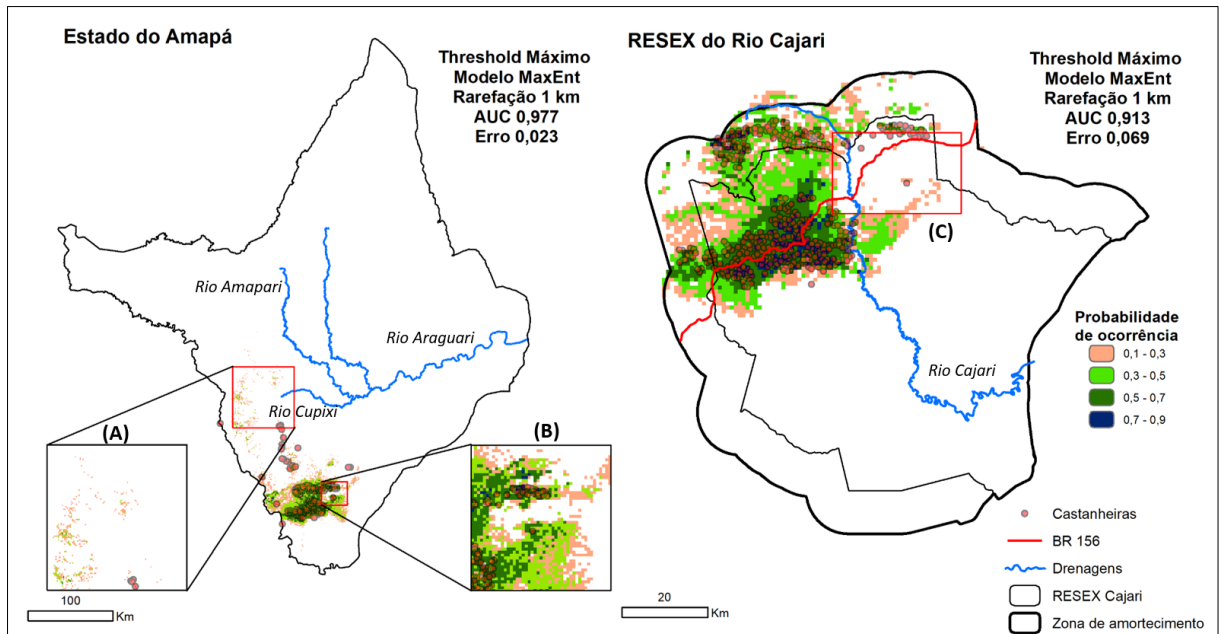
**Figura 3** – Representação da modelagem da distribuição de castanheira-da-amazônia na Resex Cajari (escala local) com algoritmo MaxEnt, thresholds máximos e métodos de seleção (PCA=análise de componentes principais; PE=painel de especialistas; MaxEnt=pré modelagem com MaxEnt de cada grupo – clima, solo, topografia) das variáveis de entrada no modelo.

Na comparação com os thresholds máximos entre os modelos da escala local RESEX, o resultado do modelo MaxEnt foi considerado o mais adequado para explicar a ocorrência potencial das castanheiras, pois além de ter AUC superior aos outros e menor erro de omissão, identificou parte das áreas de transição savana/floresta, com baixa probabilidade, como aptas às castanheiras.

A modelagem com o threshold máximo se mostrou adequada para representar os resultados da ocorrência da castanheira em ambas as escalas. O modelo gerado a partir da pré-modelagem MaxEnt com threshold máximo foi considerado o melhor modelo para representar a distribuição atual da castanheira na escala estadual e local.

Na escala estadual, considerou-se para essa escolha, a estatística e sua capacidade de prever a ocorrência da espécie na região próxima ao rio Cupixi (Figura 3, letra A), onde se tem relatos de presença da castanheira. Além disso, esse modelo não projetou a ocorrência na área de savana “stricto sensu” (Figura 3, letra B), onde sabe-se que a espécie não ocorre. Apesar de ocorrer castanheira em área de transição savana/floresta devido à capacidade de adaptação da espécie a esse ecossistema, não é observada a ocorrência de castanheira, principalmente, em área de savana campo limpo. Da mesma forma, isso vale também para a região norte do estado, onde não houve previsão de ocorrência. Assim, esse modelo foi o mais condizente com a realidade atual da região.





