



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE – PPGBio

LEONARDO BARBOSA DA SILVA

**FRAGILIDADES NAS INTERAÇÕES ENTRE AVES E PLANTAS EM ÁREAS
PRIORITÁRIAS PARA A CONSERVAÇÃO**

RECIFE

2023

LEONARDO BARBODA DA SILVA

**FRAGILIDADES NAS INTERAÇÕES ENTRE AVES E PLANTAS EM ÁREAS
PRIORITÁRIAS PARA A CONSERVAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Biodiversidade da Universidade Federal Rural de
Pernambuco como requisito para a obtenção do título de
Doutor em Biodiversidade.

Orientador:

Prof. Dr. Natan Messias de Almeida

Universidade Estadual de Alagoas, Palmeira dos Índios – AL

Coorientadores:

Prof^a. Dr^a. Cibele Cardoso de Castro

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Garanhuns – PE

Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza

Universidade Estadual do Ceará, Iguatu - CE

RECIFE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586f da Silva, Leonardo Barbosa
FRAGILIDADES NAS INTERAÇÕES ENTRE AVES E PLANTAS EM ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA A
CONSERVAÇÃO / Leonardo Barbosa da Silva. - 2023.
109 f. : il.

Orientador: Natan Messias de Almeida.
Coorientador: Cibele Cardoso de Castro - Jefferson Thiago Souza.
Inclui referências e anexo(s).

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade,
Recife, 2023.

1. Cerrado. 2. Dispersão de sementes. 3. Ecologia de aves. 4. Mata Atlântica. 5. Redes ecológicas. I. Almeida, Natan
Messias de, orient. II. Souza, Cibele Cardoso de Castro - Jefferson Thiago, coorient. III. Título

CDD 333.95

DEDICATÓRIA

À minha família, aos meus amigos e à Ornitologia brasileira

EPÍGRAFE

“O que escapa aos olhos é uma forma muito mais danosa de extinção: a extinção das interações ecológicas.”

Daniel Janzen

AGRADECIMENTOS

Ao término de mais um ciclo de aprendizado, expresso aqui os meus sinceros agradecimentos.

Aos meus pais, por toda a dedicação.

À minha companheira Jacilene Silva pelo carinho, paciência e cumplicidade.

Ao Prof. Dr. Natan Messias de Almeida pela orientação, confiança, amizade, discussões científicas e pelo amadurecimento e apoio em todas as etapas da tese.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE e ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade pelo apoio institucional e suporte logístico. Agradeço à secretária Cynara Leleu pela simplicidade e presteza no atendimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro na forma de bolsa de estudo.

À Nordeste Reflorestamento e Educação pelo apoio logístico em parte da coleta de dados.

À dona Cida e ao Sr. Messias pelo acolhimento na Fazenda Sítio Verde, um lugar belíssimo na Serra do Kayapó - GO. Obrigado pela amizade, ensinamentos, ajuda em parte da coleta de dados e pelas conversas divertidas.

Aos amigos e parceiros científicos Paulo Barros e Glauco pereira, os quais tenho prazer de contar como coautores em um dos capítulos desta tese.

Aos amigos do grupo de pesquisa Fragilidade Ecológica em Angiospermas (FEA) pela oportunidade de aprendizado e crescimento pessoal e profissional, particularmente aos colegas José Ronaldo, Wellington Carlos, Joice Soares e Charlane Moura por todo o apoio logístico e ajuda em parte da coleta de dados.

A todos os colegas de turma e professores do PPGbio.

Aos meus “amigos do bairro” que nos mais variados momentos me deram apoio e me propiciaram momentos de alegria importantíssimos para a retomada de folego.

Aos membros da banca avaliadora, Dr^a. Rachel Maria de Lyra Neves, Dr^a. Carolina Nunes Liberal, Dr. Túlio Dornas de Oliveira e ao Dr. Gudryan Jackson Barônio, por terem aceitado o convite para contribuir com este trabalho. Agradeço de antemão as valiosas contribuições.

