

Capítulo 8

Modelagem das relações bióticas e abióticas que influenciam a produção de frutos

Anderson Pedro B. Batista; Marcelino Carneiro Guedes; Camila Santos da Silva; Géron Rodrigues do Santos; Karine Dias Batista; Kátia Emidio da Silva; Lúcia Helena de Oliveira Wadt; Lucielio Manoel da Silva; Marcos Gervasio Pereira; Raimundo Cosme de Oliveira Junior; Patrícia da Costa; Carolina Wolkmer de Castilho.

Introdução

Acastanheira-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*) é um ícone da região, principalmente pelas possibilidades de uso múltiplo da espécie e, mais especificamente, pela importância de suas amêndoas para os povos e as comunidades agroextrativistas tradicionais. A castanheira também se destaca como espécie motivadora da criação de várias áreas protegidas na Amazônia e, conseqüentemente, por sua contribuição para a conservação da floresta em pé.

Dada a importância das amêndoas da castanheira-da-amazônia para as famílias extrativistas e para a conservação da floresta, estudos que demonstrem o comportamento ecológico da espécie bem como os fatores que afetam a produção de frutos são importantes para orientar ações de manejo e conservação. Nesse sentido, já foram confirmadas relações da produção de frutos, no nível individual e regional, com atributos específicos, considerando tanto variáveis da própria árvore (dendrométricas) quanto atributos edafoclimáticos dos locais onde elas se encontram. No entanto, o desafio de identificar os fatores associados com a variação da produção de frutos se torna muito maior quando se considera a ação conjunta de vários fatores, a elevada variabilidade geográfica da região de ocorrência das castanheiras e as diferentes alterações causadas pelas mudanças climáticas.

O entendimento adequado na variação da produção é fundamental para o manejo da espécie, para evitar a superexploração e não comprometer a sustentabilidade ecológica do extrativismo. Esse conhecimento sobre a variação na produção de frutos entre castanheiras também é importante para selecionar matrizes de alta produção, visando à produção de mudas. Assim, trabalhos científicos que investiguem os fatores que determinam a produção de frutos, popularmente chamados de ouriços (Figura 1), são requeridos para auxiliar no entendimento da ecologia da espécie para sua efetiva conservação, manejo e melhoramento.

Fotos: Marcelino Guedes e Karine Battista



Figura 1. Copas de castanheiras-da-amazônia com e sem frutos. Os frutos são chamados popularmente de ouriços. Imagens feitas no Amapá e em Roraima.

Existem castanheiras com elevada capacidade de produção, que chegam a produzir mais de mil frutos em uma safra. Por outro lado, também existem castanheiras que envelhecem e morrem sem produzir nenhum fruto. Essa intensa variação dificulta as análises estatísticas, obriga e desafia os pesquisadores a testarem diversos modelos para auxiliar na identificação e interpretação dos padrões existentes. A ferramenta de modelagem pode auxiliar no entendimento dos fatores que afetam a variação da produção de frutos, uma vez que aborda de forma integrada diversos fatores e tipos de variáveis de resposta. Para analisar esses fatores, necessita-se de modelos complexos, que possam separar o quanto cada fator responde pela variância existente no conjunto de dados. Além disso, alguns atributos podem apresentar dependência espacial, devendo, portanto, ser devidamente tratados com ferramentas da geoestatística. A abordagem da dependência espacial para modelar a produção individual de frutos envolve, principalmente, atributos do solo e elevação no terreno.

A modelagem simples e a complexa têm sido usadas para modelar a produção de frutos nas regiões da Amazônia, Ocidental e Oriental. Estudos realizados nas duas últimas décadas (Tabela 1) têm gerado bons indícios para entendimento da variação da produção e para desvendar os mistérios da produção individual de frutos da castanheira-da-amazônia.

Considerando os resultados disponíveis na literatura, é possível verificar que ainda existe o desafio de expandir a aplicação dos modelos para áreas maiores e escalas mais ampliadas, analisando também outros possíveis fatores preditivos. Assim, o objetivo deste capítulo é apresentar resultados e ferramentas para modelagem da variação local na produção de frutos da castanheira-da-amazônia, assim como discutir e aplicar novas possibilidades de análises integradas para explicar essa variação. Pretende-se também apresentar algumas considerações, questionamentos e recomendações práticas ao final do capítulo, para motivar técnicos e produtores a monitorarem e analisarem sua produção, visando manter e ampliar esse patrimônio dos extrativistas de castanha.

Tabela 1. Pesquisas que analisaram variáveis bióticas e/ou abióticas para identificar relações com a produção de frutos de castanheiras-da-amazônia

Referência	Região	Estado	Tipo de modelagem/ análise	Variáveis analisadas	Resultados destaques
Wadt et al. (2005)	Amazônia Ocidental	Acre	Regressão linear múltipla	DAP, classes de produção, forma e posição da copa, infestação de cipó na copa e tronco.	DAP explicou a variação da produção (33%) e a forma da copa; também foi importante para explicar a variação da produção de árvores grandes (DAP > 100 cm). Os resultados também demonstraram uma correlação negativa significativa, com presença de cipós na copa.
Kainer et al. (2007)	Amazônia Ocidental	Acre	Modelo misto	DAP, posição e forma da copa, presença de lianas e grupos de atributos físicos e químicos do solo.	DAP explicou cerca de 56,5% da variação da produção de frutos.
Tonini et al. (2008)	Amazônia Ocidental	Roraima	Correlação	DAP, classes de produção, variáveis morfométricas, posição sociológica, forma e presença de cipós na copa.	As árvores mais produtivas apresentam copas mais compridas e menor relação altura/diâmetro. Árvores nas posições superiores do dossel e com copas bem formadas são mais produtivas.
Paiva (2009)	Amazônia Oriental	Amapá	Componentes principais e regressão linear e quadrática	DAP, forma e posição da copa, infestação por cipó, classes de produção e classes de DAP.	As classes de maior produção de frutos estão relacionadas às classes de maior DAP, bem como à forma e posição da copa. Relação positiva não linear entre a produção e o DAP das árvores.