**Figura 3** – Representação da modelagem da distribuição de castanheira-da-amazônia no Estado do Amapá (escala estadual) e na Resex Cajari (escala local) com algoritmo MaxEnt, thresholds máximos e métodos de seleção MaxEnt=pré modelagem com MaxEnt de cada grupo – clima, solo, topografia.

Para a escala local, assim como na escala estadual, o modelo com threshold máximo escolhido como o melhor modelo de distribuição atual da castanheira foi o da pré-modelagem MaxEnt. Esse modelo representou bem as áreas com maior potencial, pixel em verde escuro e azul (Figura 3 – escala local). A área de savana, (ressaltada na letra C), mostra que o modelo não previu potencial ocorrência de castanheira nessa região, e portanto está de acordo com a realidade, pois essa não é uma região onde ocorre a espécie.

No entanto, quando analisada a modelagem do potencial de áreas aptas em relação às variáveis abióticas que têm maior explicabilidade no modelo, nota-se que as áreas previstas ficam mais restritas no entorno dos pontos de ocorrência, ou seja na parte sul do Estado. Assim, percebe-se que existe uma área muito mais ampla com características climáticas semelhantes com as áreas reais de ocorrência, para a qual não houve previsão de ocorrência na modelagem (Apêndice 1).

Assim como na escala estadual, quando observado o resultado da modelagem com as variáveis que mais contribuíram na escala local, percebe que o modelo também não conseguiu prever ocorrência potencial de castanheiras para as outras áreas com as mesmas condições climáticas (Apêndice 2).

De maneira geral, a modelagem com o algoritmo MaxEnt mostrou-se eficaz para modelar as grandes áreas com ocorrência atual da castanheira-da-amazônia, tanto na escala

local - Resex Cajari, quanto na escala estadual - Estado do Amapá. No entanto, é importante ressaltar que, independente dos modelos gerados a partir de cada diferente grupo de variáveis de entrada (PCA, PE e pré-modelagem MaxEnt) e escala (Estadual e Local), todas as modelagens foram significativas estatisticamente e visualmente, dependendo do threshold. Isso mostra que a ocorrência da castanheira não pode ser associada a um grupo de variáveis edafoclimáticas, pois como visto na Tabela 1, as variáveis ambientais foram diferentes para cada modelo de seleção de variáveis. Contudo, observou-se que a densidade de pontos pode alterar mais os resultados das modelagens do que as próprias variáveis selecionadas, demonstrando que a modelagem é mais dependente dos pontos de ocorrência que entram no modelo, que podem ter contribuído mais para os bons resultados das modelagens, principalmente nos pontos com rarefação na menor distância (1 km).

#### **4. CONCLUSÃO**

De maneira geral, a modelagem com MaxEnt foi eficaz para modelar as regiões com ocorrência real da castanheira-da-amazônia em ambas as escalas, provavelmente, pela elevada densidade de pontos de presença de castanheiras que entraram na modelagem. No entanto, ainda são necessárias novos testes e abordagens, que considerem maior rarefação dos pontos de ocorrência, informações de ausência e interações com fatores bióticos, para tentar detectar o padrão agregado de ocorrência da castanheira no sul do Amapá e melhorar a previsão de áreas potencialmente aptas para o estabelecimento das castanheiras.

No caso da castanheira-da-amazônia, a modelagem utilizada não mostrou-se capaz de prever áreas potencialmente adequadas para ocorrência da espécie com base apenas nas variáveis edafoclimáticas, visto que as áreas com condições ambientais semelhantes são muito mais extensas que as áreas previstas. Logo, é possível imaginar e levantar a hipótese que a ocorrência da castanheira em castanhais agregados no Amapá esteja mais associada a outros fatores não considerados na modelagem, como os distúrbios antrópicos que favorecem o estabelecimento das castanheiras, do que aos fatores edafoclimáticos.