SUMÁRIO

1 – APRESENTAÇÃO	6
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 – A ECOLOGIA REPRODUTIVA DAS ANGIOSPERMAS	10
2.2 – DISPERSÃO DE SEMENTES POR AVES	11
2.3 – FRAGILIDADES NAS INTERAÇÕES AVES-DIÁSPOROS	13
2.4 – DISPERSÃO POR AVES EM ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA A CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE NO BRASIL	14
2.5 – CONHECER PARA CONSERVAR	16
3 – CAPÍTULO I. SEED DISPERSAL BY BIRDS IN CERRADO: EFFECTS OF FRAGMENTATION ON THE ORGANIZATION OF INTERACTION NETWORKS	24
4 – CAPÍTULO II. DISPERSÃO SOB MEDIDA: INTERAÇÕES AVES-DIÁSPOROS EM UM FRAGMENTO DE MATA ATLÂNTICO NO NORDESTE DO BRASIL	54
5 – CAPÍTULO III. WHEN HUNGER IS GREATER THAN THE BEAK: GUIRA TANAGER (AVES, THRAUPIDAE) STRATEGY TO OPTIMIZE FRUGIVORY	83
6 – CAPÍTULO IV. AS AVES QUE SEMEIAM AS FLORESTAS	91
7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
8 – ANEXOS	103

RESUMO

A dispersão de sementes é um processo fundamental para o ciclo de vida das plantas. As angiospermas desenvolveram diferentes estratégias para garantir o deslocamento dos seus diásporos. Nas florestas tropicais, a dispersão é realizada principalmente através de interações com diferentes grupos de animais. As aves representam um dos mais importantes. Entretanto, o cenário atual (Antropoceno) é caracterizado por um intenso desmatamento e defaunação, e as interações ecológicas estão entre as mais frágeis. Um grande esforço vem sendo empreendido para compreender os aspectos relacionados a perda destas interações. Dentro deste contexto, o objetivo geral da tese foi investigar os fatores que colocam em risco os processos de dispersão de sementes por aves em duas áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade (*hotspots*). Inicialmente, avaliamos a influência da fragmentação ambiental, através do acompanhamento das interações em dois estados de conservação do Cerrado (*stricto sensu*): uma área fragmentada e uma área contínua (conservada). Em seguida, avaliamos como a relação morfológica entre a capacidade de ingestão (largura de bico) das aves dispersoras e o tamanho dos diásporos ornitocóricos (frutos e sementes com atributos atrativos às aves) pode direcionar os processos de dispersão em um fragmento de Mata Atlântica. Interpretamos esses resultados à luz das métricas utilizadas na construção de redes de interações e através de observações empíricas das interações. Verificamos que no Cerrado, a fragmentação ambiental influencia negativamente na diversidade da guilda de aves dispersoras e nas comunidades vegetais, além de provocar a homogeneização funcional, direcionando a predominância de interações entre aves generalistas e plantas com diásporos pequenos (≤ 10 mm). Nossos resultados também demonstram que em fragmentos florestais a correlação entre o tamanho dos diásporos e a largura de bico das aves atua como um filtro no processo de dispersão. Observamos que a resiliência dispersiva é menor nas interações envolvendo diásporos maiores (≥ 15 mm). Também trazemos um interessante estudo de caso, onde a incompatibilidade morfológica entre a largura do bico de *Hemithraupis guira* (Thraupidae) e o tamanho das sementes de *Cupania oblongifolia* (Sapindaceae), parece atuar como uma pressão (a nível individual), favorecendo o desenvolvimento de traços comportamentais para otimizar o forrageamento. Por fim, trazemos um artigo de divulgação científica, onde apresentamos em uma linguagem acessível ao público em geral o tema da tese e parte dos resultados encontrados nos capítulos anteriores. Em geral, nossos resultados demonstram que os

impactos antrópicos afetam a estrutura e a organização das redes de interações aves-diásporos. A dependência mútua das espécies envolvidas se torna um grande desafio para a conservação das interações.

Palavras-chave: Cerrado, Dispersão de sementes, Ecologia de aves, Frugivoria, Mata Atlântica, Redes ecológicas

Silva, Leonardo Barbosa da (PhD Biodiversidade) Federal Rural University of Pernambuco. August 2023. **FRAGILITIES IN BIRD-PLANT INTERACTIONS IN PRIORITY AREAS FOR CONSERVATION**. Natan Messias de Almeida (Advisor); Cibele Cardoso de Castro and Jefferson Thiago Souza (Co-Advisors).

