

Supplementary Material 1: Portuguese Translation

Dantas Oliveira et al. 2024. Secondary Amazon rainforest partially recovers tree cavities suitable for nesting birds in 18–34 years. Ornithological Applications

Traduzido por deepL, com revisão leve de Kristina L. Cockle

A floresta amazônica secundária recupera parcialmente as cavidades das árvores adequadas para ninhos de aves em 18–34 anos

Carine Dantas Oliveira^{1,2}, Cintia Cornelius^{1,5}, Philip C. Stouffer^{2,3}, Kristina L. Cockle^{3,4,5}

¹Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Biologia, Instituto de Ciências Biológicas, Avenida General Rodrigo Otávio Jordão Ramos 3000, Manaus, AM, CEP 69077-000, Brasil.

²Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, AM, Brasil

³School of Renewable Natural Resources, Louisiana State University e Louisiana State University AgCenter, Baton Rouge, LA 70803-6202, EUA.

⁴Instituto de Biologia Subtropical, CONICET-UNaM, Puerto Iguazú, Misiones, Argentina.

⁵Autores correspondentes: kristinacockle@gmail.com, cintia.cornelius@gmail.com

RESUMO

A perda de biodiversidade após o desmatamento de florestas tropicais pode ser parcialmente compensada pela recuperação de florestas secundárias. As cavidades das árvores são um

recurso essencial para as aves que nidificam em cavidades, mas geralmente estão associadas a florestas primárias. Investigamos o tempo de recuperação de cavidades em árvores, adequadas para aves que fazem ninhos em cavidades, na floresta secundária no Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais (PDBFF) da Amazônia Central do Brasil. Nossa hipótese era de que a abundância de cavidades aumentaria com a idade da floresta, mas esta aumentaria mais rapidamente em áreas expostas apenas ao corte, em comparação com áreas onde a floresta havia sido cortada e queimada. Também levantamos a hipótese de que as cavidades seriam mais baixas, menores e menos variáveis na floresta secundária do que na floresta primária, que no PDBFF faz parte de uma vasta floresta de planície sem histórico recente de perturbação humana. Utilizamos câmeras montadas em postes e escalamos árvores para pesquisar cavidades em 39 parcelas (cada uma com 200 x 40 m) em florestas primárias e florestas secundárias de 11 a 34 anos de idade. Utilizamos modelos lineares generalizados para examinar como o suprimento de cavidades estava relacionado à idade da floresta e ao histórico de uso da terra (somente corte vs. corte e queima) e análise de componentes principais para comparar as características das cavidades entre florestas primárias e secundárias. A disponibilidade de cavidades aumentou com a idade da floresta secundária, independentemente do histórico de uso da terra, mas a floresta secundária mais antiga (31–34 anos) ainda teve menos cavidades (média \pm SE = $9,8 \pm 2,2$ /ha) do que a floresta primária ($20,5 \pm 4,2$ cavidades/ha). Além disso, as florestas secundárias não tiveram cavidades altas e profundas, com entradas grandes - características que provavelmente são importantes para muitas espécies de aves que fazem ninhos em cavidades. Podem ser necessárias várias décadas para recuperar o suprimento de cavidades nas florestas secundárias da Amazônia, especialmente para as aves maiores (e.g., *Micrastur* spp. e Psittacidae >190 g). A retenção de árvores legadas (quando as florestas são desmatadas) pode ajudar a manter um suprimento de cavidades que poderia permitir a recolonização precoce por algumas espécies de aves

florestais que fazem ninhos em cavidades, quando essas pastagens são abandonadas permitindo o crescimento da floresta secundária. Uma versão em português deste artigo está disponível no Material Suplementar 1.

Palavras chave: Amazônia, Aves que nidificam em cavidades, Abundância de cavidades, Fogo, Idade da floresta, Floresta secundaria, Cavidade, Tropical

Resumo leigo

- Para conservar as aves que fazem ninhos em cavidades fora das reservas de vegetação antiga, é necessário entender quanto tempo leva para as cavidades se desenvolverem na floresta secundária.
- Investigamos o tempo de restauração passiva das cavidades das árvores na Amazônia Central por meio do levantamento de cavidades em 39 parcelas de florestas antigas e florestas secundárias de 11 a 34 anos.
- A disponibilidade de cavidades aumentou com a idade da floresta, mas a floresta secundária mais antiga ainda tinha menos cavidades do que a floresta antiga, e as florestas secundárias não tinham cavidades adequadas para as maiores aves que fazem ninhos em cavidades.
- Podem ser necessárias várias décadas para restaurar o suprimento de cavidades nas florestas secundárias da Amazônia.
- As aves que fazem ninhos em cavidades podem ser capazes de recolonizar a floresta secundária mais rapidamente se as árvores herdadas forem mantidas quando a floresta antiga for desmatada.

INTRODUÇÃO

Globalmente, cerca de 72% das espécies de aves que fazem ninhos em cavidades são não escavadoras que dependem, para sua reprodução, de cavidades de árvores pré-existentes que devem se desenvolver lentamente ao longo do tempo com a sucessão florestal (Newton 1998, van der Hoek et al. 2017, Ibarra et al. 2020). Estudos observacionais e experimentos de adição de caixas-ninho sugerem que as populações desses não escavadores são frequentemente limitadas pelo suprimento de cavidades em áreas com poucas árvores grandes (Holt e Martin 1997, Newton 1998, Cockle et al. 2010, Politi et al. 2010, 2012; Warakai et al. 2013, Cuatianquiz Lima e Macías Garcia 2016, Nyirenda et al. 2016, Schaaf et al. 2021, 2022; Niringiyimana et al. 2022). Newton (1998) propôs que, durante os primeiros estágios da sucessão florestal, as cavidades e as aves que nidificam em cavidades estão ausentes; à medida que a floresta cresce, tanto as cavidades quanto as aves que nidificam em cavidades aumentam; e, finalmente, em uma floresta madura, o número de cavidades ultrapassa um limiar crítico, pelo qual outros fatores começam a limitar as populações de aves que nidificam em cavidades. Os experimentos com caixas-ninho sustentam a ideia de que, em algumas florestas mais antigas, um suprimento abundante de cavidades nas árvores libera as aves da limitação do local do ninho (Wiebe 2011), mas poucos estudos empíricos examinaram como o suprimento de cavidades se desenvolve durante a sucessão florestal.

Independentemente de as cavidades serem facilitadas por escavadores (por exemplo, pica-paus) ou formadas apenas por deterioração e danos, o processo de formação de cavidades nas árvores começa com a deterioração da madeira. Os fungos de decomposição colonizam as células da madeira, modificando as propriedades químicas e físicas e amolecendo a madeira, geralmente no centro da árvore (ou seja, cerne), a uma taxa de alguns centímetros por ano (Robledo e Urcelay 2009, Cockle et al. 2012, Bednarz et al. 2013, Zheng et al. 2016). Para que uma cavidade de ninho adequada se forme nessa madeira deteriorada, um agente externo,

como um pica-pau, quebra de galho ou outro dano mecânico, deve perfurar a madeira externa, que geralmente é mais dura (por exemplo, Conner e Locke 1982, Gibbons e Lindenmayer 2002, Lorenz et al. 2015). Assim, para que uma árvore contenha uma cavidade de nidificação, ela precisa primeiro de um núcleo de madeira deteriorada com um volume que se aproxime do tamanho mínimo de uma câmara de nidificação adequada (Jackson e Jackson 2004). As menores aves que fazem ninhos em cavidades podem ocupar cavidades em árvores de até 11 cm de diâmetro, mas as espécies maiores exigem árvores muito maiores (Pichorim 2006, De Labra-Hernández e Renton 2016, Wesolowski e Martin 2018). Assim, as cavidades das árvores se desenvolvem em uma escala de tempo de anos ou até mesmo séculos, e há uma associação positiva bem estabelecida entre a idade da árvore, o tamanho da árvore e o desenvolvimento da cavidade, sendo que a maioria das cavidades é encontrada nas árvores maiores e mais antigas (Koch et al. 2008, Cockle et al. 2010, Warakai et al. 2013, Niringiyimana et al. 2022).

Os ninhos em cavidades de árvores atingem seu pico de diversidade em florestas tropicais, especialmente na Amazônia, o maior bioma de floresta tropical do mundo, onde se estima que alguns locais suportem até 145 espécies de aves que fazem ninhos em cavidades (van der Hoek et al. 2017). O desmatamento e os incêndios florestais em curso na Amazônia e em outros biomas tropicais levaram muitos pesquisadores a propor a proteção legal de florestas secundárias para capturar carbono e cumprir as metas de reflorestamento, o que também pode beneficiar a biodiversidade (Bongers et al. 2015, Heinrich et al. 2021). Em uma meta-análise de 600 locais de florestas secundárias tropicais e subtropicais em todo o mundo, a riqueza de espécies de árvores se recuperou após cerca de 50 anos e a biomassa acima do solo se recuperou após cerca de 80 anos, mas a riqueza de epífitas (associada à presença de árvores grandes) não se recuperou nem mesmo após um século (Martin et al. 2013).

Estudando os elementos estruturais de uma cronossequência de floresta tropical úmida na

região central do Panamá, DeWalt et al. (2003) concluíram que muitas espécies que fazem ninho em cavidades podem encontrar locais de nidificação adequados somente em florestas com pelo menos 70 anos de idade. A queima após o desmatamento pode exacerbar o lapso de tempo para o desenvolvimento de cavidades: a queima intencional na Amazônia levou a uma sucessão florestal precoce envolvendo menos espécies de árvores, de menor diâmetro, provavelmente retardando o processo de recuperação da floresta em comparação com áreas não queimadas (Mesquita et al. 2001). As florestas secundárias já estão crescendo em cerca de 150.000 km² ou 21% das terras desmatadas na Amazônia brasileira (Almeida et al. 2016). Ainda não está claro com que rapidez ou em que medida essas florestas tropicais secundárias podem contribuir para as metas de biodiversidade, incluindo as cavidades exigidas por muitas aves (Dunn 2004, Wright e Muller-Landau 2006, Barlow et al. 2007, Omeja et al. 2016).

A maioria das pesquisas em nível de comunidade sobre aves em florestas secundárias tropicais agrupou as espécies por guilda de alimentação, em vez de guilda de nidificação (por exemplo, Renner et al. 2006, Santamaría-Rivero et al. 2016, Acevedo-Charry e Aide 2019), em parte porque os hábitos de nidificação de muitas espécies tropicais permanecem não descritos (Crozariol 2016). No entanto, há evidências de que os ninhos de cavidade são menos abundantes em florestas tropicais secundárias do que em florestas tropicais antigas, e que a diferença pode estar relacionada à disponibilidade de cavidades. Na Mesoamérica tropical, a floresta secundária suportava metade do número de cavidades de nidificação adequadas e uma densidade quase seis vezes menor de ninhos de cavidades da *Amazona guatemalae* em comparação com a floresta antiga (De Labra Hernández e Renton 2016, 2017). A floresta secundária também foi evitada pelos falcões-relógio (*Micrastur semitorquatus*), que precisam de cavidades grandes e não escavadas em árvores vivas para fazer seus ninhos (Martínez-Ruiz 2021). Na Amazônia central, os pesquisadores registraram uma menor abundância de papagaios que vivem no dossel e confirmaram a reprodução em menos espécies de ninhos de

cavidade de sub-bosque em florestas secundárias com menos de 35 anos de idade em comparação com florestas antigas (Figueira et al. 2015, Rutt et al. 2021). Todos esses estudos inferiram que a escassez de cavidades nas árvores é um provável fator determinante das diferenças no uso de florestas secundárias e antigas pelas aves.

A presença, a diversidade e o recrutamento de aves não escavadoras dependem não apenas da abundância de cavidades, mas também de suas características. Uma diversidade de características de cavidade pode ser importante para manter uma diversidade de espécies de ninhos de cavidade (por exemplo, aves de corpo grande e pequeno; Li e Martin 1991, Martin et al. 2004, Datta e Rawat 2004, Bonaparte e Cockle 2017, Di Sallo e Cockle 2022).

Cavidades grandes e formadas por decomposição, bem acima do solo, podem ser especialmente críticas para a manutenção de espécies de grande porte que habitam o dossel (por exemplo, araras, Renton e Brightsmith 2009; calaus, Poonswad 1995, Manikandan e Balasubramanian 2018). No entanto, essas cavidades estão fortemente associadas a florestas maduras (De Labra Hernández e Renton 2016, Ibarra et al. 2020, Schaaf et al. 2020). Em comparação com as florestas tropicais antigas, espera-se que as florestas exploradas e secundárias abriguem cavidades mais baixas, menores e mais rasas, adequadas para pequenas aves (Cockle et al. 2011, Bonaparte et al. 2020).