## REFERÊNCIAS

Brasil. 1990. Decreto N° 99.145 de 12 de Março de 1990:1–2

- Elith, J., C. H. Graham, R. P. Anderson, M. Dudik, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huettmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, L. G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. M. Overton, A. T. Peterson, S. J. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberon, S. Williams, M. S. Wisz, and N. E. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography* **29**: 129-151.
- Elith, J., C. H. Graham, R. P. Anderson, M. Dudik, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huettmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, L. G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. M. Overton, A. T. Peterson, S. J. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberon, S. Williams, M. S. Wisz, and N. E. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography* **29**: 129-151.
- Elith, J. Steven J. Phillips, Trevor Hastie, Miroslav Dudík, Yung En Chee, and Colin J. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distribution* **17**: 43-57.
- Jorge M. S. P., and C. A. Peres. 2005. Population Density and Home Range Size of Red-Rumped Agoutis (*Dasyprocta leporina*) Within and Outside a Natural Brazil Nut Stand in Southeastern Amazonia. *Biotropica* **37**: 317-321.
- Merow C., Matthew J. Smith, and John A. Silander, Jr. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* **36**: 1058–1069.
- Phillips, S. J., and M. Dudik. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* **31**: 161-175.
- Phillips S. J., Robert P. Anderson, Miroslav Dudík, Robert E. Schapire, Mary Blair. 2017. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography* **40**: 887-893

- Phillips S. J., Robert P. Anderson, Robert E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**: 231-259.
- Phillips S. J., Miroslav Dudík, Robert E. Schapire. [Internet] Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Available from url: [http://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/). Accessed on 2018-3-31.
- Phillips S. J., 2017. A Brief Tutorial on Maxent. Available from url: [http://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/). Accessed on 2018-3-31
- Phillips S. J., Miroslav Dudík, Robert E. Schapire. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. In *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning* 655-662.
- Rabelo V. R. et al. 2008. Macrodiagnóstico do estado do Amapá primeira aproximação do ZEE **3**: 139.
- Radosavljevic A. and Robert P. Anderson. 2014. Making better Maxent models of species distributions: complexity, overfitting, and evaluation. *Journal of Biogeography* **41**: 629-643.
- Salomão, R. D. P., N. de A. Rosa, A. Castilho, and K. A. C. Morais. 2006. Castanheira-do-brasil recuperando áreas degradadas e provendo alimento e renda para comunidades da Amazônia Setentrional. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* **1**: 65–78.
- Salomão, R. P. 2009. Densidade, estrutura e distribuição espacial de castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H. & B.) em dois platôs de floresta ombrófila densa na Amazônia setentrional brasileira. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* **4**:11–25.
- Silvius, K. M., and J. M. Fragoso. 2003. Red-rumped Agouti (*Dasyprocta leporina*) Home Range Use in an Amazonian Forest: Implications for the Aggregated Distribution of Forest Trees. *Biotropica* **35**: 74-83.
- Thomas, E., C. A. Caicedo, J. Ioo, and R. Kindt. 2014. The distribution of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) through time: from range contraction in glacial refugia, over human-mediated expansion, to anthropogenic climate change. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* **9**: 267-291.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