ABSTRACT

Seed dispersal is a fundamental process in the life cycle of plants. Flowering plants have developed different strategies to ensure the displacement of their diaspores. In tropical forests, dispersal is mainly accomplished through interactions with different groups of animals. Birds represent one of the most important of these groups. However, the Anthropocene is characterized by intense deforestation, defaunation, and particularly fragile ecological interactions. Significant effort has been devoted to trying to understand the aspects related to the loss of these interactions. Within this context, the general objective of this thesis was to investigate the factors that jeopardize the processes of seed dispersal by birds in two hotspots for biodiversity conservation. First, we analyzed the influence of environmental fragmentation by monitoring the interactions in two areas of Cerrado *stricto sensu* with different conservation states: a fragmented area and a continuous (conserved) area. We then evaluated how the morphological correspondence between the ingestion capacity (beak width) of dispersing birds and the size of ornithochoric diaspores (fruits and seeds with attributes attractive to birds) can influence dispersal processes in a fragment of Atlantic Forest. We interpret these results in light of the metrics used in the construction of interaction networks and through empirical observations of interactions. We found that, in Cerrado, environmental fragmentation had a negative influence on the diversity of the dispersing bird guild and plant communities, in addition to causing functional homogenization, favoring the predominance of interactions between generalist birds and plants with small diaspores (≤ 10 mm). Further, our results in forest fragments demonstrate that the relationship between diaspore size and bird beak width acts as a filter in the dispersal process. We observed that dispersive resilience is lower in interactions involving larger diaspores (≥ 15 mm). We also bring an interesting case study in which the morphological incompatibility between the width of the beak of *Hemithraupis guira* (Thraupidae) and the size of the seeds of *Cupania oblongifolia* (Sapindaceae) seems to act as a pressure (at the individual level) favoring the development of behavioral traits to optimize foraging. Finally, we bring an article of

scientific dissemination in which we present, in a language accessible to the general public, the theme of the thesis and part of the results found in the previous chapters. In short, our results demonstrate that anthropic impacts affect the structure and organization of bird-diaspore interaction networks. The mutual dependence of the species involved represents a major challenge for the conservation of interactions.

Keywords: Atlantic Forest, Bird ecology, Cerrado, Ecological networks, Frugivory

Seed dispersal

APRESENTAÇÃO

A dispersão de sementes é um processo fundamental para o ciclo de vida das plantas e está diretamente relacionada com a estrutura e com o funcionamento dos ecossistemas (FLEMING; KRESS, 2013). Nas florestas tropicais, a dispersão é realizada principalmente por animais que se alimentam de frutos (zoocoria). Assim, diferentes grupos de angiospermas estabeleceram relações mutualísticas com diferentes grupos de animais, entre eles, insetos, mamíferos, peixes, répteis e aves (LEVEY; SILVA; GALETTI, 2002; FLEMING; KRESS, 2013). A efetividade dessas interações depende da ação de diferentes fatores, como o comportamento alimentar, a frequência de visitação, a quantidade de frutos consumidos e a capacidade de mobilidade dos animais (SILVA; TABARELLI, 2000; JORDANO, 2014), bem como, das características dos diásporos (frutos e sementes) (MARUYAMA et al., 2019; PIZO et al., 2021).

Objetivos e questionamentos

Na região Neotropical, a dispersão de sementes por animais tem sido amplamente estudada, e o conhecimento gerado recebeu uma grande contribuição dos estudos à luz das interações aves-diásporos (e.g. SNOW, 1981; LEVEY, 1988; QUINTERO; PIZO; JORDANO, 2020; PARRINI, 2015; JORDAO, 2020; SILVA et al., 2021a; PIZO et al., 2021; 2022). Entretanto, em todo o planeta as interações dispersivas estão extremamente ameaçadas pelo rápido declínio dos animais frugívoros e pela destruição e fragmentação das florestas (DIRZO et al., 2014; YOUNG et al., 2016; PIRES; GALETTI, 2023). Nesse cenário, talvez algumas das perguntas mais importantes que precisam ser respondidas sobre o processo de dispersão são: como as interações planta-dispersor são afetadas? e quais as consequências da quebra destas interações na estrutura e no funcionamento dos ecossistemas?

Dessa forma, o objetivo da presente tese foi avaliar os fatores que ameaçam as interações ecológicas envolvidas na dispersão de sementes por aves em áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade (Cerrado e Mata Atlântica). Para atingir esse objetivo, utilizamos duas abordagens: Inicialmente, avaliamos a influência da fragmentação ambiental nas interações aves-diásporos. Em uma segunda abordagem, avaliamos como a relação morfológica entre a capacidade de ingestão das aves dispersoras (largura de bico) e o tamanho dos diásporos pode direcionar o processo de dispersão de sementes.