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Referência	Região	Estado	Tipo de modelagem/ análise	Variáveis analisadas	Resultados destaques
Batista (2018)	Amazônia Oriental	Amapá	Modelo linear generalizado e geoestatística	Atributos do solo (físico-químico), vegetação do entorno (riqueza, diversidade, área basal, DAP, localização da árvore (coordenadas))	Variáveis do solo apresentaram dependência espacial. DAP, posição da castanheira e vários atributos do solo foram importantes para explicar a variação.
Batista et al. (2019)	Amazônia Oriental	Amapá	K de Ripley bivariada	Localização espacial das árvores e classes de produção de frutos	O ambiente influenciou de forma distinta na variação da produção de frutos. Na transição cerrado-floresta, foi detectada associação espacial negativa das castanheiras nas diferentes classes de produção.
Tonini et al. (2020)	Amazônia Oriental	Mato Grosso	Regressão	Peso seco de sementes, DAP, posição e formato da copa	O DAP explicou 34% da variação no peso seco de sementes.
Staudhammer et al. (2021)	Amazônia Ocidental	Acre	Modelo misto	Tamanho, forma e posição da copa, área do alburno, local, ano de frutificação, DAP, presença de cipó, elevação do local	O tamanho da copa foi o melhor preditor da produção de frutos para os modelos estudados.
Batista et al. ¹	Amazônia Oriental	Amapá	<i>Random Forest</i> e geoestatística	Atributos do solo (físico-químico), vegetação do entorno (riqueza, diversidade, área basal, DAP, localização da árvore (coordenadas))	Atributos do solo (físico-químico) e DAP foram importantes para explicar a variação da produção de frutos no Acre, no Amapá e em Roraima.

Nota: ¹ Artigo em processo de finalização para publicação.

Relações bióticas com a produção de frutos

Os primeiros estudos científicos relacionando fatores bióticos com a produção de frutos da castanheira-da-amazônia são aqueles relacionados com o trabalho de Wadt et al. (2005). Esse grupo de pesquisa monitora a produção de castanheiras na Reserva Extrativista (Resex) Chico Mendes, no Acre, Amazônia Ocidental, desde 2001. Utilizando regressão linear múltipla, avaliaram as seguintes covariáveis do modelo: DAP (diâmetro à altura do peito), classes de produção, presença de cipó na copa e no tronco da árvore, e forma e posição da copa, contando com uma base de dados de 140 árvores produtivas. Os autores observaram que, quanto maior o diâmetro do tronco, melhor a posição sociológica e a forma da copa, o que implica maior produção de castanhas. Adicionalmente, destacaram que a proporção da variação na produção de castanhas explicada pelo diâmetro do tronco foi de 37,2%, evidenciando a importância dessa variável para explicar a produção individual de cada árvore. Nesse trabalho, o corte de cipós lenhosos (lianas) foi recomendado como um possível tratamento silvicultural para aumentar a produção, visto que os cipós espalham seus ramos pelas copas das árvores, competindo por luz. Essa prática também foi recomendada por Zuidema (2003), que analisou o impacto da competição de cipós na produção de frutos da castanheira-da-amazônia em florestas na Bolívia.

Em 2006, foi publicado outro estudo sobre o efeito da presença de lianas no crescimento em diâmetro e atributos de copa, em associação com a produção de frutos e castanhas-da-amazônia (Kainer et al., 2006). Seus resultados mostraram que não foi encontrada relação estatisticamente significativa entre a presença de lianas e o crescimento em diâmetro das árvores, sugerindo que os benefícios do corte das lianas são relacionados mais com a fecundidade e a produção de frutos e sementes.

As investigações sobre fatores que afetam a produção de frutos prosseguiram e, em 2007, Kainer et al. (2007), também na Resex Chico Mendes, avaliaram a produção de frutos e sementes de árvores da castanheira-da-amazônia por meio de modelagem mista. Os autores observaram que, mais uma vez, o diâmetro do tronco foi a variável de maior importância, explicando sozinha 56,5% da variação da produção de frutos. Vale mencionar que o modelo utilizado por esses autores explicou 73% da variação da produção de frutos ao longo de cinco anos de monitoramento. Na composição do modelo, também foram utilizadas covariáveis quantitativas da própria árvore, covariáveis categóricas (posição e forma da copa, presença de lianas) e grupos de atributos físicos e químicos do solo.