Aqui, estudamos a abundância e a diversidade de cavidades em florestas antigas e secundárias em processo de sucessão natural (restauração passiva) na Amazônia Central. Consideramos a floresta antiga para representar a linha de base e, em seguida, usamos uma substituição de espaço por tempo para examinar a restauração das cavidades das árvores na floresta secundária com idade entre 11 e 34 anos. Se a restauração passiva de cavidades de árvores ocorrer em florestas secundárias de 11 a 34 anos na Amazônia Central, previmos que a abundância de cavidades aumentaria com a idade da floresta. Se a queima de locais de corte raso retarda a restauração de cavidades durante a sucessão inicial, previmos que o aumento

com a idade ocorreria mais rapidamente em áreas expostas apenas ao corte, em comparação com áreas onde a floresta foi cortada e depois queimada intencionalmente. Por fim, comparamos as características e a diversidade das cavidades entre florestas antigas e secundárias. Considerando que as árvores devem atingir um determinado tamanho antes de poderem suportar uma cavidade grande e alta, esperávamos que as cavidades na floresta secundária fossem mais baixas, menores e menos variáveis do que as cavidades na floresta antiga.

MÉTODOS

Área de estudo

Pesquisamos cavidades de árvores em florestas de terra firme no Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais (BDFFP), ao norte de Manaus, no centro do Amazonas, Brasil (02° 20'S, 60° 5'W). Embora os ninhos de várias espécies ainda não tenham sido descritos, estimamos que a área de estudo abrigue aproximadamente 15 espécies de aves escavadoras, incluindo pica-paus (Picidae), surucuaes (Trogonidae) e bico-virado-miúdo (*Xenops minutus*), e 47 espécies de não escavadoras, incluindo passeriformes (Passeriformes), tucanos (Ramphastidae), papagaios (Psittacidae) e aves de rapina (Falconidae e Strigidae; Johnson et al. 2011, Rutt et al. 2017, van der Hoek et al. 2017, dados não publicados). Os não escavadores variam em tamanho em duas ordens de magnitude, por exemplo, desde o arapaçu-bico-de-cunha (*Glyphorhynchus spirurus*) de 14 g até a arara-vermelha (*Ara chloropterus*) de 1,5 kg.

A área de estudo compreendia ~90% de floresta tropical antiga (não cortada ou substancialmente perturbada por seres humanos em um período recente), com a área restante incluindo crescimento secundário, fragmentos de floresta isolados experimentalmente e pequenas áreas de pastagem (Figura S1, Rutt et al. 2019). O isolamento das reservas do

BDFFP começou em 1979. Algumas áreas foram cortadas sem queima, dando origem a uma floresta secundária dominada por *Cecropia sciadophylla*; outras áreas foram cortadas e depois queimadas intencionalmente, dando origem a uma floresta secundária inicialmente dominada por *Vismia* spp. (Mesquita et al. 2001). Quando os povoamentos de *Cecropia* e *Vismia* foram estudados aos 6 anos de idade, eles tinham alturas semelhantes (~1,5 m), mas os povoamentos jovens de *Cecropia* tinham mais árvores com diâmetro >5 cm, maior área basal e uma diversidade de espécies de florestas antigas no sub-bosque, enquanto os povoamentos de *Vismia* tinham apenas *Vismia* no sub-bosque, sugerindo que a *Vismia* pode inibir a regeneração de espécies de árvores de florestas antigas (Mesquita et al. 2001).

Na época de nosso estudo, a área era composta por um mosaico de florestas antigas, pastagens e florestas em regeneração de diferentes idades. Dentro desse mosaico, colocamos 39 parcelas: 8 em florestas antigas e 31 em florestas secundárias com idades entre 11 e 34 anos (Figura S1). Cada parcela media 200 x 40 m (0,8 ha). Para cada idade do povoamento, procuramos equilibrar o número de parcelas na floresta secundária que cresceu somente após o corte versus corte e queima, mas isso nem sempre foi possível (Tabela 1). As parcelas foram centralizadas ao longo de transectos lineares estabelecidos ou linhas de redes de neblina de outros projetos, com 200 m de comprimento e 20 m de extensão para cada lado. Espaçamos as parcelas da melhor forma possível, considerando a rede de trilhas existente, que era limitada, especialmente na floresta secundária. Não havia trilhas existentes na maior parte da floresta secundária, e a floresta mais jovem estava aglomerada devido ao manejo que a criou (Figura S1).

Métodos de campo

De julho a outubro de 2013, dois observadores procuraram cavidades examinando cada árvore em cada parcela, com o auxílio de binóculos. Para inspecionar o interior das cavidades,

usamos uma câmera de vídeo de 2 cm de diâmetro, que foi montada em uma vara telescópica de fibra de vidro de 15 m ou levada até a cavidade usando escalada em árvore com corda única (Politi et al. 2009, Di Sallo e Cockle 2022). As cavidades só foram incluídas em nosso conjunto de dados se tivessem um diâmetro suficiente para permitir a passagem de uma ave (>2 cm) e uma câmara interna capaz de oferecer proteção aos ovos (ou seja, com piso, paredes e alguma proteção suspensa, no mínimo; Politi et al. 2009). Excluimos as cavidades que continham água. Medimos a altura de cada cavidade a partir do peitoril inferior da entrada até o chão, usando a vara de 15 m, marcada a cada 10 cm. Para cavidades acima de 15 m, usamos a corda de escalada para medir a altura da cavidade. As dimensões da entrada e a profundidade horizontal foram medidas até o centímetro mais próximo usando uma fita métrica (se tivéssemos subido até a cavidade) ou uma régua de 35 cm presa ao topo da vara de 15 m. Usamos uma fita métrica para determinar a profundidade vertical das cavidades com precisão de centímetros. Nos poucos casos em que não foi possível escalar até as cavidades (por exemplo, árvores mortas em decomposição), mas onde pudemos acessar a cavidade com a câmera montada no poste, estimamos a profundidade vertical usando a imagem da câmera, depois de praticar primeiro nas cavidades que foram medidas com uma fita métrica. Usando o alpinismo ou o poste, conseguimos medir 93% das cavidades encontradas na floresta secundária e 92% das cavidades encontradas na floresta primária.

Análises

Usamos o R versão 4.2.0 (R Core Team 2022) para todas as análises estatísticas. Para avaliar o efeito da idade da floresta e do histórico de uso da terra sobre a disponibilidade de cavidades em florestas secundárias, usamos o pacote stats para criar um modelo linear generalizado (GLM, família quase-Poisson, log link). O modelo completo incluiu o número de cavidades por parcela como variável de resposta e a idade da floresta, o histórico de uso da terra (ou seja, apenas corte vs. corte e queima) e sua interação como variáveis preditoras.

Escolhemos a família quase-Poisson para a estrutura de erro porque a visualização preliminar dos dados e as análises com uma distribuição Poisson revelaram dispersão excessiva nos dados. As análises que usaram uma distribuição binomial negativa apresentaram resultados semelhantes aos da distribuição quase Poisson, mas optamos por uma distribuição quase Poisson porque queríamos dar mais peso aos valores mais altos de abundância de cavidades do que aos valores próximos de zero (Ver Hoef e Boveng 2007). Removemos um termo de interação não significativo e apresentamos os parâmetros do modelo com todos os efeitos principais nos Resultados. Para simplificar, removemos um efeito principal não significativo para produzir um modelo final para previsão. Também criamos um modelo constante (somente interceptação). Comparamos os modelos lineares generalizados usando a Análise de Desvio e apresentamos seus parâmetros na Tabela S1. Não se esperava que a relação entre a abundância de cavidades e a idade da floresta fosse linear, e observamos algumas prováveis não linearidades nos dados, de modo que usamos adicionalmente a função nls para ajustar uma curva de crescimento logístico de início automático (Fox e Weisberg 2010) e um modelo aditivo generalizado da família quase-Poisson com polinômios de até 3ª ordem (Wood 2017), considerando a idade da floresta como a única variável preditora. Mais informações e código são fornecidos no Material Suplementar 2.

Avaliamos se a densidade de cavidades adequadas na floresta secundária mais antiga poderia ser distinguida estatisticamente daquela da floresta primária. Para isso, usamos um teste de Wilcoxon (com correção de continuidade) para comparar o número de cavidades adequadas encontradas nas 8 parcelas de floresta antiga com o número encontrado nas 5 parcelas de floresta secundária de 31 a 34 anos (os dados não seguiram uma distribuição normal). Devido ao pequeno tamanho de nossa amostra, usamos $\alpha = 0,1$ nesse teste para evitar erros do tipo II.

Usamos os testes de Wilcoxon com correção de continuidade para comparar as características das cavidades entre florestas primárias e secundárias. Para explorar como as características das cavidades variam entre florestas de diferentes idades, usamos o comando `prcomp` (pacote `stats`) para realizar uma análise de componentes principais (PCA). Estipulamos `escala = TRUE` para usar a matriz de correlação, ponderando assim cada variável igualmente. Usamos a PCA para encontrar combinações lineares de altura da cavidade, diâmetro vertical, diâmetro horizontal, profundidade vertical e profundidade horizontal que melhor representam a variação nas características da cavidade. Seguimos o critério de Kaiser Guttman (Jackson 1993) e interpretamos os componentes principais com valores próprios > 1 . Os valores dos componentes principais de cada cavidade foram plotados para avaliar visualmente possíveis diferenças nos centroides e na variabilidade das características da cavidade entre a floresta secundária jovem (< 20 anos), a floresta secundária mais antiga (> 20 anos) e a floresta antiga.

RESULTADOS

Registramos 131 cavidades adequadas para ninhos de aves em nossas 8 parcelas de floresta antiga (média \pm SE = $20,5 \pm 4,2$ cavidades/ha, variação: 9–38) e 117 em nossas 31 parcelas de floresta secundária ($4,7 \pm 1,1$ cavidades/ha, variação: 0–17; Tabela 1, Figura 1). Não encontramos nenhuma cavidade nas oito parcelas de floresta secundária com 11–15 anos de idade, mas encontramos cavidades em 8 das 10 parcelas de floresta com 18–20 anos de idade, em 7 das 8 parcelas de floresta com 25–27 anos de idade, em todas as 5 parcelas de floresta com 31–34 anos de idade e em todas as 8 parcelas de floresta primária. Encontramos aproximadamente o dobro da densidade de cavidades na floresta primária em comparação com a floresta secundária mais antiga (31-34 anos; Tabela 1). No entanto, essa diferença foi apenas marginalmente significativa do ponto de vista estatístico ($W = 34$, $p = 0,055$) e várias

parcelas na floresta secundária (com 18 anos ou mais) apresentaram maior disponibilidade de cavidades do que muitas parcelas na floresta primária (Figura 1).

Todos os nossos modelos indicaram que a disponibilidade de cavidades aumentou com a idade da floresta (Tabela S1, Figuras 1 e S5). Nenhum dos modelos explicou a grande variação na abundância de cavidades nas florestas com 18–20 e 25–27 anos de idade, e todos os modelos superestimaram a abundância de cavidades na floresta mais jovem (Figuras S2–S5). A abundância de cavidades foi positivamente relacionada à idade da floresta secundária, mas não relacionada ao histórico de uso da terra (Figura 1A, Tabelas 2 e S1). Exploramos as não linearidades na relação entre a idade da floresta e a abundância de cavidades por meio de modelos aditivos generalizados, mas esses modelos não melhoraram o ajuste em relação ao modelo linear generalizado (Figura S5). Uma curva de crescimento logístico não linear também produziu previsões semelhantes às do modelo linear generalizado, indicando um ponto de inflexão aos 36 anos e uma assíntota de 22 cavidades por parcela de 0,8 ha (Figura S5).

Medimos 109 cavidades em florestas secundárias e 120 cavidades em florestas primárias. Em geral, as cavidades eram significativamente menores na floresta secundária do que na floresta primária (Tabela 3). Além disso, a análise multivariada sugeriu que as características das cavidades eram menos diversificadas na floresta secundária do que na floresta antiga (Figura 2). Os dois primeiros componentes principais tinham valores próprios > 1 e foram interpretados de acordo com o critério de Kaiser Guttman (Jackson 1993). O PC1 explicou 42% da variação da amostra e foi negativamente correlacionado com a profundidade horizontal ($r = -0,53$) e a profundidade vertical ($r = -0,53$). A PC2 explicou 24% da variação da amostra e foi positivamente correlacionada com o diâmetro vertical ($r = 0,59$) e o diâmetro horizontal ($r = 0,50$) e negativamente correlacionada com a altura da cavidade ($r = -0,56$; Figura 2). As cavidades em florestas primárias estavam dispersas ao longo de ambos os eixos,

demonstrando uma ampla gama de características de cavidades em florestas antigas (por exemplo, cavidades que variavam de pequenas a grandes e de baixas a altas). Por outro lado, as cavidades em florestas secundárias e, particularmente, as cavidades em florestas secundárias jovens (<20 anos de idade), agruparam-se no centro-direito do espaço multivariado (Figura 2), o que significa baixa variabilidade (cavidades pequenas, baixas e rasas).