Estratégias de pesquisa

No primeiro produto da tese desenvolvemos um trabalho em duas áreas de Cerrado na região centro oeste. Diante da amplitude do estudo, utilizamos um conjunto de métodos de coleta (identificação e acompanhamento fenológico das espécies vegetais, identificação das espécies de aves e o acompanhamento das interações aves-diásporos). As maiores dificuldades para a realização desse tipo de pesquisa foram a necessidade de um grande esforço amostral e a aplicação dos métodos de maneira concomitante. Para garantir a coleta e a qualidade dos nossos dados, tivemos a contribuição de ornitólogos especializados em taxonomia e comportamento alimentar. Optamos pela utilização do método de captura de aves (redes de neblina) associado às observações visuais e ao registro auditivo (vocalização). Essa estratégia viabilizou a realização da pesquisa com uma quantidade menor de vieses. Além de ampliar as possibilidades de identificação da guilda de aves dispersoras, a captura possibilitou o registro de novas interações dispersivas, por meio da identificação de sementes nas fezes e/ou regurgitadas.

No segundo produto desenvolvemos um trabalho na Mata Atlântica nordestina. O conjunto de métodos utilizados contemplou a identificação das espécies de aves dispersoras em campo e o acompanhamento das interações. Também nos baseamos em um levantamento ornitológico realizado anteriormente na área de estudo (dados secundários). Um dos maiores desafios para a realização do trabalho foi a coleta dos dados correspondentes a capacidade de ingestão das aves (largura de bico). Realizamos a coleta em coleções ornitológicas e consultamos um banco de dados construído nos últimos anos, através da captura de aves em levantamentos ornitológicos realizados na região nordeste. Essa estratégia possibilitou a coleta de informações para todas as espécies que compuseram a guilda de aves dispersoras. Um outro ponto importante para o desenvolvimento da tese foi o acompanhamento das interações dando atenção ao comportamento alimentar das aves. Essa perspectiva foi fundamental para o desenvolvimento do terceiro capítulo, onde realizamos um registro muito interessante sobre o comportamento alimentar de uma espécie da família Thraupidae.

Estrutura da tese

Iniciamos esta tese com uma fundamentação teórica, onde trazemos algumas informações sobre o processo de dispersão de sementes por aves. Assim, são relatados aspectos ecológicos das interações que perpassam desde características associadas a morfologia e ao comportamento alimentar das aves, bem como as relações morfológicas

entre os diásporos e a capacidade de ingestão destes animais. Além de um breve apanhado sobre o conhecimento atual desse processo de dispersão, também apontamos alguns fatores que ameaçam a sua manutenção e novas perspectivas de conhecimento.

A seguir são apresentados quatro manuscritos, dois deles na forma de artigos completos, um sob a forma de nota científica (publicado) e um na forma de artigo de divulgação científica (aceito). Cada um dos trabalhos utiliza abordagens diferentes para analisar questões relacionadas as pressões antrópicas exercidas nas interações mutualísticas entre aves e diásporos em áreas prioritárias para a conservação da natureza (*hotspots*) (Cerrado e Mata Atlântica).

O primeiro manuscrito aborda as relações aves-diásporos em dois estados de conservação do Cerrado na região centro oeste do Brasil: uma área fragmentada e uma área contínua (conservada). O Cerrado é a savana tropical que possui a maior biodiversidade do planeta, entretanto, o avanço do desmatamento e da defaunação colocam em risco a manutenção das interações ecológicas. A partir de então, buscamos entender como a fragmentação ambiental pode afetar a nível de comunidade a disponibilidade de diásporos atrativos às aves, as guildas de aves dispersoras (espécies onívoras e frugívoras) e principalmente a organização das redes de interações aves-diásporos.

Esse estudo foi realizado através de oito expedições, com duração de 14 dias cada. Nos deparamos com uma grande dificuldade de deslocamento entre as áreas de estudo, devido principalmente a natureza sinuosa e aos obstáculos naturais (e.g. riachos, pedras e árvores caídas) encontrados na estrada de acesso a área conservada. Quatro dias de cada expedição foram destinados para os deslocamentos entre as áreas, e dez dias para a realização da coleta de dados. Ainda em campo, observamos que a área conservada apresentava uma guilda maior e mais diversificada de aves dispersoras, e aparentemente uma maior rede de interações ave-diásporos. A análise dos dados nos mostrou um panorama de redundância funcional das interações ave-diásporos na área fragmentada.

No segundo capítulo, abordamos o papel das aves na dispersão de sementes de espécies lenhosas em um fragmento de Mata Atlântica no Centro de Endemismo Pernambuco, uma região que possui uma grande quantidade táxons endêmicos e ameaçados de extinção (aves e plantas). Aqui, procuramos entender como a relação entre o tamanho dos diásporos e a capacidade de ingestão das aves (largura de bico) pode direcionar o processo de dispersão de sementes.