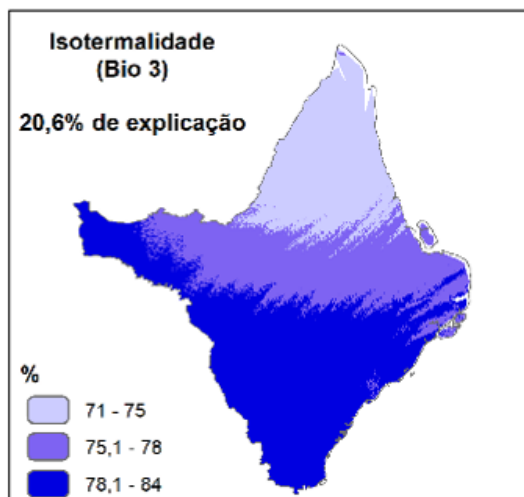
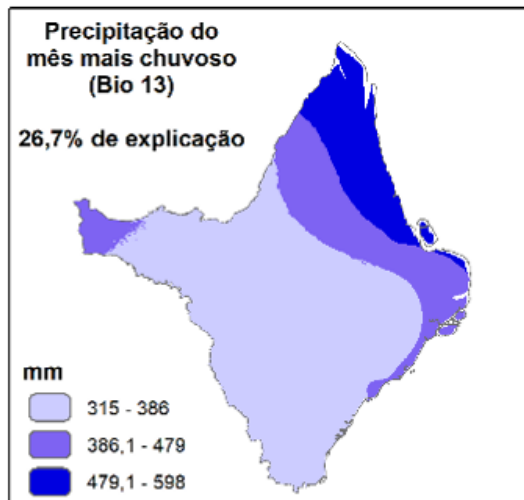
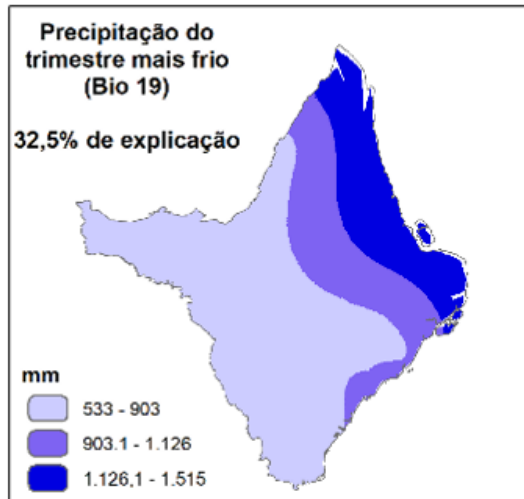
A estrutura do perfil vertical de florestas amazônicas avaliadas nos quatro estados evidenciou um padrão de densidade de área foliar nos estratos inferiores da vegetação, tendo maior parte da vegetação concentrada nesses estratos I (1 A 7 m) e II (8 a 18 m). Nas tipologias diferentes, não há o mesmo padrão, pois a área de savana concentra a maior parte da vegetação no estrato intermediário (19 a 26 m). As alturas das florestas estudadas da Amazônia são diferentes, sendo que as florestas da Amazônia oriental, assim como suas castanheiras, apresentaram porte maior que no Amazonas e Mato grosso.

Na modelagem da distribuição da castanheira, verificou-se que as seleções das variáveis ambientais de entradas nos modelos variaram entre o métodos de seleção e entre as escalas de análises. Porém, tais diferenças não diminuíram a acurácia dos modelos, visto que todos os modelos, em ambas escalas de análise, foram significativos e com erro de emição próximo de 0,15, exceto o modelo da escala local local, que teve erro  $> 0,20$ . Assim, é provável que o algoritmo MaxEnt não modele adequadamente as áreas com maior adequabilidade para a ocorrência de castanheira, pois como observado nos Anexos 2 e 3, as áreas com condições climáticas semelhantes são mais extensas, comparadas às áreas previstas nas modelagem, as quais ficaram restritas no entorno dos pontos de ocorrência.

De modo geral, pode-se dizer que os métodos empregados nessa dissertação para a avaliação da estrutura do perfil vertical de florestas amazônicas e abundância e ocorrência da castanheira, mostraram ser eficientes para realização de tais estudos. No entanto, recomenda-se que outros modelos de distribuição sejam gerados para as castanheiras, testando também outras variáveis que não foram consideradas na seleção.