Tonini et al. (2008), trabalhando em florestas nativas no sul de Roraima, constataram que as seguintes variáveis apresentam correlação significativa com a produção de frutos e sementes de castanheira-da-amazônia: diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), tipo morfológico da espécie, posição sociológica, forma e área da copa, área e presença de cipós na copa. Os autores amostraram de forma aleatória 88 árvores, agrupadas em quatro categorias de produção, e em cada árvore foram medidos: DAP, altura total, altura de inserção da copa e comprimento da copa. Os índices morfométricos utilizados foram baseados no tamanho e na morfologia da árvore, sendo: proporção de copa; relação altura/diâmetro; índice de saliência; índice de abrangência; e forma da copa – estes índices estão detalhados em Tonini et al. (2008). Os autores confirmaram a relação significativa entre produção de castanhas por árvore com comprimento, diâmetro, forma e exposição da copa/posição sociológica (diferentes estratos verticais da floresta – a maioria dos pesquisadores tem utilizado três estratos: superior, médio e inferior), bem como com os índices morfométricos (índice de abrangência e relação altura/diâmetro).

Esses autores foram os primeiros a inserir na modelagem variáveis derivadas de cálculos entre os atributos originais, que podem ajudar a encontrar padrões muitas vezes não observados em variáveis individualizadas. Nesse caso, o índice de saliência (relaciona o diâmetro da copa e o DAP, demonstrando quantas vezes o diâmetro da copa é maior que o DAP) e a relação altura/diâmetro foram significativos, reforçando a importância de se ter uma copa bem formada e emergente para se ter uma boa produção, não necessariamente em uma relação direta com o DAP. As árvores de tamanho intermediário (DAP entre 80 e 150 cm) foram as mais produtivas, confirmando que a relação positiva da produção com o DAP não é linear, como descrito por Kainer et al. (2007) e Paiva (2009), e que a produção pode depender mais dos atributos da copa do que do próprio DAP. Dessa forma, os autores concluíram que a posição sociológica e a forma da copa têm influência sobre a produção de castanha, visto que as árvores nas posições superiores do dossel e com copas bem formadas, de forma circular, são mais produtivas.

Esses estudos contribuíram muito para o entendimento inicial das relações de fatores bióticos com a produção individual de frutos de castanheira-da-amazônia. No entanto, ainda havia lacunas no que diz respeito a fatores bióticos em outras regiões. Dessa forma, as investigações sobre relações de fatores bióticos com a produção de frutos se estenderam para a Amazônia Oriental, especificamente no Amapá e Pará.

Na Amazônia Oriental, as primeiras pesquisas sobre a relação de fatores bióticos com a produção de frutos da castanheira foram os estudos realizados por Paiva (2009) e Aparício (2011), na Resex do Rio Cajari, no sul do Amapá. Na pesquisa realizada por Paiva (2009), foi utilizada a análise de componentes principais e de regressão para relacionar a produção de frutos aos atributos das castanheiras, confirmando os padrões até então observados na Amazônia Ocidental – classes de maior produção de frutos estão relacionadas às classes de maior diâmetro das árvores da espécie e às melhores classes de forma e posição da copa. Com modelos de regressão linear e quadrática, foi constatada, mais uma vez, a associação positiva entre a produção e o diâmetro do tronco. Porém, os resultados apresentaram baixo poder preditivo ($R^2 < 0,2$) para ambos os modelos, evidenciando que as maiores produções não são encontradas nas castanheiras com maior diâmetro, mas, sim, naquelas com diâmetro intermediário, semelhante ao registrado por Kainer et al. (2007) e confirmado por Tonini et al. (2008). Paiva (2009) também confirmou que a presença de cipós afetou negativamente a produção.

Ainda na Resex Cajari, Aparício (2011) observou que a produção das castanheiras apresenta relação direta e negativa com a área basal total (somatório das áreas seccionais das árvores, expresso em m^2/ha) e o número de indivíduos de diferentes espécies vegetais circundantes, indicando a influência negativa da competição de árvores vizinhas na produção. Um estudo de dez anos realizado no Acre por Staudhammer et al. (2021) mostrou, por meio de modelos mistos com medidas repetidas, que há uma relação positiva entre a área do alburno (parte externa, mais nova e funcional da madeira) da árvore e a produção de frutos em anos de seca severa (piores condições ambientais). Os autores associaram a resistência à seca das castanheiras com maior área de alburno à maior capacidade de armazenamento de água no tronco.

Recentemente, Tonini et al. (2020) avaliaram a variação anual da produção e produtividade de castanheiras-da-amazônia em floresta nativa, verificando, por meio de regressão, as associações existentes entre peso seco de sementes (PSS) por árvore e DAP, posição e formato da copa, e número de frutos. Os resultados da pesquisa mostraram, mais uma vez, a importância do DAP, pois, sozinha no modelo, essa variável explicou 34% da variação do peso seco de sementes.

Apesar de ter sido verificado que as relações de fatores bióticos com a produção de frutos podem variar em um mesmo local, de maneira geral, para diferentes castanhais dentro de uma mesma região, percebe-se que os estudos realizados,

tanto na Amazônia Ocidental quanto na Amazônia Oriental, encontraram resultados semelhantes. Esses resultados confirmam, complementam e validam alguns fatores que afetam a produção de frutos da castanheira-da-amazônia, com destaque para as variáveis DAP e os atributos da copa. Vale mencionar que os estudos apontam para a importância da utilização de variáveis abióticas do ambiente na modelagem, pois essas variáveis, como os atributos relacionados à qualidade do solo e à posição da árvore no terreno, ajudam a explicar os fatores que afetam de forma significativa a produção de frutos.