Realizamos 10 expedições a Reserva Biológica de Pedra Talhada, no município de Quebrangulo, Alagoas. Cada expedição teve duração de seis dias. Aqui, também nos deparamos com dificuldades para acessar e permanecer na unidade de conservação. Para minimizar esse problema, estabelecemos uma base de apoio em uma casa localizada no centro do município, distante cerca de 19 km da Rebio, onde ficamos hospedados. Isso possibilitou nossas idas e vindas diárias. Além do mais, na base de apoio foi possível coletar os dados morfométricos dos diásporos, analisar as espécies vegetais coletadas, planilhar e analisar parte dos dados. Já para a coleta das medidas de bico das aves (largura), a pandemia de covid-19 foi o grande obstáculo para o acesso as coleções ornitológicas, o que acabou atrasando a coleta dessas informações. Ao término do estudo, encontramos uma forte relação entre a capacidade de ingestão das aves e o tamanho dos diásporos. As plantas que produzem diásporos maiores dependem diretamente das aves maiores para dispersarem suas sementes.

Seguindo com as abordagens envolvendo a correlação morfológica entre os diásporos e a largura de bico das aves, apresentamos um estudo de caso, onde observamos que a incompatibilidade morfológica entre a largura do bico de *Hemithraupis guira* (Thraupidae) e o tamanho dos diásporos de *Cupania oblongifolia* (Sapindaceae), pode ter induzido essa espécie de ave (a nível individual) a utilizar cavidades presentes nos galhos como suporte para a “manipulação” dos diásporos, e assim otimizar o forrageamento. Esses comportamentos são raros e a obtenção de dados observacionais na natureza ainda é um grande desafio.

Antes de iniciarmos as sessões de observação focal das interações aves-diásporos, sempre dedicamos um tempo (cerca de 30 min) para nos ambientarmos e observamos o que possivelmente pode estar acontecendo ao nosso redor (interações ecológicas). Em um desses momentos registramos esse comportamento das aves e decidimos realizar o estudo. O resultado foi a descrição de um comportamento alimentar pouco conhecido na região Neotropical (talvez a primeira descrição).

O quarto capítulo surge diante da necessidade de divulgar os resultados científicos em meio a sociedade. Sendo assim, parte das informações presentes nesta tese são apresentadas em uma linguagem acessível ao cidadão comum, em especial ao público infanto-juvenil. Acreditamos que esse tipo de iniciativa contribui para a valorização da ciência.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A ecologia reprodutiva das angiospermas

Ao longo da história evolutiva, as angiospermas desenvolveram diversas estratégias para garantir a polinização e a dispersão de sementes. As mais evidentes são as adaptações morfológicas e fisiológicas presentes nas flores e nos diásporos (frutos e sementes), que convergem para a realização desses processos de forma autônoma, mediados por fatores abióticos (água e vento) ou ainda, através de interações mutualísticas (VAN DER PIJL, 1982; ENDRESS, 1994; FLEMING; KRESS, 2013). A polinização é a primeira etapa da reprodução sexuada, sendo definida como o transporte e a deposição de grãos de pólen das anteras para um estigma, ocorrendo na mesma flor, em flores distintas de um mesmo indivíduo ou entre indivíduos coespecíficos (ENDRESS, 1994). Além da polinização, o ciclo de vida das angiospermas depende da etapa subsequente, a dispersão das sementes formadas (SCHUPP; JORDANO; GÓMEZ, 2010; FLEMING; KRESS, 2013).

Tal processo é definido como o deslocamento e a distribuição dos diásporos a partir da planta de origem (HOWE; SMALLWOOD, 1982). Entender os fatores envolvidos na dispersão é fundamental para a compreensão da dinâmica populacional das plantas e para a ecologia de comunidades (HOWE; SMALLWOOD, 1982; FLEMING; KRESS, 2013). A dispersão é um dos processos ecológicos mais importantes para a manutenção, recuperação natural e resiliência das florestas (JORDANO et al., 2006). Uma grande diversidade de agentes dispersores (bióticos e abióticos) contribuem para o sucesso da dispersão (FLEMING; KRESS, 2013). Nas florestas tropicais, a zoocoria (dispersão de sementes por animais) é o tipo de dispersão predominante, e os casos mais comuns envolvem a ingestão dos frutos e a passagem das sementes pelo sistema digestório (endozoocoria) (JANZEN, 1970; JORDANO et al., 2006).

Durante milhões de anos, diversos atributos funcionais e comportamentais foram selecionados para possibilitar interações cada vez mais eficientes entre as plantas e os animais frugívoros (que se alimentam com frequência de frutos) (FLEMING; KRESS, 2011, 2013). Os frutos se tornaram fontes de recursos indispensáveis na dieta dos animais (e.g. água, açúcares, fibras, lipídios, proteínas e sais). Em troca, eles realizam a dispersão das sementes ingeridas (JANZEN, 1970; FLEMING; KRESS, 2013; JORDANO, 2017).