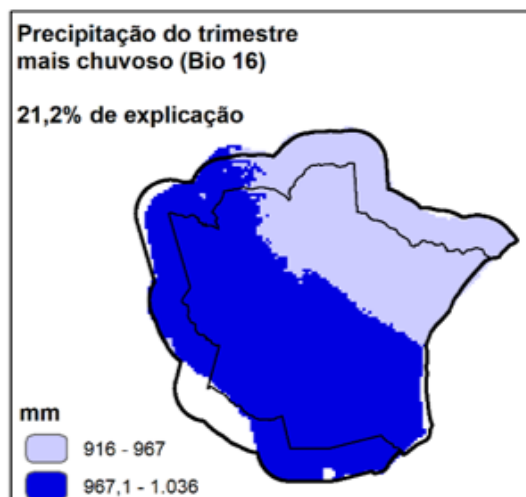
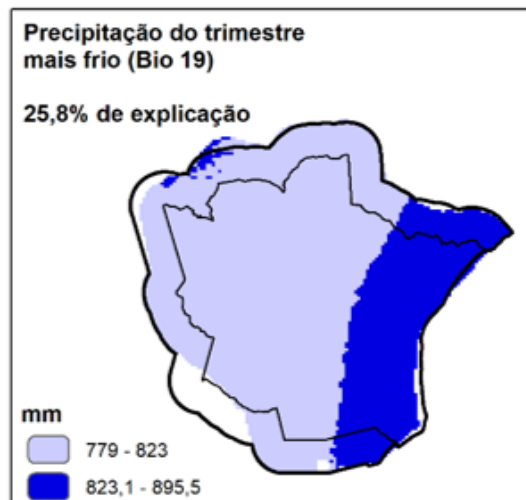
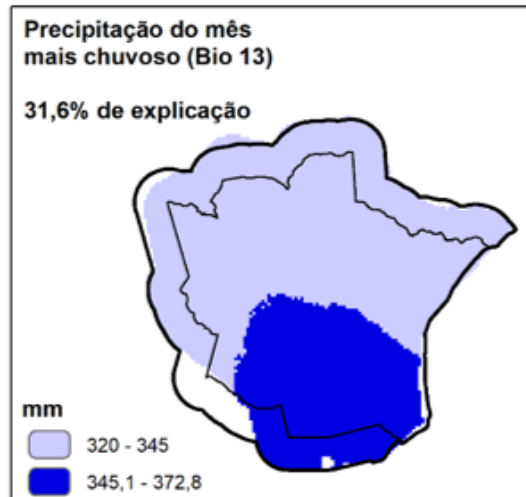
## APÊNDICE I

- Variáveis que mais contribuiriam para a modelagem na escala estadual (Estado do Amapá) - modelo com seleção de variáveis na pré-modelagem MaxEnt.



## APÊNDICE II

- Variáveis que mais contribuíam para a modelagem na escala local (RESEX Cajari) - modelo com seleção de variáveis na pré-modelagem MaxEnt.



## ANEXO I

- Comprovante de submissão do artigo ao periódico Biotropica

## Submission Confirmation Print

---

Thank you for your submission

---

**Submitted to**  
Biotropica

**Manuscript ID**  
BITR-18-076

**Title**  
Vertical structure of stands of *Bertholletia excelsa* Bonpl. in the Brazilian Amazon, evaluated with terrestrial LiDAR technology

**Authors**  
Costa, Felipe  
Almeida, Danilo  
Rosa, Diogo  
da Silva, Kátia  
de Oliveira, Raimundo  
Tonini, Hélio  
Beldini, Troy  
Guedes, Marcelino

**Date Submitted**  
10-Apr-2018

BIOTROPICA


**BIOTROPICA**  
THE JOURNAL OF TROPICAL BIOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL RESEARCH

**Vertical structure of stands of *Bertholletia excelsa* Bonpl. in the Brazilian Amazon, evaluated with terrestrial LiDAR technology**

Journal:	<i>Biotropica</i>
Manuscript ID	BITR-18-076
Manuscript Type:	Paper
Date Submitted by the Author:	10-Apr-2018
Complete List of Authors:	Costa, Felipe; Universidade Federal do Amapá Almeida, Danilo; Universidade de São Paulo Campus de Piracicaba Rosa, Diogo; Universidade Federal de Rondônia da Silva, Kátia; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária de Oliveira, Raimundo; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Tonini, Hélio; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Beldini, Troy; Universidade Federal do Oeste do Pará Guedes, Marcelino; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Keywords:	Brazil nut tree, castanheira-da-amazônia, castanha-do-pará, canopy, leaf area density, leaf area index, forest height, forest vertical profile

 SCHOLARONE™  
 Manuscripts