Relações de fatores abióticos com a produção de frutos

As primeiras evidências de relações de variáveis abióticas com a produção de frutos da castanheira-da-amazônia foram levantadas em pesquisa realizada por Kainer et al. (2007) na Resex Chico Mendes, Acre, Amazônia Ocidental, na qual foi avaliada a correlação dos atributos químicos do solo com a produção de frutos. Na composição do modelo, foram utilizadas a variável quantitativa da própria árvore (DAP), variáveis categóricas (forma da copa, presença de lianas) e atributos do solo (P e CTC). Esse modelo misto explicou 73% da variação da produção de frutos ao longo de cinco anos de monitoramento da produção (2002 a 2006). Os autores encontraram correlação negativa da produção com o teor de fósforo (P) no solo e correlação positiva com a capacidade de troca de cátions (CTC) do solo. Por outro lado, os autores observaram que a concentração de P foliar está correlacionado, positiva e linearmente, com o número de frutos produzidos ($r = 0,41$). Esses resultados indicam que maiores cargas de frutos demandam maior absorção de fósforo (P) pelas raízes, o que pode levar à diminuição do teor disponível no solo e aumento do teor nas folhas. Em outro estudo na Amazônia Ocidental realizado por Batista et al. (2014), foram correlacionados teores de macro e micronutrientes presentes nos frutos, nas cascas e nas folhas, com a produção de frutos por árvore, verificando correlação linear positiva entre o teor de cobre (Cu) presente nos ouriços e a produção ($r = 0,85$).

Na Amazônia Oriental, no Amapá, Aparício (2011) identificou a influência de atributos químicos do solo na produção de frutos, principalmente aqueles relacionados à sua acidez, e encontrou efeito positivo na produção. Também em áreas do Amapá, Batista (2018) realizou uma modelagem da produção de frutos tendo como covariáveis do modelo valores de atributos de solo (química e física, incluindo diferentes capacidades – tensões de retenção de água no solo) e da vegetação

arbórea encontrada no entorno das castanheiras – área basal (G) e riqueza de espécies (S). Os valores dessas covariáveis foram obtidos a partir do mapeamento da distribuição espacial, por meio de técnicas geoestatísticas, e, posteriormente, foram associadas à localização (coordenadas geográficas), DAP e produção de frutos de cada árvore. Para análise dos dados, foi utilizada a modelagem linear generalizada (MLG), que é uma abordagem alternativa para dados quando as suposições usuais de normalidade e variância constante não são satisfeitas. A seleção das covariáveis foi feita pelo método de eliminação de variáveis *Stepwise regression*, em conjunto com o critério de seleção de Akaike (AIC), que é uma métrica que avalia a performance de um modelo estatístico, sendo selecionadas somente as variáveis que mais contribuíram para o modelo proposto e com o menor AIC. Assim, a equação ajustada selecionou 12 variáveis importantes (do total de 21) para explicar a variação da produção de frutos, as quais foram: as coordenadas de localização (X e Y), o DAP da árvore (DAP), o teor de zinco no solo (Zn), a densidade do solo (ds), o teor de magnésio (Mg), a densidade de partículas (dp), o teor de carbono (C), o teor de argila, a água no solo, a microporosidade do solo e o teor de cálcio no solo (Ca). Foi verificado que o número esperado de frutos se eleva com o aumento do DAP, o teor de magnésio, o carbono, a microporosidade do solo, a água no solo e a densidade de porosidade e coordenadas (X e Y). No entanto, a produção de frutos diminuiu com o aumento do teor de zinco, cálcio, densidade do solo e teor de argila.

O modelo desse estudo explicou 70% da variação da produção de frutos. Nele, foram consideradas as coordenadas geográficas e a posição das castanheiras como possíveis variáveis explicativas, além de técnicas de krigagem (interpolador geoestatístico de dados para locais não amostrados). Ou seja, foram estimados os valores das covariáveis para toda a parcela e realizada a extração de atributos na mesma localização geográfica das castanheiras. Isso melhorou a performance do modelo e indicou a importância de se considerar a dependência espacial e as análises espacialmente explícitas na modelagem da produção de castanha.

Essa questão da posição espacial das castanheiras como fator importante na determinação da produção de frutos já havia sido identificada, de certa forma, por Zeidmann et al. (2014), Thomas et al. (2017) e, mais recentemente, Staudhammer et al. (2021). Nesses estudos, a posição das castanheiras no terreno, avaliada como elevação ou altitude, foi positivamente correlacionada com a produção de frutos em árvores individuais.

As técnicas que envolvem a geostatística para os fatores espacialmente dependentes podem ser ampliadas de forma a incluir a linguagem da inteligência artificial no treinamento e aprendizado de máquinas. Em uma abordagem multivariada espacialmente explícita dos atributos físicos e químicos do solo, com a produção de frutos por meio da implementação de aprendizado de máquinas, análises em andamento na Amazônia Oriental, no Amapá, por meio do algoritmo *Random Forest* (RF), encontraram 12 variáveis significativas na predição da produção de frutos, de acordo com a seguinte ordem de importância: água no solo (na tensão de 10 kPa), coordenada de localização (Y) da árvore, densidade de partículas (dp), DAP das árvores produtivas, teor de argila (Arg), água no solo (na tensão de 1.500 kPa), teor de magnésio (Mg), cálcio no solo (Ca), pH, microporosidade, coordenada de localização (X) da árvore e teor de fósforo no solo (P). Vale mencionar que as variáveis utilizadas para essas análises foram as mesmas utilizadas por Batista (2018), sendo que 70% da base de dados foi utilizada para treinamento do algoritmo RF e o restante (30%) para validação. O modelo RF foi escolhido como método de análise devido ao seu potencial de apresentar relações não lineares entre as variáveis, característica similar ao MLG, utilizado por Batista (2018). Importante ressaltar que os dados das covariáveis foram provenientes da distribuição espacial por meio de krigagem ordinária – mais detalhes sobre a interpolação dos dados e do uso das técnicas de análise espacial podem ser obtidos em Batista (2018).