DISCUSSÃO

As cavidades de árvores adequadas para nidificação de aves estavam inicialmente ausentes nas florestas secundárias da Amazônia central, aparecendo pela primeira vez 16 a 20 anos após o abandono da terra. Embora as áreas queimadas geralmente apresentem uma regeneração mais lenta do que as áreas não queimadas na Amazônia (Mesquita et al. 2001) e as florestas que estudamos ainda fossem jovens, não encontramos evidências que apoiassem a ideia de que o histórico de uso da terra (apenas corte vs. corte e queima) influenciasse a disponibilidade de cavidades. Depois de 31-34 anos, essas florestas secundárias ainda não tinham atingido os níveis de disponibilidade de cavidades encontrados em florestas primárias e não tinham cavidades grandes, profundas e altas, adequadas para muitas aves de grande porte (como tucanos, grandes aves de rapina e araras); no entanto, elas estavam claramente no caminho da recuperação e abrigavam cavidades que provavelmente eram adequadas para várias espécies de passeriformes não escavadores (por exemplo, arapaçus). Supomos que a ausência de cavidades nas árvores excluirá as aves que fazem ninhos em cavidades da reprodução na floresta secundária durante os primeiros 15 a 20 anos de sucessão na Amazônia central. Uma direção importante para pesquisas futuras é a extensão em que a restauração passiva de cavidades resulta na restauração de comunidades de aves que nidificam em

cavidades, conforme proposto por Newton (1998) sob a hipótese de que os locais de nidificação limitam as populações de aves que nidificam em cavidades em florestas jovens.

Nossa descoberta na Amazônia Central, de que a abundância de cavidades em florestas secundárias de 31 a 34 anos se aproximou dos níveis encontrados em florestas primárias, sugere, como esperado, um tempo de atraso relativamente curto para o desenvolvimento de cavidades em florestas tropicais em comparação com florestas subtropicais e temperadas. No sudeste subtropical do Brasil, a floresta atlântica secundária com 35 anos de idade abrigava menos da metade das cavidades/ha em comparação com a floresta primária (Katayama et al. 2017). Na Polônia temperada, a floresta secundária de pinheiros abrigava apenas 0,6 árvores com cavidades/ha entre 70 e 100 anos de idade, aumentando para 3,3 árvores/ha em povoamentos com mais de 130 anos de idade, ainda muito abaixo da densidade de árvores com cavidades em uma floresta primitiva (12,5 árvores com cavidades/ha; Zawadzka et al. 2016). No centro-oeste dos EUA, a floresta antiga suportava quase 5 vezes a densidade de árvores com cavidades em comparação com florestas com mais de 110 anos de idade (Fan et al. 2003). Alertamos que, em nosso estudo e em outros, a detectabilidade das cavidades pode diminuir com a idade e a complexidade da floresta, de modo que podemos estar subestimando as diferenças na abundância de cavidades entre florestas jovens e florestas antigas. Por outro lado, algumas espécies de aves que nidificam em cavidades de árvores na Amazônia também podem usar cavidades escavadas em termitaria arbórea, bolas de raízes epífitas e ninhos de vespas (Brightsmith 2004, 2005; Vasconcelos et al. 2015), que não foram incluídos em nosso estudo, e podem aumentar a disponibilidade geral de recursos. Considerando o clima quente e úmido da Amazônia, que favorece o rápido crescimento e a decomposição das árvores (Poorter et al. 2016, Chambers et al. 2000), sugerimos que aproximadamente 18 a 34 anos é a restauração passiva mais rápida de cavidades de árvores que provavelmente veremos em

florestas secundárias em todo o mundo, uma ordem de magnitude mais rápida do que em florestas temperadas.

Nossa análise do suprimento de cavidades ao longo do tempo não incluiu informações sobre como as cavidades foram produzidas (ou seja, apenas por decomposição ou facilitadas por escavadores aviários). Nas florestas maduras da região neotropical, o modo predominante de produção de cavidades é a decomposição e a quebra da madeira (Cornelius et al. 2008, Cockle et al. 2011, De Labra-Hernández e Renton 2016, Ruggera et al. 2016, Altamirano et al. 2017, Di Sallo e Cockle 2022, Soares et al. 2023). No entanto, os pica-paus e outros escavadores podem acelerar a restauração das cavidades das árvores em sistemas perturbados, como a floresta secundária, antes que haja tempo para a formação mais lenta de cavidades apenas pela decomposição (Cockle et al. 2017, Bonaparte et al. 2020). Estudos futuros devem examinar o papel das escavadeiras no fornecimento de cavidades na Amazônia e em outras florestas tropicais, com atenção especial para a forma como esse papel varia com a idade e a perturbação da floresta.

Uma defasagem de 18 a 34 anos é consideravelmente maior do que a vida útil da maioria das florestas secundárias na Amazônia brasileira, que muitas vezes está sujeita a cortes e rebrotas repetidos (por exemplo, em um ciclo de 5 a 10 anos; Yang et al. 2020). Não encontramos cavidades em florestas secundárias com 11 a 15 anos de idade. Embora a floresta secundária esteja disseminada na Amazônia brasileira, a maior parte dela tem atualmente menos de 10 anos (Yang et al. 2020) e permanece desprotegida (Vieira et al. 2014). Considerando que as taxas de acúmulo de biomassa e outras propriedades florestais variam regionalmente na Amazônia (por exemplo, Baker et al. 2004, Esquivel-Muelbert et al. 2018), as taxas de desenvolvimento de cavidades merecem um estudo mais aprofundado em uma série de florestas amazônicas. No entanto, mesmo considerando essa possível variação nas taxas de formação de cavidades, parece improvável que a floresta secundária forneça locais de

nidificação para aves que nidificam em cavidades, a menos que os ciclos de corte sejam estendidos por pelo menos uma década.

Embora a queima de pastagens tenha afetado fortemente a vegetação e as comunidades de aves durante a primeira década de crescimento da floresta secundária na Amazônia central, as comunidades de aves (Stouffer 2020) e a disponibilidade de cavidades (este estudo) convergiram logo depois. Em florestas temperadas, o fogo pode tanto eliminar cavidades existentes quanto facilitar o desenvolvimento de cavidades futuras, por exemplo, matando árvores ou quebrando galhos (Lindenmayer et al. 1993, Stojanovic et al. 2016). Quase nada se sabe sobre como o fogo afeta o habitat das aves que fazem ninhos em cavidades nas florestas tropicais, e seu efeito provavelmente dependerá da presença de árvores remanescentes, bem como da intensidade da queimada.

Nossas constatações de que as características das cavidades, como tamanho e altura, eram muito mais variáveis em florestas antigas do que em florestas secundárias, e que as florestas secundárias só suportavam cavidades pequenas e baixas, provavelmente indicam que 34 anos não é tempo suficiente para que as árvores de florestas secundárias desenvolvam cavidades grandes e altas. Da mesma forma, em outras partes da região neotropical, as cavidades eram menores e mais baixas em florestas secundárias, terras agrícolas abertas e florestas com corte seletivo, em comparação com florestas antigas e bem conservadas (De Labra Hernández e Renton 2016, Katayama et al. 2017, Bonaparte et al. 2020, Schaaf et al. 2020, 2022). As cavidades altas são restritas a árvores altas, e as cavidades com grande volume interno são restritas a árvores de grande diâmetro, onde os fungos tiveram tempo suficiente para colonizar e decompor progressivamente o cerne (Koch et al. 2008, Warakai et al. 2013, Zheng et al. 2016). Nas primeiras décadas da sucessão da floresta secundária tropical, as árvores são jovens e pequenas; árvores grandes, adequadas para cavidades

grandes, podem levar muitas décadas para crescer (Makelele et al. 2020), o que pode limitar os tamanhos e as alturas das cavidades por muitos anos.

Esperamos que o tamanho e a altura restritos das cavidades representem um importante filtro que limita a diversidade de aves que nidificam em cavidades em florestas tropicais secundárias. A diversidade de cavidades tem um efeito positivo sobre a abundância de aves que fazem ninhos em cavidades (Remm et al. 2008). Em florestas tropicais e subtropicais, muitas espécies que fazem ninhos em cavidades selecionam cavidades grandes e altas, que tendem a ocorrer em árvores grandes e antigas (por exemplo, Olah et al. 2014, de la Parra-Martínez et al. 2015). Por exemplo, em nossa área de estudo, quatro espécies de falcões-da-floresta (*Micrastur* spp.) variam em tamanho, desde o falcão-caburei (*Micrastur ruficollis*), com uma massa corporal média de 196 g, até o falcão-relógio (739 g; Dunning 2007). Os falcões-caburei na Guatemala e na Argentina fizeram seus ninhos em cavidades com 10 a 30 m de altura, 8 a 18 cm de diâmetro de entrada horizontal, 30 a 40 cm de profundidade horizontal e 3 a 200 cm de profundidade vertical (Thorstrom et al. 1990, Thorstrom et al. 2000b, Thorstrom 2001, Bonaparte & Cockle 2017, dados não publicados da última autora). Os falcões-relógio na Guatemala e na Venezuela fizeram seus ninhos em cavidades com 12-24 m de altura, 23-100 cm de profundidade vertical, 60 cm de profundidade horizontal e diâmetros de entrada de 16-60 cm (Mader 1979, Thorstrom et al. 1990, 2000a; Thorstrom 2001). Em uma floresta primária dentro da nossa área de estudo, um par de falcões-mateiro (*Micrastur gilvicollis*; fêmea: 209 g) aninhou-se em uma cavidade de 4 m de altura, 24 cm de diâmetro de entrada, 100 cm de profundidade horizontal e 180 cm de profundidade vertical (dados não publicados da primeira autora). Considerando 3,5 m como altura mínima, 25 cm como profundidade horizontal mínima e 8 cm como diâmetro mínimo de entrada (16 cm para a maior espécie), nossos 6,4 ha de floresta primária abrigavam 15 cavidades grandes e altas o suficiente para um pequeno *Micrastur* (2,3/ha). Uma dessas

cavidades (0,2/ha) era grande o suficiente para um Falcão-relógio. Em contraste, os 24,8 ha de floresta secundária abrigavam apenas duas cavidades adequadas para um pequeno falcão-da-floresta (0,1/ha), uma das quais também seria adequada para um falcão-relógio (0,04/ha). As cavidades adequadas para os falcões-da-floresta têm dimensões aproximadamente semelhantes às usadas pelos papagaios *Amazona* spp. (por exemplo, Rodríguez Castillo e Eberhard 2006, De Labra-Hernández e Renton 2016, Bonaparte e Cockle 2017, Di Sallo e Cockle 2022), das quais duas espécies, *Amazona farinosa* (626 g) e *Amazona autumnalis* (416 g) estão presentes em nossa área de estudo. Supomos que para os falcões da floresta, papagaios *Amazona* e outras aves de grande porte, incluindo arara-vermelha, arara-canindé (*Ara ararauna*, 1.2 kg), o tucano-de-papo-branco (*Ramphastos tucanus*, 595 g), o tucano-de-bico-preto (*Ramphastos vitellinus*, 363 g), o murucututu (*Pulsatrix perspicillata*, 908 g) e a coruja-de-crista (*Lophostrix cristata*, 620 g), as cavidades potenciais para ninhos permanecem muito raras ou ausentes na floresta secundária.