Nas florestas tropicais, essas interações são tão relevantes, que o percentual de espécies lenhosas dispersas por animais pode atingir 90% (HOWE; SMALLWWOD, 1982).

Algumas hipóteses foram propostas para tentar explicar a predominância dessas interações e as suas vantagens para as populações vegetais. Entre elas, a hipótese de escape, que destaca o aumento no recrutamento da progênie à medida que as sementes se distanciam da planta de origem, onde a ação de predadores, patógenos e a competição intraespecífica por luminosidade, espaço e nutrientes são maiores; a hipótese de colonização, que indica um aumento na probabilidade de colonizar novos habitats; e a hipótese de dispersão direcionada, que proporciona a chegada de sementes em locais favoráveis a germinação e ao desenvolvimento das plantas (JANZEN, 1970; HOWE; SMALLWWOD, 1982). Além do mais, a endozoocoria permite que as sementes sofram escarificações físicas e /ou químicas, facilitando a hidratação, a troca gasosa e a reativação dos seus processos metabólicos (JORDANO et al., 2006; LORENZE et al., 2010). Toda essa dinâmica envolvida na dispersão de sementes por animais, também exerce uma forte influência na estrutura genética das populações vegetais (JORDANO et al., 2006; FLEMING; KRESS, 2013).

O sucesso da endozoocoria é influenciado por diversos fatores, como o comportamento alimentar, a abundância populacional e a capacidade de deslocamento dos animais (JORDANO; SCHUPP, 2000; PIZO; SANTOS, 2011). Sendo assim, apesar de grupos, como morcegos (e.g. FLOREZ-MONTERO et al., 2022), primatas (e.g. BUFALO; GALETTI; CULOT, 2016), grandes mamíferos terrestres (e.g. O’FARRILL; GALETTI; CAMPOS-ARCEIZ, 2013) e peixes (CORREA et al., 2015) serem importantes nos diferentes contextos ecológicos, as aves representam um grupo proeminente, principalmente pela sua diversidade de espécies frugívoras e pela grande capacidade de deslocamento (maior amplitude de dispersão) (SICK, 1997; PARRINI, 2015; QUINTERO et al., 2020; COMPAGNOLI; CHRISTIANINI, 2022). A dispersão de sementes por aves (ornitocoria) faz parte da estratégia dispersiva de boa parte das angiospermas lenhosas distribuídas nos diferentes tipos de florestas tropicais (KUHLMANN; RIBEIRO, 2016a; MARUYAMA et al., 2019; QUINTERO et al., 2020; SILVA; TABARELLI, 2000; SILVA et al., 2021a; CARVALHO et al., 2023).

Dispersão de sementes por aves

As aves compreendem um dos maiores grupos de vertebrados terrestres. No Brasil encontramos uma das mais ricas e diversificadas avifaunas do planeta (1971 espécies registradas), com uma elevada taxa de endemismo (cerca de 300 espécies). Estas aves estão distribuídas em 33 ordens e 102 famílias (ver PACHECO et al., 2021). Boa parte das espécies habitam ambientes florestais e incluem, em maior ou menor grau, frutos na dieta (SICK, 1997; PARRINI, 2015; PIZO et al., 2021). Para estabelecer relações mais estreitas, as plantas produzem diásporos com características atrativas às aves (e.g. cores, tamanho, formato e composição nutricional) (MOERMOND; DENSLOW, 1983; MARUYAMA et al., 2019; PIZO et al., 2021). As guildas de aves dispersoras podem ser compostas por espécies bem distintas, quando nos referimos ao tamanho corporal, a largura do bico (capacidade de ingestão) e ao comportamento alimentar (e.g. espécies que “mastigam” e espécies que engolem os diásporos inteiros). (PARRINI, 2015). A amplitude dos atributos vegetais (diásporos) com as paridades dos diferentes grupos de aves é responsável pela diversidade funcional presente nas redes de interações, e pode prever potencialmente como as aves exercem influência na estrutura das comunidades vegetais (CARVALHO; MALHI; MENOR, 2023; PIZO et al., 2021; 2022; SILVA et al., 2021a).