O modelo RF ajustado para este capítulo (Batista et al., pesquisa em andamento) foi calculado com os parâmetros de 800 árvores de decisão e 15 variáveis aleatórias por *split* (divisão). A importância das variáveis do RF foi dada pelo decréscimo médio de Gini, que descreve a perda no desempenho do modelo ao permutar os valores das características (Breiman, 2001). Os resultados encontrados foram significativos, visto que o algoritmo RF se ajustou bem aos dados de treino ($R^2 = 80\%$ e raiz quadrada do erro médio – RMSE = 89,45); no entanto, não teve um bom desempenho com os dados de teste ($R^2 = 33\%$ e RMSE = 62,93). Isso pode ser um indicativo de que a calibração do modelo RF apresenta dificuldades na representação do fenômeno. Além disso, os resultados podem ser um indicador da insuficiência amostral, de forma que a repetição do estudo deveria acontecer com uma maior intensidade amostral.

A Figura 2 mostra os resultados da árvore de decisão que prevê a produção de frutos, no local de estudo, com base nas variáveis importantes do modelo RF. O primeiro nível (raiz) identificado foi o teor de argila no solo (em g kg^{-1}), sendo que as árvores (22%) localizadas em solos com teores de argila menores que 150 g kg^{-1}

apresentaram produção média de 299 frutos. Para o segundo nível, quando o teor de argila no solo for maior ou igual a 150 g kg^{-1} e o DAP for maior ou igual a 138 cm , a produção média é de 154 frutos (29% das árvores). Também pode ser observado que, se as árvores estão localizadas em solo com teor de argila maior ou igual a 150 g kg^{-1} e apresentam o DAP menor que 138 cm e água no solo (a 10 kPa) maior ou igual a $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, elas apresentam produção média de 30 frutos (18% das árvores). Em contrapartida, as árvores em locais com água no solo menor que $0,17 \text{ m}^3$ produzem mais frutos (em média, 104 m^3).

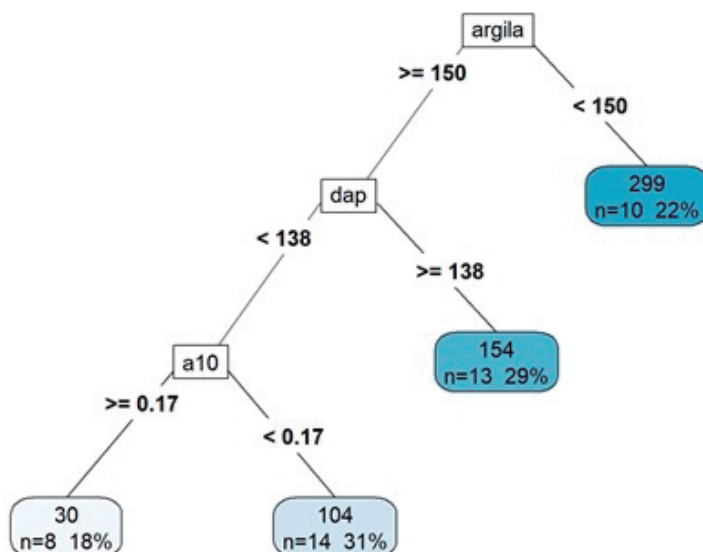


Figura 2. Árvore de regressão do algoritmo RF para as variáveis de atributos de solo (argila g kg^{-1}), dendrométricos (DAP) e água no solo na tensão de 10 kPa (a10). Essas variáveis são consideradas as mais importantes para explicar a produção de frutos de castanheiras-da-amazônia na Amazônia Oriental, Amapá.

Em síntese, as variáveis importantes para a produção de frutos por árvore individual encontradas na modelagem realizada por Batista (2018), utilizando MLG, e que também foram importantes nas análises pelo algoritmo RF, foram: água no solo, DAP da árvore produtiva, coordenadas de localização das árvores produtivas, teor de argila, densidade de partículas, teor de magnésio, cálcio e microporosidade. Portanto, os resultados ratificam, por meio de duas metodologias distintas, que essas variáveis foram determinantes para explicar a variação da produção de frutos da castanheira-da-amazônia.

Em 2019, Batista et al. (2019) realizaram uma pesquisa inédita em área de floresta madura de terra firme (floresta ombrófila aberta) e em área de transição savana-floresta, a qual investigou a associação espacial (atração ou repulsão) de árvores produtivas nesses diferentes ambientes na Amazônia Oriental, Amapá. Nesse estudo, foi comprovado que, na floresta de transição savana-floresta, existe relação da produção de frutos com a localização espacial das árvores, tendo sido encontrado um efeito de inibição entre árvores de diferentes classes de produção. Em outras palavras, as árvores mais produtivas (de acordo com as classes de produção avaliadas no estudo) inibem as árvores menos produtivas ao seu redor, de acordo com as distâncias umas das outras. No entanto, foi verificado que a castanheira-da-amazônia em ambiente de floresta madura de terra firme, ambiente esse com maior capacidade de suporte e solo de melhor qualidade para as castanheiras do que na transição savana-floresta, não apresentou relação espacial entre árvores produtivas. Vale destacar que os ambientes avaliados apresentam densidades diferentes de castanheiras, o que sugere que a competição entre árvores por recursos seja um fator importante. Os autores concluíram que existem influências espaciais na produção de frutos de castanheira-da-amazônia relacionadas à densidade e à proximidade entre castanheiras, mas que estas são dependentes de características locais do ambiente. Dessa forma, este trabalho revelou outras possibilidades de modelagem espacial da produção, que envolveram o uso da função K de Ripley bivariada para avaliar as variações espaciais da produção em diferentes ambientes, conforme descrito em Batista et al. (2019).