As barreiras relacionadas à escassez e ao tamanho pequeno das cavidades na floresta secundária poderiam ser estudadas e parcialmente superadas por meio de programas de caixas-ninho que poderiam ajudar a preencher a lacuna de aproximadamente 18 anos entre o abandono da pastagem e o desenvolvimento de cavidades na floresta secundária protegida. Algumas das espécies da nossa área de estudo foram registradas usando caixas-ninho em outras partes de suas distribuições (por exemplo, falcão-caburei na Argentina, Cockle et al. 2008; arapaçu-meio-barrado *Dendrocolaptes picumnus* na Colômbia, Botero-Delgadillo e Olaciregui 2011). Os programas de caixas-ninho oferecem um potencial de pesquisa interessante (por exemplo, Lambrechts et al. 2010, Warakai et al. 2013), mas as caixas-ninho são caras e de gerenciamento intensivo, muitas vezes são usadas apenas por um pequeno subconjunto de espécies que fazem ninhos em cavidades e podem ter impactos negativos inesperados sobre as aves (Lindenmayer et al. 2009, Le Roux et al. 2016a,b; Pedro 2023,

Zhang et al. 2023). Uma estratégia de conservação mais eficaz provavelmente seria a retenção de fragmentos florestais antigos e de grandes árvores legadas (árvores de uma geração mais antiga que persistem em florestas em estágio inicial de sucessão), mas são necessários estudos para examinar a viabilidade da retenção de árvores legadas e antigas na Amazônia e em outras florestas neotropicais. Mesmo quando não oferece locais de nidificação, a floresta amazônica secundária pode ser importante para a movimentação, forrageamento e empoleiramento de aves que fazem ninhos em cavidades e outras aves (Powell et al. 2015, Mokross et al. 2018, Stouffer 2020, Rutt e Stouffer 2021). É importante ressaltar que, como observaram Acevedo-Charry e Aide (2019), embora uma grande proporção de vertebrados de florestas tropicais possa colonizar e sobreviver em florestas secundárias, em muitos casos esse processo requer mais de 100 anos e, para que as florestas secundárias contribuam para a conservação desses grupos, elas precisam ser protegidas do desmatamento futuro a longo prazo.

Nosso estudo fornece uma avaliação robusta da disponibilidade de cavidades em florestas secundárias e antigas da Amazônia central, mas pouco se sabe sobre os requisitos de nidificação das aves amazônicas, e muitos ninhos ainda não foram descritos. Trabalhos anteriores em nossa área de estudo mostraram que as aves que fazem ninhos em cavidades estão ausentes ou são escassas em florestas secundárias jovens (Figueira et al. 2015, Rutt et al. 2021), e nossos resultados corroboram a ideia de que esse padrão pode ser impulsionado pela disponibilidade e pelo tamanho limitados das cavidades; no entanto, não temos evidências diretas de que o aumento da oferta ou da diversidade de cavidades leve a um maior uso da floresta secundária por não escavadores. Outros fatores, como a disponibilidade de alimentos, o risco de predação e as condições ambientais (como a luz ambiente) também são conhecidos por restringir a presença, a abundância e o recrutamento de aves que fazem ninhos em cavidades (Renton et al. 2015, Seixas e Mourão 2022). Embora desafiadores em florestas

tropicais (Stouffer et al. 2013, Rutt et al. 2021), os estudos de seleção de locais de nidificação, limitação de locais de nidificação e recrutamento são importantes para explorar os fatores que influenciam a recolonização da floresta secundária. Esses estudos informariam a conservação e a restauração das comunidades de aves, incluindo os ninhos de cavidade, e permitiriam que os pesquisadores aproveitassem ao máximo a floresta tropical de rápido crescimento para testar modelos de limitação e restauração de recursos.

Agradecimentos

Agradecemos a Osmaildo Ferreira, Cicero Lopes da Silva e Jairo Miranda Lopes pela assistência em campo e a Kurt Trzcinski pelo feedback sobre a abordagem de modelagem.

Declaração de financiamento. O financiamento para esta pesquisa foi fornecido a CDO pelo Cleveland Metroparks Zoo Scott Neotropical Fund; a CC pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); a PCS pela US National Science Foundation (LTREB 0545491) e pelo National Institute of Food and Agriculture, U.S.

Department of Agriculture, McIntire Stennis projects no. 94098 e nº 94327; e a KLC, pela Conservation, Research and Education Opportunities International (CREOI) e pelo Columbus Zoo and Aquarium Conservation Fund. CDO foi apoiado durante a pesquisa por uma bolsa da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) como aluno de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica (UFAM); KLC foi apoiado por uma bolsa de pós-doutorado do NSERC.

Declaração de ética. As atividades de campo foram aprovadas pela autorização 52655-1 do SISBIO. Esta é a publicação xxx da Série Técnica do BDFFP e xx da Série Técnica de Ornitologia Amazônica do Programa de Coleções do INPA. O manuscrito foi aprovado pelo Diretor do Centro Agrícola da Louisiana State University como manuscrito número xxx.

Declaração de conflito de interesses. Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Contribuições dos autores. Carine Dantas Oliveira: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise formal, Obtenção de financiamento, Investigação, Metodologia, Administração do projeto, Visualização, Redação - rascunho original, Redação - revisão e edição. Cintia Cornelius: Conceitualização, Obtenção de financiamento, Metodologia, Recursos, Supervisão, Redação - rascunho original, Redação - revisão e edição. Philip C. Stouffer: Conceitualização, Obtenção de financiamento, Metodologia, Supervisão, Redação - revisão e edição. Kristina L.

Cockle: Conceitualização, Análise formal, Obtenção de financiamento, Metodologia, Recursos, Supervisão, Visualização, Redação - rascunho original, Redação - revisão e edição. *Depósito de dados*. As análises relatadas neste artigo podem ser reproduzidas usando dados publicados no Dryad.

Declaração de Reflexividade

Pesquisadores locais/do país ou membros da comunidade foram envolvidos no projeto do estudo? Sim.

Como os produtos da pesquisa serão compartilhados para atender às necessidades locais?

Esta publicação fará parte da série técnica do Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais (BDFFP) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia em Manaus, Brasil. Os resultados da série técnica do BDFFP estão disponíveis para síntese e podem ser aplicados ao planejamento do uso da terra e às políticas públicas na região da Amazônia Central.

Os pesquisadores da região (especialmente mulheres, minorias de gênero e pesquisadores em início de carreira) são incluídos como autores? Sim. Na época da pesquisa, CDO era estudante de mestrado e CC era professor da Universidade Federal do Amazonas em Manaus, Brasil.

Os autores pesquisaram publicações relevantes em periódicos regionais, incluindo aquelas em outros idiomas além do inglês? Sim.

Se o estudo incluir pesquisadores de países de alta renda, como o projeto desenvolveu sua capacidade de trabalhar de forma colaborativa e equitativa com colegas da região de estudo? KLC era uma bolsista de pós-doutorado afiliada aos EUA na época da pesquisa. O projeto desenvolveu sua capacidade de orientação de estudantes de pós-graduação na América Latina, melhorou seu português e ajudou a desencadear uma série de colaborações para reduzir as barreiras para ornitólogos baseados na América Latina.

Como o projeto influenciou os meios e a capacidade dos pesquisadores da região de implementar sua agenda de pesquisa? O projeto fez com que a CDO obtivesse seu mestrado e contribuiu para a agenda de pesquisa contínua do CC.

REFERENCIAS

- Acevedo-Charry, O., and T. M. Aide (2019). Recovery of amphibian, reptile, bird and mammal diversity during secondary forest succession in the tropics. *Oikos* 128:1065–1078.
- Almeida, C. A., A. C. Coutinho, J. C. D. M. Esquerdo, M. Adami, A. Venturieri, C. G. Diniz, N. Dessay, L. Durieux, and A. R. Gomes (2016). High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. *Acta Amazonica* 46:291–302.
- Altamirano, T. A., J. T. Ibarra, K. Martin, and C. Bonacic (2017). The conservation value of tree decay processes as a key driver structuring tree cavity nest webs in South American temperate rainforests. *Biodiversity and Conservation* 26:2453–2472.
- Baker, T. R., O. L. Phillips, Y. Malhi, S. Almeida, L. Arroyo, A. Di Fiore, T. Erwin, N. Higuchi, T. J. Killeen, S. G. Laurance, et al. (2004). Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 359:353–365.
- Barlow, J., T. A. Gardner, I. S. Araujo, T. C. Ávila-Pires, A. B. Bonaldo, J. E. Costa, M. C. Esposito, L. V. Ferreira, J. Hawes, M. I. M. Hernandez, M. S. Hoogmoed, et al. (2007). Quantifying the biodiversity value of tropical primary, secondary, and plantation forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 104:8555–18560.
- Bednarz, J. C., M. J. Huss, T. J. Benson, and D. E. Varland (2013). The efficacy of fungal inoculation of live trees to create wood decay and wildlife-use trees in managed forests of western Washington, USA. *Forest Ecology and Management* 307:186–195.

- Bonaparte, E. B., and K. L. Cockle (2017). Nest niche overlap among endangered Vinaceous-breasted Parrot (*Amazona vinacea*) and sympatric cavity-using birds, mammals, and social insects in the subtropical Atlantic Forest. *The Condor: Ornithological Applications* 119:58–72.
- Bonaparte, E. B., J. T. Ibarra, and K. L. Cockle (2020). Conserving nest trees used by cavity-nesting birds from endangered primary Atlantic Forest to open farmland: increased relevance of excavated cavities in large dead trees on farms. *Forest Ecology and Management* 475:118440.
- Bongers, F., R. Chazdon, L. Poorter, and M. Peña-Claros (2015). The potential of secondary forests. *Science* 348:6235.
- Botero-Delgadillo, E., and C. A. Olaciregui (2011). Nueva información sobre la nidificación del Trepador Picofuerte (*Xiphocolaptes promeropirhynchus*) y el Trepador Colorado (*Dendrocolaptes picumnus*) a partir de observaciones en cajas nidos. *El Hornero* 26:79–84.
- Brightsmith, D. J. (2004). Nest sites of termitarium nesting birds in SE Peru. *Ornitología Neotropical* 15:319–330.
- Brightsmith, D. J. (2005). Competition, predation and nest niche shifts among tropical cavity nesters: phylogeny and natural history evolution of parrots (Psittaciformes) and trogons (Trogoniformes). *Journal of Avian Biology* 36:64–73.
- Chambers, J. Q., N. Higuchi, J. P. Schimel, L. V. Ferreira, and J. M. Melack (2000). Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon. *Oecologia* 122:380–388.
- Cockle, K., K. Martin, and K. Wiebe (2008). Availability of cavities for nesting birds in the Atlantic forest, Argentina. *Ornitología Neotropical* 19 (Suppl.):269–278.

- Cockle, K. L., K. Martin, and M. C. Drever (2010). Supply of tree-holes limits nest density of cavity-nesting birds in primary and logged subtropical Atlantic forest. *Biological Conservation* 143:851–2857.
- Cockle, K. L., K. Martin, and T. Wesołowski (2011). Woodpeckers, decay, and the future of cavity-nesting vertebrate communities worldwide. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9:377–382.
- Cockle, K. L., K. Martin, and G. Robledo (2012). Linking fungi, trees, and hole-using birds in a Neotropical tree-cavity network: pathways of cavity production and implications for conservation. *Forest Ecology and Management* 264:210–219.
- Cockle, K. L., K. Martin, and A. Bodrati (2017). Persistence and loss of tree cavities used by birds in the subtropical Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management* 384:200–207.
- Conner, R. N., and B. A. Locke (1982). Fungi and Red-cockaded Woodpecker cavity trees. *Wilson Bulletin* 94:64–70.
- Cornelius, C., K. Cockle, N. Politi, I. Berkunsky, L. Sandoval, V. Ojeda, L. Rivera, M. Hunter, Jr., and K. Martin (2008). Cavity-nesting birds in Neotropical forests: Cavities as a potentially limiting resource. *Ornitología Neotropical* 19(Suppl.):253–268.
- Crozariol, M. A. (2016). Espécies de aves com ninhos não descritos ou pouco conhecidos das famílias Tityridae, Platyrinchidae, Pipritidae, Pipromorphidae e Tyrannidae: um pedido de auxílio aos observadores de aves! *Atualidades Ornitológicas* 189:18–24.
- Cuatianquiz Lima, C., and C. Macías Garcia (2016). Pre- and post-experimental manipulation assessments confirm the increase in number of birds due to the addition of nest boxes. *PeerJ* 4:e1806.
- Datta, A., and G. S. Rawat (2004). Nest-site selection and nesting success of three hornbill species in Arunachal Pradesh, north-east India: Great Hornbill *Buceros bicornis*,

- Wreathed Hornbill *Aceros undulatus* and Oriental Pied Hornbill *Anthracoceros albirostris*. *Bird Conservation International* 14:S39–S52.
- De la Parra-Martínez, S. M., K. Renton, A. Salinas-Melgoza, and L. G. Muñoz-Lacy (2015). Tree-cavity availability and selection by a large-bodied secondary cavity-nester: the Military Macaw. *Journal of Ornithology* 156:489–498.
- De Labra-Hernández, M. Á., and K. Renton (2016). Importance of large, old primary forest trees in nest-site selection by the Northern Mealy Amazon (*Amazona guatemalae*). *Tropical Conservation Science* 9: 1940082916680361.
- De Labra-Hernández, M. Á., and K. Renton (2017). Factors influencing density of the Northern Mealy Amazon in three forest types of a modified rainforest landscape in Mesoamerica. *Avian Conservation and Ecology* 12:5.
- DeWalt, S. J., S. K. Maliakal, and J. S. Denslow (2003). Changes in vegetation structure and composition along a tropical forest chronosequence: implications for wildlife. *Forest Ecology and Management* 182:139–151.
- Di Sallo, F. G., and K. L. Cockle (2022). The role of body size in nest-site selection by secondary cavity-nesting birds in a subtropical Chaco forest. *Ibis* 164:168–187.
- Dunn, R. R. 2004. Recovery of faunal communities during tropical forest regeneration. *Conservation Biology* 18:302–309.
- Dunning, J. B., Jr. (2007). *CRC Handbook of Avian Body Masses*. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Esquivel-Muelbert, A., T. R. Baker, K. G. Dexter, S. L. Lewis, R. J. W. Brienen, T. R. Feldpausch, J. Lloyd, A. Monteagudo-Mendoza, L. Arroyo, E. Álvarez-Dávila, et al. (2018). Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology* 25:39–56.