A dispersão de diásporos grandes geralmente é realizada pelas aves frugívoras de médio e grande porte. Os tucanos e araçarís (Ramphastidae), arapongas e cotingas (Cotingidae), aracuãs, jacus e mutuns (Cracidae) e trogons (Trogonidae) são capazes de ingerir frutos e sementes grandes (≥ 15 mm) (e.g. Arecaceae, Combretaceae, Lauraceae e Sapotaceae) (SILVA; TABARELLI, 2000). Essas aves formam grupos (módulos) exclusivos com essas plantas nas redes de interações. Já as espécies menores (e.g. Pipridae, Tyrannidae, Fringillidae e Thraupidae) são importantes para a manutenção das redes de interações em comunidades de sub-bosque, onde muitas plantas produzem diásporos pequenos (≤ 10 mm) (e.g. Melastomataceae, Rubiaceae, Urticaceae) com (ver PARRINI, 2015; SILVA; LEITE; CASTRO, 2013; SILVA et al., 2021a).

A diversidade funcional das redes de interações também está relacionada ao comportamento alimentar das aves. Espécies que “mastigam” os frutos (e.g. Fringillidae e Thraupidae) geralmente descartam as sementes e consomem a polpa, fato que diminui as chances de estabelecimento de novos indivíduos. (PARRINI, 2015). Por outro lado, estudos recentes vêm chamando a atenção para o papel de grupos incomuns na dispersão,

como os psitacídeos (araras, papagaios e periquitos). Estas aves são tradicionalmente conhecidas como grandes predadoras de sementes (SICK, 1997; TRIVEDI; CORNEJO; WATKINSON 2004; HAUGAASEN, 2008), entretanto, elas podem promover a dispersão, através do transporte dos diásporos no bico para em seguida se alimentar da polpa (estomatocoria) (ver BRAVO et al., 2020; TELLA et al., 2020; SILVA et al., 2021b; SILVA, 2022a). Outro tipo de interação que ganha relevância a partir de observações naturalísticas é a dispersão realizada por aves de rapina. Um grupo bem adaptado a predação de animais e que também não é visto com potencial para a dispersão, no entanto, seus representantes podem realizar a dispersão de sementes através do consumo direto dos frutos (geralmente frutos ricos em lipídeos) (GALETTI; GUIMARÃES, 2004; PAULA; SOUZA; SANTOS, 2021; SILVA, 2022b), ou através de uma interação conhecida como diploendozoocoria, que possibilita a dispersão de sementes que tenham sido ingeridas por suas presas. (PÉREZ-MÉNDES; RODRÍGUEZ, 2018; GODÓ et al., 2023; SILVA, 2023).

À medida que os estudos nos revelam o quão complexas podem ser as interações ecológicas entre as aves e os diásporos, as atividades antrópicas vêm modificando a distribuição e a abundância das espécies. Os ecossistemas estão sendo reconfigurados pela fragmentação, destruição de habitat, caça seletiva, extração de madeira, introdução de espécies exóticas e conflitos com animais silvestres (DIRZO et al., 2014; YOUNG et al., 2016; PIRES; GALETTI, 2023).

Fragilidades nas interações aves-diásporos

As ações antrópicas alteram profundamente a dinâmica das interações animal-planta. A perda de habitats naturais, por exemplo, não apenas gera a diminuição da biodiversidade, mas também interrompe as suas funções ecológicas (DIRZO et al., 2014; YOUNG et al., 2016; PIRES; GALETTI, 2023). Um dos maiores desafios atuais é justamente prever quais serão as consequências da quebra destas interações na estrutura das comunidades.

Um grande esforço vem sendo empreendido para compreender os diferentes aspectos relacionados a quebra de interações entre aves e frutos. Silva e Tabarelli (2000), por exemplo, abordaram uma interessante questão, a relação morfológica entre o tamanho dos diásporos e a capacidade de ingestão (largura de bico) das aves dispersoras. De acordo com os seus resultados, a ausência de aves capazes de ingerir diásporos com mais de 15

mm pode levar a extinção de cerca de 30% das espécies lenhosas ornitocóricas na Mata Atlântica nordestina. A ausência de aves maiores também pode provocar rápidas mudanças evolutivas. Galetti et al. (2013) demonstraram através da aferição das sementes de *Euterpe edulis* Mart. uma diminuição no tamanho destes diásporos, em cerca de 100 anos. Comparando populações desta palmeira distribuídas em áreas de Mata Atlântica com diferentes níveis de pressão de caça sobre as aves, os autores concluíram que a extinção local das maiores aves frugívoras (tucanos e cotingas) foi um fator determinante para o direcionamento de novas interações entre as aves menores e os indivíduos vegetais com sementes significativamente menores (GALETTI et al., 2013).