Portanto, foi verificado que existem relações de fatores abióticos com a produção de frutos para diferentes castanhais e regiões distintas da Amazônia. Os resultados evidenciaram fatores que afetam a produção de frutos da castanheira-da-amazônia, principalmente os atributos relacionados à qualidade do solo e à posição da árvore no local.

Análise de dados da rede kamukaia

O projeto Kamukaia foi iniciado em 2005 com o objetivo de gerar informações científicas para responder demandas da sociedade sobre o uso sustentável de produtos florestais não madeireiros (PFNM) na Amazônia. O termo deriva de *kamuk* e *aka*, duas palavras da língua indígena wapixana, que significam produtos da floresta. A rede busca bases científicas necessárias ao desenvolvimento do manejo sustentável de PFNM, integrando diversos parceiros na região amazônica, além da valorização do conhecimento empírico por meio do intercâmbio de saberes com

comunidades tradicionais. Tem como objetivo principal gerar conhecimentos sobre a ecologia e o manejo das principais espécies demandadas na extração de PFNM, entre as quais a castanheira. No final do ano passado, foi concluída sua terceira fase.

Nas análises preliminares, ainda não publicadas, foram utilizadas ferramentas de geoestatística (semivariograma), aplicadas aos dados das parcelas permanentes da rede Kamukaia em diferentes estados da Amazônia. A variável de resposta quantificada foi a produção efetiva, aquela que fica disponível à coleta dos extrativistas após o término da queda dos frutos. Portanto, é importante ressaltar que essa variável não representa o potencial biológico da espécie, pois há predação de frutos na árvore, principalmente por araras (*Ara chloropterus*), assim como remoção durante a dispersão, principalmente pelas cutias (*Dasyprocta leporina*).

O intuito das análises realizadas com os dados da rede Kamukaia sobre a castanheira-da-amazônia foi verificar padrões na produção de frutos e nas relações com as variáveis explicativas existentes ao longo da região amazônica. Espera-se, com esse estudo, ter uma maior consolidação sobre os fatores relacionados às variações locais no solo, atributos da própria castanheira e da vegetação matriz (floresta de entorno), que são mais importantes para explicar a variação na produção de frutos, no nível da árvore individual. Assim, o entendimento aqui gerado sobre os fatores relacionados com a produção será transformado em recomendações de práticas e novos testes necessários ao manejo, ao melhoramento e à conservação da espécie, de modo que possam ser considerados na cadeia de valor da castanha-da-amazônia.

A primeira análise dos dados de todos os estados (Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Roraima) verificou a continuidade espacial de todas as variáveis do banco de dados de atributos físicos e químicos do solo (total de 27 variáveis) e posição geográfica das árvores da espécie (coordenadas). Essa fase consistiu em verificar quais variáveis se apresentam espacialmente estruturadas quando se altera a distância. Essa análise de dependência espacial serviu como critério de seleção de variáveis para, posteriormente, identificar relação com a produção de frutos.

Para os dados coletados no Acre, oito variáveis mostraram dependência espacial, de acordo com as análises realizadas e os parâmetros utilizados. Para os dados coletados no Amapá, apenas seis variáveis apresentaram dependência espacial. No Amazonas, sete variáveis, e no Mato Grosso, apenas três variáveis. A análise dos dados do sítio localizado no Pará permitiu a seleção de apenas quatro variáveis e no sítio de Roraima foram selecionadas quinze variáveis com continuidade espacial (Tabela 1).

Tabela 2. Variáveis do solo que, por meio de técnicas geoestatísticas (semivariograma), apresentaram continuidade espacial (+) e foram selecionadas para verificar relação com a produção de frutos de castanheiras-da-amazônia.

Atributos do solo	Estados					
	Acre	Amapá	Amazonas	Mato Grosso	Pará	Roraima
pH	+		+			+
Ca	+					
Mg			+			
K			+			
P			+			
Al						
H+Al		+	+			
N						
Se		+		+		
Mn						
Cu	+	+		+		
CTC efetiva (t)	+				+	
Areia total	+	+			+	
Argila	+	+		+		
Al	+		+			
Zn		+			+	
MO			+			
Silte					+	
Na						+
C						+
M						+
Areia grossa						
Areia fina						
Textura						
CTC potencial (T)						
V						
Fe						

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em dados da Rede Kamukaia.

Com as variáveis selecionadas (Tabela 1), foram realizadas análises de modelagem para verificar relação com a produção de frutos e, assim, atestar quais podem explicar a variação na produção individual. Essa fase consistiu em utilizar aprendizado de máquinas do algoritmo *Random Forest* – RF (Breiman, 2001), mas a análise só foi possível para Amapá, Acre e Roraima, pois os demais estados não dispuseram, naquele momento, de dados de produção individual de frutos para aplicação do algoritmo.

A partir das variáveis selecionadas pelo critério de dependência espacial (geoestatística), os resultados encontrados pela modelagem RF para as árvores no Amapá mostraram uma performance de $R^2 = 0,17$, ou seja, a variação das covariáveis do modelo RF – zinco (Zn), cobre (Cu), selênio (Se), areia total, argila e acidez potencial (H+Al) – explicaram 17% da variação da produção de frutos, com RMSE (raiz quadrada do erro médio) de 107,22.