- Fan, Z., S. R. Shifley, M. A. Spetich, F. R. Thompson III, and D. R. Larsen (2003). Distribution of cavity trees in midwestern old- growth and second-growth forests. *Canadian Journal of Forest Research* 33:1481–1494.
- Figueira, L., J. L. Tella, U. M. Camargo, and G. Ferraz (2015). Autonomous sound monitoring shows higher use of Amazon old growth than secondary forest by parrots. *Biological Conservation* 184:27–35.
- Fox, J., and S. Weisberg (2010). *Nonlinear Regression and Nonlinear Least Squares in R. An Appendix to An R Companion to Applied Regression, second edition*. SAGE Publications, Inc., Thousand Oaks, California, USA.
- Gibbons, P., and D. Lindenmayer (2002). *Tree Hollows and Wildlife Conservation in Australia*. CSIRO Publishing, Collingwood, Victoria, Australia.
- Heinrich, V. H. A., R. Dalagnol, H. L. G. Cassol, T. M. Rosan, C. Torres de Almeida, C. H. L. Silva Junior, W. A. Campanharo, J. I. House, S. Sitch, T. C. Hales, et al. (2021). Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. *Nature Communications* 12:1785.
- Holt, R. F., and K. Martin (1997). Landscape modification and patch selection: The demography of two secondary cavity nesters colonizing clearcuts. *The Auk* 114:443–455.
- Ibarra, J. T., K. L. Cockle, T. A. Altamirano, Y. van der Hoek, S. Simard, C. Bonacic, and K. Martin (2020). Nurturing resilient forest biodiversity: nest webs as complex adaptive systems. *Ecology & Society* 25:27.
- Jackson, D. A. (1993). Stopping rules in principal components analysis: a comparison of heuristical and statistical approaches. *Ecology* 74:2204–2214.
- Jackson, J. A., and B. J. S. Jackson (2004). Ecological relationships between fungi and woodpecker cavity sites. *Condor* 106:37–49.

- Johnson, E. I., P. C. Stouffer, and C. F. Vargas (2011). Diversity, biomass, and trophic structure of a central amazonian rainforest bird community. *Revista Brasileira de Ornitologia* 19:1–16.
- Katayama, M. V., P. V. Q. Zima, D. F. Perrella, and M. R. Francisco (2017). Successional stage effect on the availability of tree cavities for cavity-nesting birds in an Atlantic Forest park from the state of São Paulo, Brazil. *Biota Neotropica* 17:e20170391.
- Koch, A. J., S. A. Munks, D. Driscoll, J. B. Kirkpatrick (2008). Does hollow occurrence vary with forest type? A case study in wet and dry *Eucalyptus obliqua* forest. *Forest Ecology and Management* 255:3938–3951.
- Lambrechts, M. M., F. Adriaensen, D. R. Ardia, A. V. Artemyev, F. Atiénzar, J. Bánbura, E. Barba, J.-C. Bouvier, J. Camprodon, C. B. Cooper, R. D. Dawson, *et al.* (2010). The design of artificial nestboxes for the study of secondary hole-nesting birds: A review of methodological inconsistencies and potential biases. *Acta Ornithologica* 45:1–26.
- Le Roux, D. S., K. Ikin, D. B. Lindenmayer, G. Bistricher, A. D. Manning, and P. Gibbons. 2016a. Enriching small trees with artificial nest boxes cannot mimic the value of large trees for hollow-nesting birds. *Restoration Ecology* 24:252–258.
- Le Roux, D. S., K. Ikin, D. B. Lindenmayer, G. Bistricher, A. D. Manning, and P. Gibbons. 2016b. Effects of entrance size, tree size and landscape context on nest box occupancy: Considerations for management and biodiversity offsets. *Forest Ecology and Management* 366:135–142.
- Li, P., and T. E. Martin (1991). Nest-site selection and nesting success of cavity-nesting birds in high elevation forest drainages. *The Auk* 108:405–418.
- Lindenmayer, D. B., R. B. Cunningham, C. F. Donnelly, M. T. Tanton, and H. A. Nix (1993). The abundance and development of cavities in *Eucalyptus* trees: A case study in the

- montane forests of Victoria, southeastern Australia. *Forest Ecology and Management* 60:77–104.
- Lindenmayer, D. B., A. Welsh, C. Donnelly, M. Crane, D. Michael, C. Macgregor, L. McBurney, R. Montague-Drake, P. Gibbons (2009). Are nest boxes a viable alternative source of cavities for hollow-dependent animals? Long-term monitoring of nest box occupancy, pest use and attrition. *Biological Conservation* 142:33–42.
- Lorenz, T. J., K. T. Vierling, T. R. Johnson, and P. C. Fischer (2015). The role of wood hardness in limiting nest site selection in avian cavity excavators. *Ecological Applications* 25:1016–1033.
- Mader, W. J. (1979). First nest description for the genus *Micrastur* (forest falcons). *The Condor* 81:320.
- Makelele, I. A., K. Verheyen, P. Boeckx, L. C. Ntaboba, B. M. Bazirake, C. Ewango, and M. Bauters (2020). Afrotropical secondary forests exhibit fast diversity and functional recovery, but slow compositional and carbon recovery after shifting cultivation. *Journal of Vegetation Science* 32:e13071.
- Manikandan, P., and P. Balasubramanian (2018). Sequential use of tree cavities by birds and nest web in a riparian forest in southwest India. *Acta Ornithologica* 53:49–60.
- Martin, P. A., A. C. Newton, and J. M. Bullock (2013). Carbon pools recover more quickly than plant diversity in tropical secondary forests. *Proceedings of the Royal Society B* 280:20132236.
- Martin, K., K. E. H. Aitken, and K. L. Wiebe (2004). Nest sites and nest webs for cavity-nesting communities in interior British Columbia, Canada: Nest characteristics and niche partitioning. *The Condor* 106:5–19.

- Martínez-Ruiz, M. (2021). Habitat use and selection by the Collared Forest-Falcon (*Micrastur semitorquatus*) in the tropical rainforest of Los Tuxtlas Biosphere Reserve, Mexico. *Journal of Raptor Research* 55:201–210.
- Mesquita, R. C. G., K. Ickes, G. Ganade, and G. B. Williamson (2001). Alternative successional pathways in the Amazon basin. *Journal of Ecology* 89:528–537.
- Mokross, K., J. R. Potts, C. L. Rutt, and P. C. Stouffer (2018). What can mixed-species flock movement tell us about the value of Amazonian secondary forests? Insights from spatial behavior. *Biotropica* 50:664–673.
- Newton, I. (1998). *Population Limitation in Birds*. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Niringiyimana, A., A. Nzarora, J. C. Twahirwa, and Y. van der Hoek (2022). Density and characteristics of tree cavities inside and outside Volcanoes National Park, Rwanda. *Ecology and Evolution* 12:e9461.
- Nyirenda, V. R., F. C. Chewes, E. Chisha-Kasumu, and P. A. Lindsey (2016). Nest sites selection by sympatric cavity-nesting birds in miombo woodlands. *Koedoe* 58:a1359.
- Olah, G., G. Vigo, R. Heinsohn, and D. J. Brightsmith (2014). Nest site selection and efficacy of artificial nest for breeding success of Scarlet Macaws *Ara macao* in lowland Peru. *Journal of Nature Conservation* 22:176–185.
- Omeja, P. A., M. J. Lawes, A. Corriveau, K. Valenta, D. Sarkar, F. Pozzan Paim, and C. A. Chapman (2016). Recovery of tree and mammal communities during large-scale forest regeneration in Kibale National Park, Uganda. *Biotropica* 48:770–779.
- Pedro, M. K. P. 2023. Ninhos artificiais não substituem cavidades naturais para aves em remanescentes de vegetação nativa em matriz antropizada no sudeste do Brasil. Undergraduate thesis in Biological Sciences, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, São Paulo, Brazil.

- Pichorim, M. (2006). Reproduction of the Mottled Piculet in southern Brazil. *Journal of Field Ornithology* 77:244–249.
- Politi, N., M. Hunter Jr., and L. Rivera (2009). Nest selection by cavity-nesting birds in subtropical montane forests of the Andes: Implications for sustainable forest management. *Biotropica* 41:354–360.
- Politi, N., M. Hunter Jr., and L. Rivera (2010). Availability of cavities for avian cavity nesters in selectively logged subtropical montane forests of the Andes. *Forest Ecology and Management* 260:893–906.
- Politi, N., M. Hunter Jr., and L. Rivera (2012). Assessing the effects of selective logging on birds in Neotropical piedmont and cloud montane forests. *Biodiversity and Conservation* 21:3131–3155.
- Poonswad, P. (1995). Nest site characteristics of four sympatric species of hornbills in Khao Yai National Park, Thailand. *Ibis* 137:183–191.
- Poorter, L., F. Bongers, T. Mitchell Aide, A. M. Almeyda Zambrano, P. Balvanera, J. M. Becknell, V. Boukili, P. H. S. Brancalion, E. N. Broadbent, R. L. Chazdon, D. Craven et al. 2016. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature* 530:211–214.
- Powell, L. L., J. D. Wolfe, E. I. Johnson, J. E. Hines, J. D. Nichols, and P. C. Stouffer (2015). Heterogeneous movement of insectivorous Amazonian birds through primary and secondary forest: A case study using multistate models with radiotelemetry data. *Biological Conservation* 188:100–108.
- R Core Team (2022). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Remm, J., A. Lõhmus, and R. Rosenvald (2008). Density and diversity of hole-nesting passerines: Dependence on the characteristics of cavities. *Acta Ornithologica* 43:83–91.

- Renner, S. C., M. Waltert, and M. Mühlenberg (2006). Comparison of bird communities in primary vs. young secondary tropical montane cloud forest in Guatemala. *Biodiversity and Conservation* 15:1545–1575.
- Renton, K., and D. J. Brightsmith (2009). Cavity use and reproductive success of nesting macaws in lowland forest of southeast Peru. *Journal of Field Ornithology* 80:1–8.
- Renton, K., A. Salinas-Melgoza, M. Á. De Labra-Hernández, S. M. de la Parra-Martínez (2015). Resource requirements of parrots: Nest site selectivity and dietary plasticity of Psittaciformes. *Journal of Ornithology* 156:73–90.
- Robledo, G., and C. Urcelay (2009). Hongos de la Madera en Árboles Nativos del Centro de Argentina. Editorial Universitaria, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Rodríguez Castillo, A. M., and J. R. Eberhard (2006). Reproductive behavior of the Yellow-crowned Parrot (*Amazona ochrocephala*) in Western Panama. *The Wilson Journal of Ornithology* 18:225–236.
- Ruggera, R. A., A. A. Schaaf, C. G. Vivanco, N. Politi, and L. O. Rivera (2016). Exploring nest webs in more detail to improve forest management. *Forest Ecology and Management* 372:93–100.
- Rutt, C. L., and P. C. Stouffer (2021). Seasonal dynamics of flock interaction networks across a human-modified landscape in lowland Amazonian rain forest. *Ecological Applications* 31:e02235.
- Rutt, C. L., V. Jirinec, E. I. Johnson, M. Cohn-Haft, C. F. Vargas, and P. C. Stouffer (2017). Twenty years later: An update to the birds of the Biological Dynamics of Forest Fragments Project, Amazonas, Brazil. *Revista Brasileira de Ornitologia* 25:277–296.

- Rutt, C. L., V. Jirinec, M. Cohn-Haft, W. F. Laurance, and P. C. Stouffer (2019). Avian ecological succession in the Amazon: A long-term case study following experimental deforestation. *Ecology and Evolution* 9:13850–13861.
- Rutt, C. L., M. D. Kaller, and P. C. Stouffer (2021). Disturbed Amazonian forests support diminished breeding bird communities. *Ornithological Applications* 123:1–15.
- Santamaría-Rivero, W., E. Leyequién, J. L. Hernández-Stefanoni, and P. Wood (2016). Influence of landscape structure and forest age on the richness and abundance of different bird feeding guilds and forest-dependent birds in a seasonal dry tropical forest of Yucatan, Mexico. *Tropical Ecology* 57:313–332.
- Schaaf, A. A., D. Gomez, R. A. Ruggera, E. Tallei, C. G. Vivanco, N. Politi, and L. Rivera (2020). Functional diversity of tree cavities for secondary cavity-nesting birds in logged subtropical Piedmont forests of the Andes. *Forest Ecology and Management* 464:118069.
- Schaaf, A. A., D. Gomez, E. Tallei, C. G. Vivanco, and R. A. Ruggera (2021). Responses of functional traits in cavity-nesting birds to logging in subtropical and temperate forests of the Americas. *Scientific Reports* 11:24309.
- Schaaf, A. A., C. G. García, R. A. Ruggera, E. Tallei, C. G. Vivanco, L. Rivera, and N. Politi (2022). Influence of logging on nest density and nesting microsites of cavity-nesting birds in the subtropical forests of the Andes. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 95:73–82.
- Seixas, G. H. F., and G. Mourão (2022). A long-term study indicates that tree clearance negatively affects fledgling recruitment to the Blue-fronted Amazon (*Amazona aestiva*) population. *PLoS ONE* 17:e0267355.
- Soares, L., K. L. Cockle, E. Ruelas Inzunza, J. T. Ibarra, C. I. Miño, S. Zuluaga, E. Bonaccorso, J. C. Ríos-Orjuela, F. A. Montaña-Centellas, J. F. Freile et al. (2023).

- Neotropical ornithology: Reckoning with historical assumptions, removing systemic barriers, and reimagining the future. *Ornithological Applications* 125:duac046.
- Stojanovic, D., J. Webb nee Voogdt, M. Webb, H. Cook, and R. Heinsohn (2016). Loss of habitat for a secondary cavity nesting bird after wildfire. *Forest Ecology and Management* 360:235–241.
- Stouffer, P. C. (2020). Birds in fragmented Amazonian rainforest: Lessons from 40 years at the Biological Dynamics of Forest Fragments Project. *Ornithological Applications* 122:1–15.
- Stouffer, P. C., E. I. Johnson, R. O. Bierregaard Jr. (2013). Breeding seasonality in Central Amazonian rainforest birds. *The Auk* 130:529–540.
- Thorstrom, R. (2001). Nest-site characteristics and breeding density of two sympatric forest-falcons in Guatemala. *Ornitología Neotropical* 12:337–343.
- Thorstrom, R., J. D. Ramos, and J. D. Castillo (2000a). Breeding biology and behavior of the Collared Forest-Falcon (*Micrastur semitorquatus*) in Guatemala. *Ornitología Neotropical* 11:1–12
- Thorstrom, R., J. D. Ramos, and C. M. Morales (2000b). Breeding biology of Barred Forest-Falcons (*Micrastur ruficollis*) in Northeastern Guatemala. *The Auk* 117:781–786.
- Thorstrom, R. K., C. W. Turley, F. G. Ramirez, and B. A. Gilroy (1990). Descriptions of nests, eggs, and young of the Barred Forest-Falcon (*Micrastur ruficollis*) and of the Collared Forest-Falcon (*M. semitorquatus*). *The Condor* 92:237–239.
- van der Hoek, Y., G. V. Gaona, and K. Martin (2017). The diversity, distribution and conservation status of the tree-cavity-nesting-birds of the world. *Diversity and Distributions* 23:1120–1131.

- Vasconcelos M. F., D. Hoffmann, M. C. de Araújo, and P. N. Vasconcelos (2015). Bird-termite interactions in Brazil: A review with perspectives for future studies. *Biota Neotropical* 15:1–22.
- Ver Hoef, J. M., and P. L. Boveng (2007). Quasi-Poisson vs. negative binomial regression: How should we model overdispersed count data? *Ecology* 88: 2766–2772.
- Vieira, I. C. G., T. Gardner, J. Ferreira, A. C. Lees, and J. Barlow (2014). Challenges of governing second-growth forests: a case study from the Brazilian Amazonian state of Pará. *Forests* 5:1737–1752.
- Warakai, D., D. S. Okena, P. Igag, M. Opiang, and A. L. Mack (2013). Tree cavity-using wildlife and the potential of artificial nest boxes for wildlife management in New Guinea. *Tropical Conservation Science* 6:711–733.
- Wesołowski, T., and K. Martin (2018). Tree holes and hole-nesting birds in European and North American forests. In *Ecology and Conservation of Forest Birds* (G. Mikusiński , J-M. Roberge, and R. Fuller, Editors). Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp.79-134.
- Wiebe, K. L. (2011). Nest sites as limiting resources for cavity-nesting birds in mature forest ecosystems: a review of the evidence. *Journal of Field Ornithology* 82:239–248.
- Wood, S. N. (2017). *Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd edition)*. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, Florida, USA.
- Wright, S. J., and H. C. Muller-Landau (2006). The future of tropical forest species. *Biotropica* 38:287–301.
- Yang, Y., S. Saatchi, L. Xu, M. Keller, C. R. Corsini, L. E. O. C. Aragão, A. P. Aguiar, Y. Knyazikhin, and R. B. Myneni (2020). Interannual variability of carbon uptake of secondary forests in the Brazilian Amazon (2004-2014). *Global Biogeochemical Cycles* 34:e2019GB006396.

Zawadzka, D., S. Drozdowski, G. Zawadzki, and J. Zawadzki (2016). The availability of cavity trees along an age gradient in fresh pine forests. *Silva Fennica* 50:1441.

Zhang, L., X. Ma, Z. Chen, C. Wang, Z. Liu, X. Li, and X. Xing (2023). Negative effects of artificial nest boxes on birds: A review. *Avian Research* 14:100101

Zheng, Z., S. Zhang, C. Baskin, J. Baskin, D. Schaefer, X. Yang, and L. Yang (2016).

Hollows in living trees develop slowly but considerably influence the estimate of forest biomass. *Functional Ecology* 30:830–838.

Tabela 1. Número de parcelas e número de cavidades/ha (média \pm SE) em florestas antigas e secundárias. A idade indica a idade da floresta desde o abandono (início da restauração passiva). As parcelas são divididas por histórico de uso da terra (corte e queima vs. somente corte).

Tipo de floresta	Idade (anos)	Número de parcelas			Cavidades/ha
		Somente corte	Cortado e queimado	Total	
Secundário	11-15	4	4	8	0 \pm 0
Secundário	18-20	6	4	10	5.5 \pm 2.1
Secundário	25-27	4	4	8	5.3 \pm 2.1
Secundário	31-34	5	0	5	9.8 \pm 2.2
Floresta antiga	Desconhecido	0	0	8	20.5 \pm 4.2

Tabela 2. A idade da floresta é importante na previsão do suprimento de cavidades.

Parâmetros de um modelo linear generalizado (família quase-Poisson) que prevê o número de cavidades em 31 parcelas de 0,8 ha na floresta amazônica secundária com idade entre 11 e 34 anos.

Parâmetro	$b \pm SE$	t	P
Interceptação	-1.17 ± 1.12	-1.04	0.31
Idade da floresta	0.10 ± 0.04	-2.60	0.01
História (cortada e queimada)	0.13 ± 0.52	0.25	0.80

Tabela 3. Medidas (média \pm SE [intervalo]) de 109 cavidades em floresta secundária e 120 cavidades em floresta antiga da Amazônia central, com estatísticas associadas ao teste de soma de postos de Wilcoxon (com correção de continuidade).

Medições de cavidades	Secundário	Floresta antiga	Estatística de teste (<i>W</i>)	<i>P</i>
Altura (m)	4.8 \pm 0.2 [1.4-10.7]	5.7 \pm 0.4 [1.6-22.0]	6090	0.37
Diâmetro da entrada horizontal (cm)	7 \pm 0.4 [2-35]	8 \pm 0.4 [3-25]	5032	0.0021
Diâmetro da entrada vertical (cm)	10 \pm 1 [3-35]	15 \pm 0.8 [3-60]	3796	<0.0001
Profundidade horizontal (cm)	15 \pm 0.3 [10-35]	18 \pm 0.8 [10-80]	4755	0.0003
Profundidade vertical (cm)	18 \pm 1 [5-50]	27 \pm 2 [12-90]	3414	<0.0001

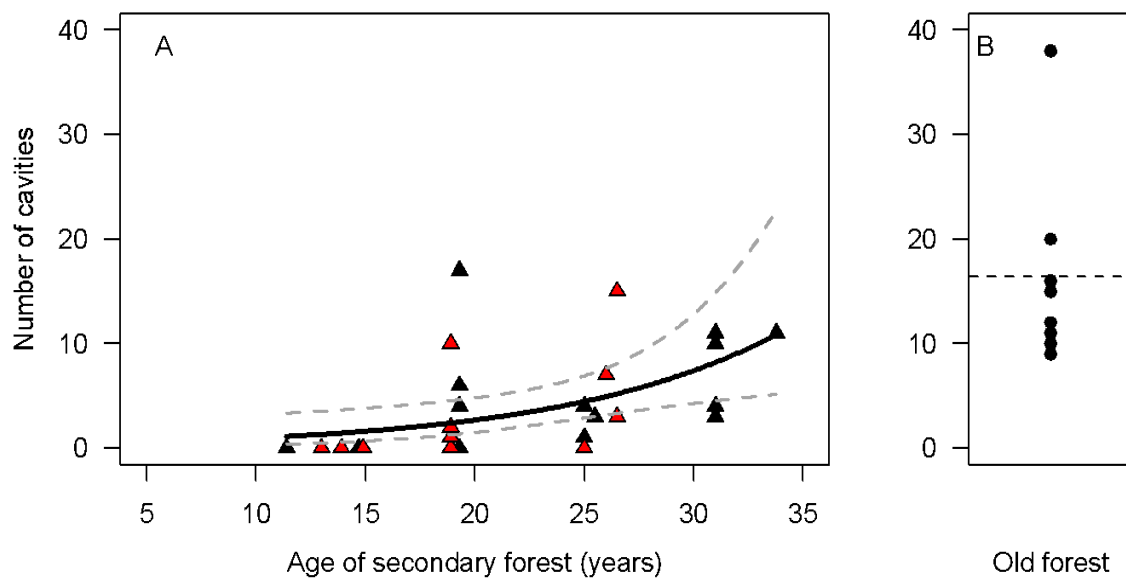


Figura 1. A oferta de cavidades aumenta com a idade da floresta em parcelas de 0,8 ha na Amazônia central (31 parcelas em floresta secundária, 8 parcelas em floresta antiga). (A) Número de cavidades vs. idade da floresta, em floresta secundária em regeneração após corte e queima (triângulos vermelhos) ou apenas corte (triângulos pretos). A linha sólida indica os valores previstos do modelo linear generalizado da família quase-Poisson: cavidades \sim idade da floresta. As linhas cinzas tracejadas indicam intervalos de confiança de 95% nos valores previstos. (B) Número de cavidades em oito parcelas em uma floresta antiga. A linha horizontal quebrada indica a média.