Para as análises de modelagem RF com os dados de atributos físicos do solo e produção de frutos em Roraima, a partir de cinco variáveis – água no solo, densidade do solo (ds), densidade de partículas (dp), micro e macroporosidade – e teste com 55 árvores produtivas, a qualidade do ajuste foi de $R^2 = 0,55$, com RMSE de 162,69, sendo as variáveis por ordem de importância no modelo RF: macroporosidade, água no solo, ds, microporosidade e dp. Esses resultados demonstram que a água no solo e os atributos físicos foram importantes para explicar a variação da produção.

Já para o Acre, em uma base de teste com 37 árvores produtivas com produção de frutos ao longo de cinco anos de monitoramento (2010 a 2015) e 28 variáveis de atributos físico-químicos do solo e o DAP das árvores, a qualidade do ajuste foi de $R^2 = 0,87$, com RMSE de 77,56. Foi observado que as dez variáveis por ordem de importância no modelo RF foram: pH, DAP, areia grossa, cobre (Cu), areia fina, potássio (K), alumínio (Al), fósforo (P), saturação por alumínio (m) e saturação por bases (V).

Os resultados de desempenho do modelo RF foram inferiores aos encontrados nas análises realizadas com a base de dados utilizada por Batista (2018), que utilizou valores de DAP das árvores produtivas e atributos de solo (química e física) e da vegetação arbórea do entorno – área basal (G) e riqueza de espécies

(S) –, obtidos a partir do mapeamento da distribuição espacial por meio de técnicas geoestatísticas. Portanto, a partir das modelagens já realizadas e publicadas bem como dos estudos em andamento com metodologias inovadoras de aprendizado de máquinas e modelos generalizados, foi possível verificar e confirmar a importância dos atributos físico-químicos do solo para explicar a variação na produção de frutos da castanheira-da-amazônia, especialmente:

– Água no solo, teor de argila, densidade de partículas (dp), teor de magnésio (Mg), teor de cálcio (Ca) e microporosidade do solo, que foram importantes na modelagem MLG (Batista, 2018) e no algoritmo RF (resultados não publicados) para explicar a variação na produção de frutos para as castanheiras no Amapá.

– Água no solo e variáveis de física do solo (macro e microporosidade, densidade do solo e partículas), importantes para explicar a variação da produção de frutos nas castanheiras em Roraima.

– O pH, cobre (Cu), potássio (K), alumínio (Al), fósforo (P), saturação por alumínio (m) e saturação por bases (V), areia grossa, areia fina, importantes para explicar a variação da produção de frutos nas castanheiras no Acre.

– Foi verificado que o teor de fósforo (P) disponível no solo apresenta relação negativa e relativa importância na explicação da variação da produção individual de frutos.

– O DAP das árvores produtivas, que se destacou em todos os trabalhos mencionados neste capítulo, sobre relações com a produção de frutos.

– A localização das árvores produtivas (coordenadas X e Y) evidencia que existe relativa importância do contexto espacial para a variabilidade da produção individual de frutos, conforme os modelos MLG e RF e verificado também por meio da função K bivariada para as castanheiras no Amapá por Batista et al. (2019).

– A altitude e a área do alburno foram importantes para a estimativa da produção de frutos, com destaque para o tamanho da copa, conforme resultados de Staudhammer et al. (2021).

Tabela 3. Principais relações positivas e negativas de variáveis preditoras bióticas e abióticas com a variável-resposta da produção de frutos de castanheiras-da-amazônia.

Variáveis que demonstraram relação com a produção de frutos da castanheira-da-amazônia	Efeito na produção de frutos
DAP	Positivo (+)
Área da copa	Positivo (+)
Área do alburno	Positivo (+)
Teor de magnésio	Positivo (+)
Teor de carbono	Positivo (+)
Microporosidade do solo	Positivo (+)
Água no solo	Positivo (+)
Capacidade de troca de cátions (CTC) do solo	Positivo (+)
Teor de fósforo (P) disponível no solo	Negativo (-)
Teor de zinco (Zn) disponível no solo	Negativo (-)
Teor de cálcio (Ca) disponível no solo	Negativo (-)
Teor de argila	Negativo (-)
Densidade do solo	Negativo (-)
Presença de cipó na copa	Negativo (-)

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em dados da Rede Kamukaia.

Considerações finais e recomendações

Este capítulo apresentou contribuições à modelagem da produção de frutos da castanheira-da-amazônia, por meio da relação com fatores bióticos e abióticos. Nas últimas décadas, avanços importantes no conhecimento, no que tange à variação da produção individual de frutos nas diferentes regiões da Amazônia Legal, demonstram que os atributos da própria castanheira, principalmente o DAP e atributos da copa, assim como fatores relacionados às variações locais no solo, são importantes para explicar a variação na produção de frutos no nível da árvore individual. Esse entendimento sobre os fatores relacionados com a produção pode ser aplicado como recomendações de práticas para o manejo e a conservação da espécie em ambientes de florestas nativas, bem como ser aplicados na cadeia de valor da castanha-da-amazônia.