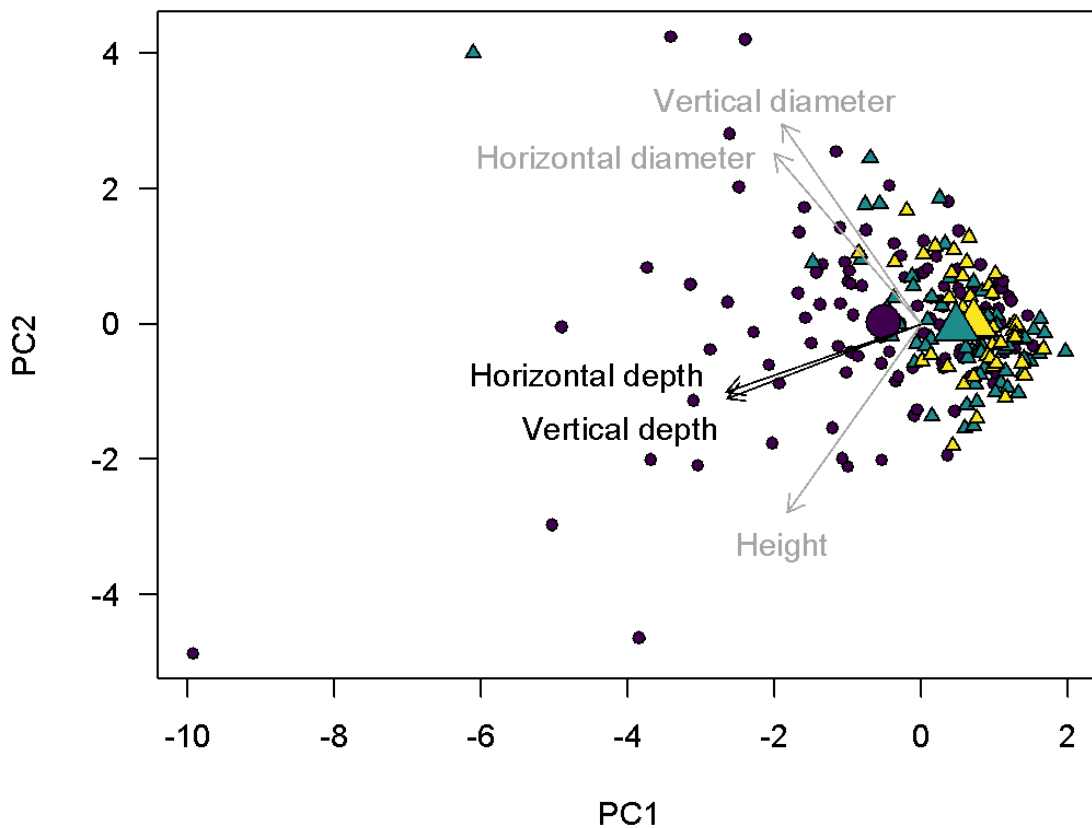


Figura 2. As características das cavidades são mais variáveis em florestas antigas do que em florestas secundárias. Análise de componentes principais (PCA) mostrando a variação nas características de 120 cavidades medidas em floresta antiga (roxo escuro), 42 em floresta secundária de 18 a 20 anos (triângulos amarelos) e 67 em floresta secundária de 25 a 34 anos (triângulos turquesa). Os símbolos grandes indicam os centroides de cada tipo de floresta. A PC1 está negativamente correlacionada com a profundidade horizontal e vertical (setas pretas), e a PC2 está positivamente correlacionada com o diâmetro da entrada e negativamente correlacionada com a altura da cavidade acima do solo (setas cinzas). As cavidades em florestas antigas ocupam a maior parte do espaço de ordenação, enquanto as cavidades em florestas secundárias se agrupam à direita, o que significa baixa variabilidade em suas características.

Material suplementar 2

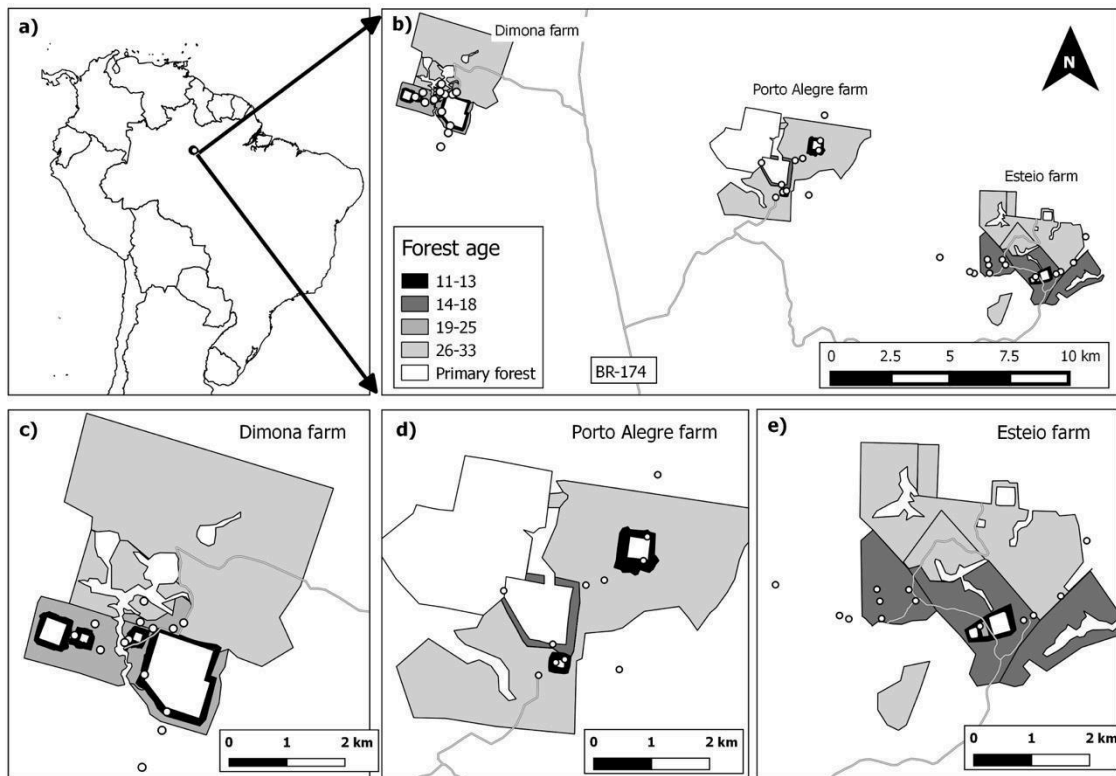


Figura S1. Localização do Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais (BDFFP) e mapa indicando a idade da floresta e a localização de 39 parcelas (pontos brancos).

Tabela S1. Estimativas de parâmetros para modelos lineares generalizados (família quase-Poisson, ligação logarítmica) que preveem a disponibilidade de cavidades a partir da idade da floresta secundária, histórico de uso da terra (corte e queima vs. somente corte) e sua interação.

Modelo	Parâmetro	$b \pm SE$	t	P
Completo	Interceptação	-0.62 ± 1.2	-0.53	0.60
	Idade da floresta	0.08 ± 0.04	1.94	0.06
	História (cortada e queimada)	-2.35 ± 2.65	-0.89	0.38
	Idade da floresta \times histórico	0.10 ± 0.11	0.97	0.34
Todos os efeitos principais	Interceptação	-1.17 ± 1.12	-1.04	0.31
	Idade da floresta	0.10 ± 0.04	-2.60	0.01
	História (cortada e queimada)	0.13 ± 0.52	0.25	0.80
Idade da floresta	Interceptação	-1.04 ± 0.95	-1.09	0.29
	Idade da floresta	0.10 ± 0.04	2.78	0.01
Somente interceptação	Interceptação	1.33 ± 0.23	5.82	>0.001

Análise de desvio

Modelo completo vs. Todos os efeitos principais: Desvio = 6,2, df = 1, p = 0,30

Todos os efeitos principais vs. somente a idade da floresta: Desvio = 0,39, df = 1, p = 0,80

Idade da floresta vs. modelo somente de interceptação: Desvio = 47,7, df = 1, p = 0,004

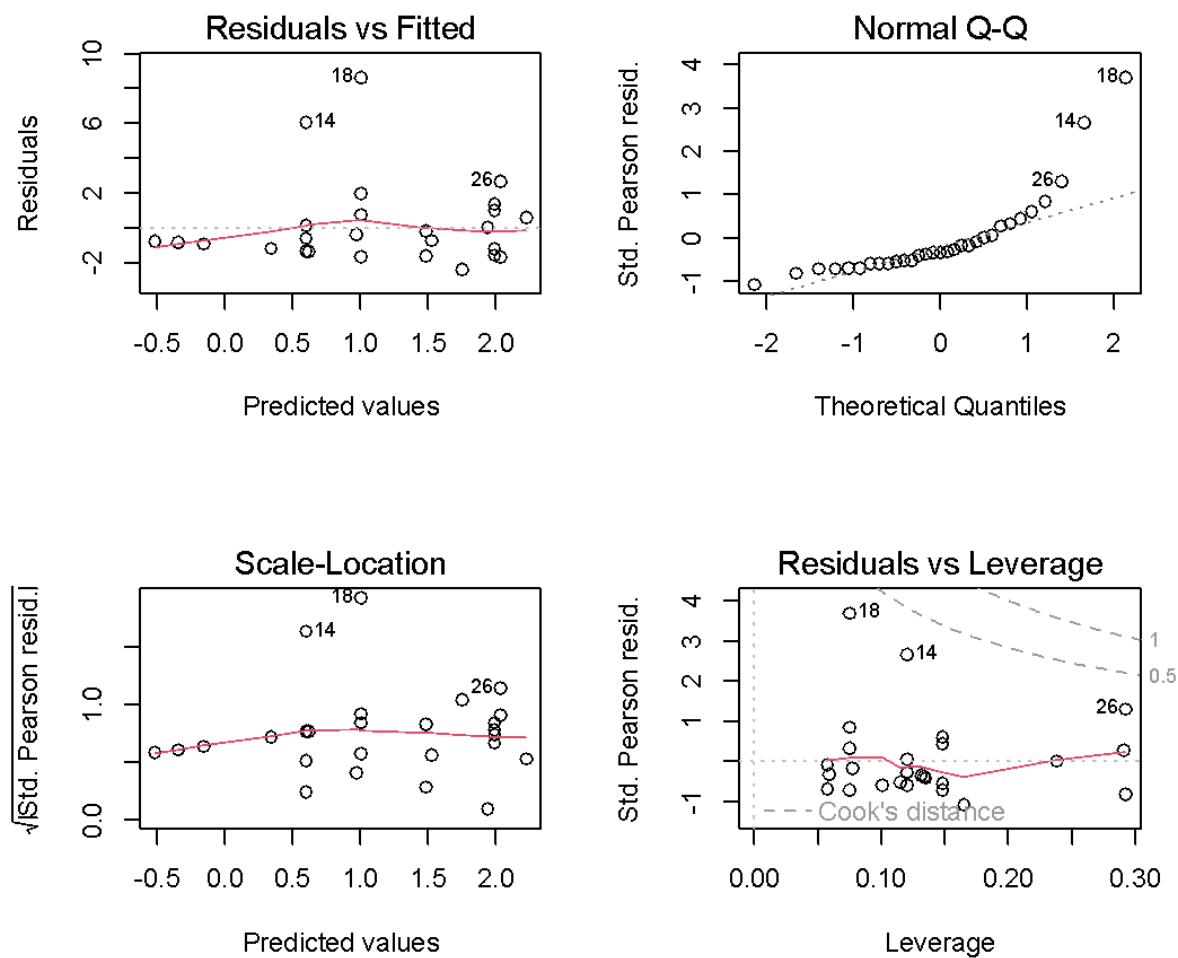


Figura S2. Diagnóstico do modelo para o modelo linear generalizado completo (família quase-Poisson, ligação logarítmica) que prevê a disponibilidade de cavidades a partir da idade da floresta secundária, histórico de uso da terra e sua interação.

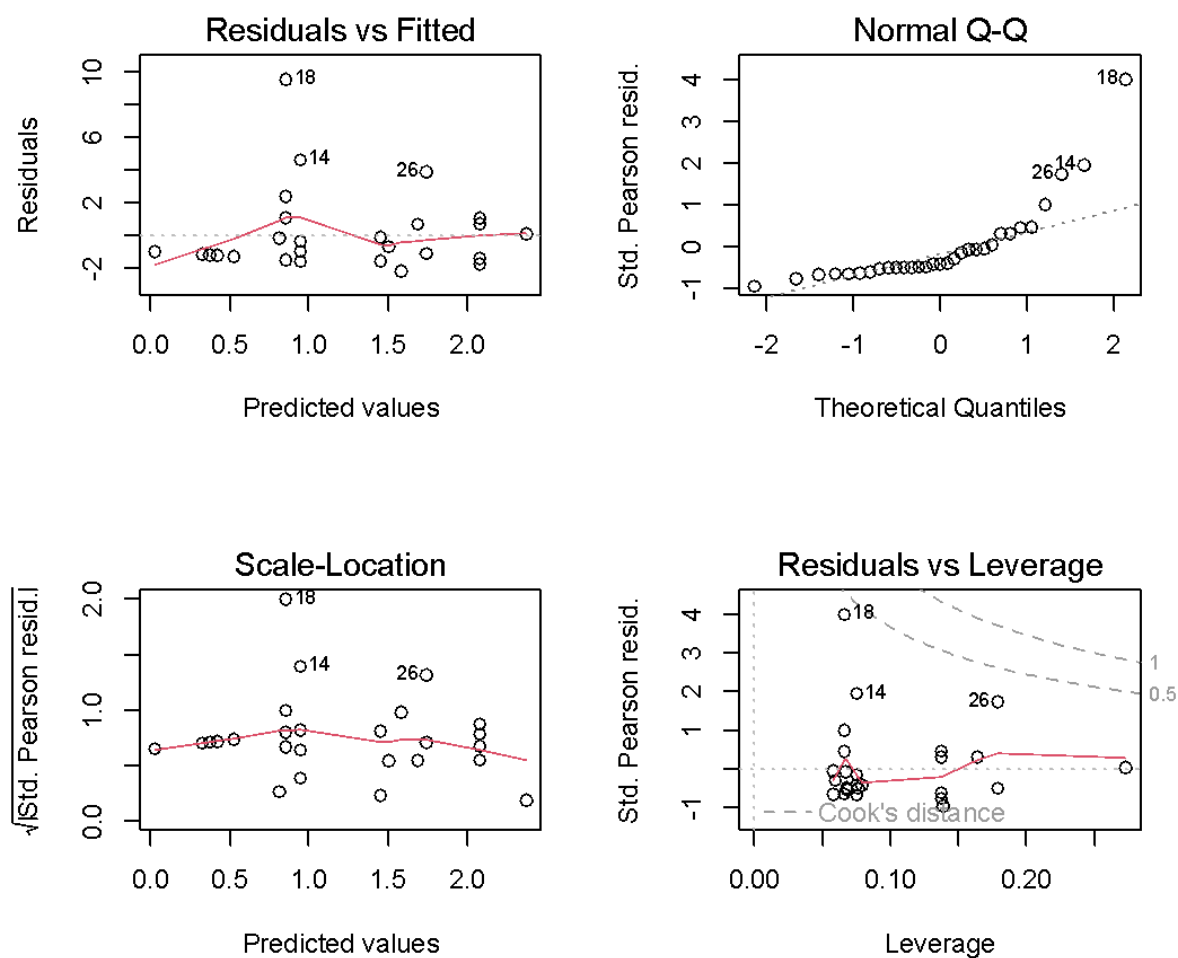


Figura S3. Diagnóstico do modelo para o modelo linear generalizado (família quase-Poisson, ligação logarítmica) que prevê a disponibilidade de cavidades a partir da idade da floresta secundária e do histórico de uso da terra (todos os efeitos principais).

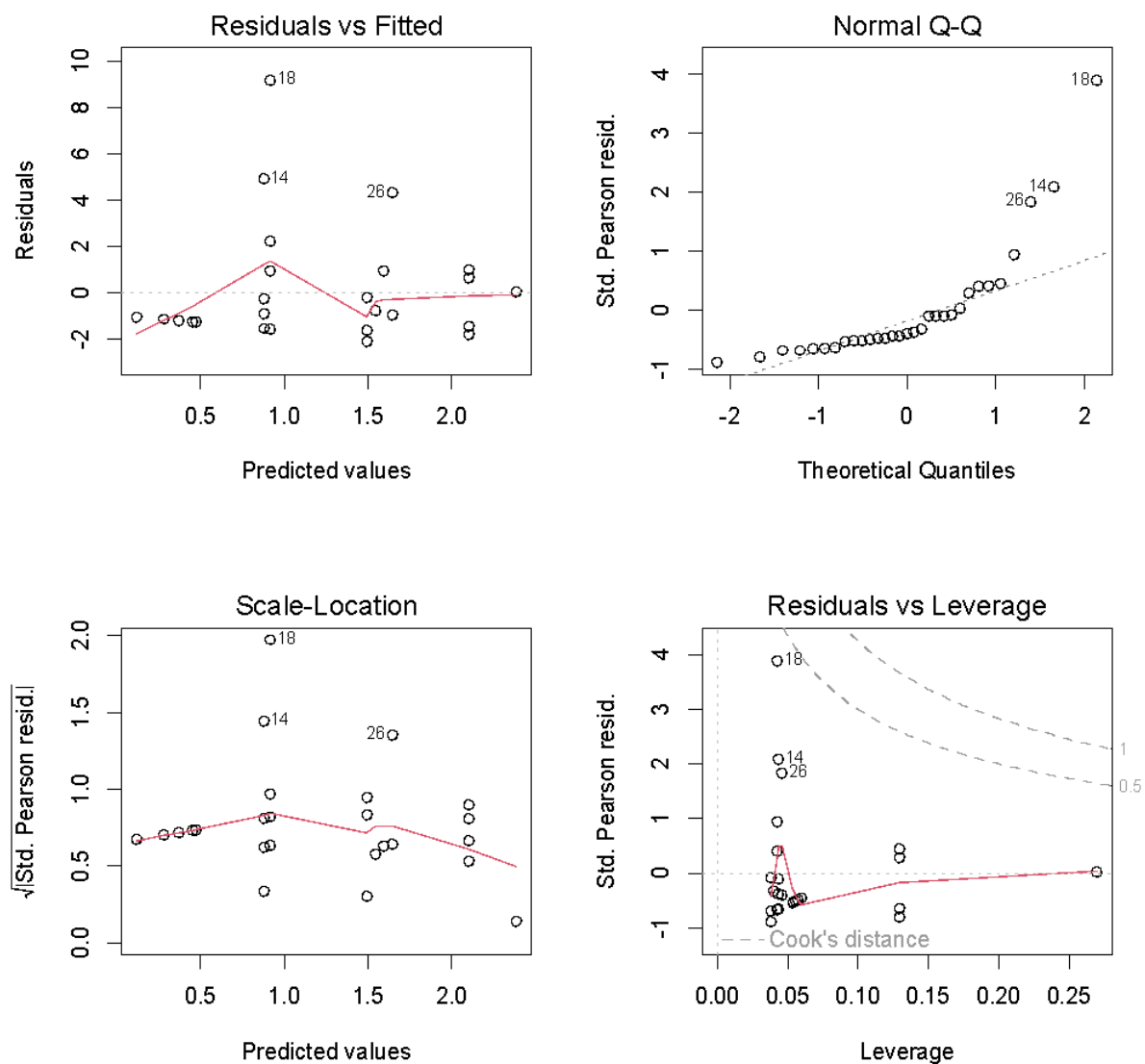


Figura S4. Diagnóstico do modelo para o modelo linear generalizado (família quase-Poisson, ligação logarítmica) que prevê a disponibilidade de cavidades somente com base na idade da floresta secundária.

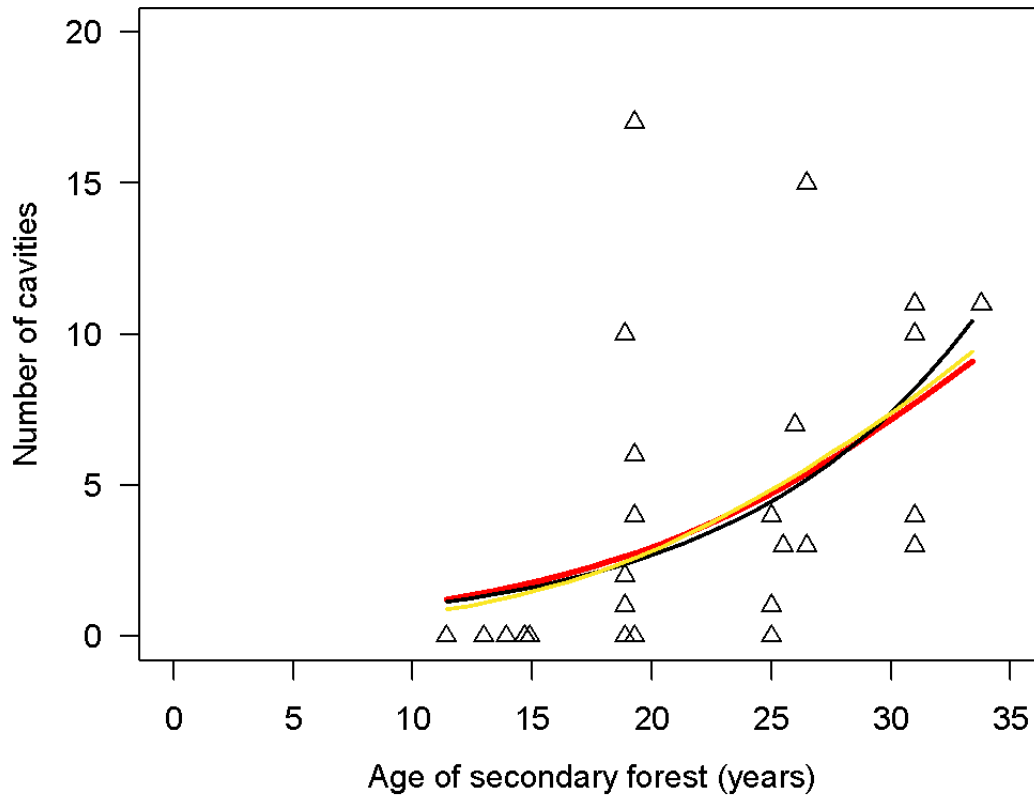


Figura S5. Relações entre a idade da floresta e o suprimento de cavidades em parcelas florestais de 0,8 ha na Amazônia central (31 parcelas em floresta secundária, 8 parcelas em floresta antiga). (A) Número de cavidades vs. idade da floresta, em floresta secundária (triângulos). Os dados brutos são os mesmos do manuscrito Figura 1A. As linhas sólidas indicam previsões de modelos lineares e não lineares que previram cavidades como uma função da idade da floresta. A linha vermelha indica as previsões de uma curva de crescimento logístico implementada no pacote nls usando o comando nls (assíntota = 21,7, ponto de inflexão quando $x = 36,3$). As linhas restantes são valores previstos de modelos quase Poisson implementados no mgcv usando o comando gam. Para a linha preta, especificamos a idade da floresta para ter apenas um efeito linear (paramétrico) (sem suavização). O modelo gcv foi de 4,67, o desvio explicado foi de 27,3% e o parâmetro de idade da floresta teve $p = 0,012$. Para a linha amarela (modelo aditivo generalizado), especificamos um parâmetro de suavização não linear com $k = 3$ para a idade da floresta. O modelo gcv foi de 4,65, o desvio explicado foi de 29,3%, e o parâmetro de idade da floresta teve graus de liberdade efetivos = 1,33 e p estimado = 0,028. O modelo aditivo generalizado (amarelo) não foi uma melhoria significativa em relação ao modelo sem um parâmetro de suavização (preto; Análise de desvio: $\chi^2 = -3,4$, $p = 0,265$).

Código

#Modelos lineares generalizados (família quase-Poisson)

```
qp.IxF<-glm(Cavidades ~ Idade*Fogo, data=Ocos, family="quasipoisson")
summary(qp.IxF)
plot(qp.IxF)
```

```
qp.IF<-glm(Cavidades ~ Idade + Fogo, data=Ocos, family="quasipoisson")
summary(qp.IF)
plot(qp.IF)
```

```
qp.I<-glm(Cavidades ~ Idade, data=Ocos, family="quasipoisson")
summary(qp.I)
plot(qp.I)
```

```
qp.n<-glm(Cavidades ~ 1, data = Ocos, family = "quasipoisson")
summary(qp.n)
```

```
anova(qp.IF, qp.IxF, test="Chisq")
anova(qp.I, qp.IF, test="Chisq")
anova(qp.n, qp.I, test="Chisq")
```

#Modelos que incluem não linearidades

```
#Curva de crescimento logístico
nls.I<-nls(Cavidades ~ SSlogis(Idade, Asym, xmid, scal), Ocos)
summary(nls.I)
```

```
#GAMs
library(mgcv)
```

```
gam.I.3<-gam(Cavidades ~ s(Idade, k = 3), family = quasipoisson, data=Ocos)
summary(gam.I.3)
plot(gam.I.3)
```

```
gam.I.2<-gam(Cavidades ~ s(Idade, k = 2), family = quasipoisson, data=Ocos)
summary(gam.I.2)
plot(gam.I.2)
```

```
gam.I.1<-gam(Cavidades ~ s(Idade, k = 1), family = quasipoisson, data = Ocos)
summary(gam.I.1)
plot(gam.I.1)
```

```
gam.I.0<-gam(Cavidades ~ Idade, family = quasipoisson, data = Ocos)
summary(gam.I.0)
plot(gam.I.0)
```

```
anova(gam.I.3, gam.I.0, test="Chisq")  
anova(gam.I.2, gam.I.0, test="Chisq")  
anova(gam.I.1, gam.I.0, test="Chisq")
```