De maneira geral, os atributos das próprias castanheiras são os fatores mais importantes para explicar a variação na produção de frutos, mais do que o lugar

ou as condições em que elas se encontram, indicando que é vantajoso manejar a vegetação do entorno, investir e cuidar das castanheiras, para que elas mantenham a capacidade produtiva. Uma prática recomendada, portanto, é o corte dos cipós grossos competidores, que ficam entrelaçados na copa.

As melhores opções para selecionar matrizes mais produtivas, visando à produção de mudas selecionadas da espécie, são castanheiras com copas bem formadas e posicionadas no dossel, que se encontram em maturidade reprodutiva, na classe diamétrica de 100 cm a 150 cm de DAP, e com maior área de alburno (embora a avaliação desse fator não seja visual). Isso evidencia que é necessário concentrar esforços no mapeamento das regiões mais produtivas e no manejo da vegetação de entorno para que o agroextrativista possa otimizar sua produção de castanha e reduzir custos de coleta.

A localização da castanheira também apresentou importância na definição de sua capacidade produtiva, dependendo do tipo de ambiente, fitofisionomia e/ou solos diferenciados, em que ela está inserida. Aliado a isso, a questão da dependência espacial da variação existente em vários atributos mostra que novos testes e uma nova abordagem, considerando diferentes escalas espaciais, são necessários para as análises da variação na produção por castanheira. Recomenda-se que sejam cada vez mais aplicadas técnicas geoestatísticas para modelar essa variação espacial e definir áreas e regiões com maior produtividade. Esse mapeamento em diferentes escalas (pois não foi verificado um padrão para todos os estados das variáveis com dependência espacial) pode trazer importantes subsídios ao manejo, melhoramento e conservação da espécie, que podem ser aplicados na cadeia de valor da castanha-da-amazônia.

Referências

APARÍCIO, W. C. S. **Estrutura da vegetação em diferentes ambientes na Resex do Rio Cajari: interações solo-floresta e relações com a produção de castanha.** 2011. 150 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco.

BATISTA, A. P. B. **Modelagem do crescimento e produção de frutos da castanheira da amazônia.** 2018. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

BATISTA, A. P. B.; SCOLFORO, H. F.; MELLO, J. M. de; GUEDES, M. C.; TERRA, M. C. N. S.; SCALON, J. D.; GOMIDE, L. R.; SCOLFORO, P. G. V.; COOK, R. L. Spatial association of fruit yield of *Bertholletia excelsa* Bonpl. trees in eastern Amazon. **Forest Ecology Management**, v. 441, p. 99-105, June 2019.. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.043>.

BATISTA, K. B.; SILVA, L. M.; WADT, L. H. Correlações entre a produção de frutos e os teores de nutrientes em castanha-do-brasil. *In*: In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 31.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 15.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 13.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 10., 2014, Araxá. **Fertilidade e biologia do solo: integração e tecnologias para todos: anais**. Araxá: Núcleo Regional Leste da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2014. Fertbio 2014.

BREIMAN, L. Random forests. **Machine Learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, Oct. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.

PAIVA, P. M. V. **A coleta intensiva e a agricultura itinerante são ameaças para os castanhais da Reserva Extrativista do rio Cajari?** 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) – Universidade Federal do Amapá, Macapá.

KAINER, K. A., WADT, L. H. O.; GOMES-SILVA, D. A. P.; CAPANU, M. Liana loads and their association with *Bertholletia excelsa* fruit and nut production, diameter growth and crown attributes. **Journal of Tropical Ecology**, v. 22, n. 2, p. 147-154, Mar. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0266467405002981>.

KAINER, K. A.; WADT, L. H. O.; STAUDHAMMER, C. L. Explaining variation in Brazil nut fruit production. **Forest Ecology and Management**, v. 250, n. 3, p. 244-255, Oct. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.05.024>.

STAUDHAMMER, C. L.; WADT, L. H. O.; KAINER, K. A.; CUNHA, T. A. Comparative models disentangle drivers of fruit production variability of an economically and ecologically important long-lived Amazonian tree. **Scientific Reports**, v. 11, p. 2563, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81948-4>.

THOMAS, E.; VALDIVIA, J.; CAICEDO, C. A.; QUAEDVLIEG, J.; WADT, L. H. O.; CORVERA, R. NTFP harvesters as citizen scientists: Validating traditional and crowdsourced knowledge on seed production of Brazil nut trees in the Peruvian Amazon. **PLoS ONE**, v. 12, n. 8, e0183743, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183743>.

TONINI, H.; KAMINSKY, P. E.; COSTA, P. Relação da produção de sementes de castanha-do-brasil com características morfométricas da copa e índices de competição. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, p. 1509-1516, nov. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001100009>.

TONINI, H.; BALDONI, A. B.; BOTELHO, S. C. C. Diameter structure and its relationship with fruit and seed production in a native Brazil nut grove in Mato Grosso. **Floresta**, v. 50, n. 2, p. 1399-1410, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v50i2.64199>.

WADT, L. H. O.; KAINER, K. A.; GOMES-SILVA, D. A. P. Population structure and nut yield of a *Bertholletia excelsa* stand in Southwestern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 211, n. 3, p. 371-384, June 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.061>.

ZEIDEMANN, V.; KAINER, K. A.; STAUDHAMMER, C. L. Heterogeneity in NTFP quality, access and management shape benefit distribution in an Amazonian extractive reserve. **Environment Conservation**, v. 41, n. 3, p. 242-252, Sept. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0376892913000489>.

ZUIDEMA, P. A. **Demography and management of the nut tree (*Bertholletia excelsa*)**. Riberalta, Bolivia: PROMAB, 2003. (Scientific series, 6).