A extinção funcional pode ocorrer antes mesmo da extinção das espécies. Atualmente, a fragmentação das florestas representa uma grande barreira para o deslocamento dos animais e para o transporte de sementes (PIZO; TONETTI, 2020). Por outro lado, a expansão urbana pode provocar mudanças no comportamento e na dieta das aves frugívoras. Vasconcellos-Neto et al. (2015) compararam populações de *Penelope obscura* Temmink, 1815 (Cracidae) que ocorriam em área com disponibilidade de alimentos de origem antrópica e em área preservada. Os resultados mostraram que na área sob influência humana, houve uma redução no deslocamento das aves e uma diminuição de até 80% no consumo de frutos (VASCONCELLOS-NETO et al. 2015).

A funcionalidade das interações aves-diásporos se torna mais frágil e corre um maior risco de desaparecer em áreas severamente fragmentadas e com um elevado número de espécies endêmicas e/ou ameaçadas de extinção. Em todo o planeta foram identificadas 25 áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade (*hotspots*) (MYERS et al. 2000). Atualmente encontramos 36 áreas (ver WEINZETTEL et al. 2018) No Brasil encontramos duas, o Cerrado e a Mata Atlântica (MYERS, et al. 2000; WEINZETTEL et al. 2018; CONSERVATION INTERNATIONAL, 2022).

Dispersão de sementes por aves em áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade no Brasil

O Cerrado é a savana tropical mais biodiversa do planeta, sendo caracterizado por uma grande variedade de fitofisionomias, dentre elas, o campo rupestre, a mata de galeria, o cerradão e as florestas sazonais (RATTER; RIBEIRO; BRIDGEWATER, 1997; SILVA; BATES, 2002). O Brasil possui a maior área de Cerrado (2 milhões de Km²), com uma grande variedade de espécies vegetais vasculares (cerca de 12.000), das quais,

cerca de 70% necessitam de animais para dispersarem as suas sementes (KUHLMANN; RIBEIRO, 2016a; 2016b). A dispersão por aves (ornitocoria) é a estratégia dispersiva mais comum entre as plantas zoocóricas, sendo encontrada em quase 80% das famílias (PURIFICAÇÃO et al., 2014; KUHLMANN; RIBEIRO, 2016a; MARUYAMA et al., 2019). A predominância destas interações é um reflexo da grande riqueza de aves que o Cerrado brasileiro abriga, cerca de 950 espécies (SILVA, 1995; SICK, 1997; DADOS NÃO PUBLICADOS), das quais 30 são endêmicas (SILVA; BATES, 2002).

Entretanto, cerca de 55% da formação original do Cerrado já foi desmatada e convertida em áreas de pastagens, que estão associadas a invasão de espécies exóticas (gramíneas) e em plantações de commodities agrícolas. Apenas cerca de 7,5 % do Cerrado é coberto por áreas protegidas e apenas 3% são de proteção integral (STRASSBURG et al., 2017). A conservação deste *hotspots* depende da conservação das interações aves-diásporos, entretanto, poucos estudos de fato avaliaram o papel das aves na manutenção das suas comunidades vegetais (e. g. CORRAL et al., 2020; PURIFICAÇÃO et al., 2014; CARVALHO; MALHI; MENOR, 2023).

Nosso segundo *hotspots* é Mata Atlântica, uma ecorregião neotropical que originalmente ocupava grande parte da costa leste da América do Sul (3° - 31° Sul e 35° - 60° Oeste). Estima-se que a sua cobertura tenha abrangido cerca de 150 milhões de ha, dos quais, 95% no Brasil e o restante no Paraguai e na Argentina (RIBEIRO, et al. 2009). Ao longo da sua distribuição, a Mata Atlântica sofre a ação de diferentes fatores biogeográficos, climáticos e geomorfológicos, resultando em uma formação heterogênea, o que por sua vez possibilitou o surgimento de uma rica biodiversidade e muitos endemismos (GALINDO-LEAL; CÂMARA, 2003; SILVA; SOUSA; CASTELLETTI, 2004). Por possuir um elevado número de espécies endêmicas em áreas específicas, a Mata Atlântica foi dividida em sub-regiões biogeográficas ou em centros de endemismos (SILVA; SOUSA; CASTELLETTI, 2004).

Entretanto, a Mata Atlântica brasileira é considerada um dos domínios vegetais mais degradados do planeta, restando apenas cerca de 12% da sua cobertura original (MYERS et al., 2000; JOLY; METZGER; TABARELLI, 2014). Foi a partir da colonização europeia que os seus recursos passaram a ser explorados em larga escala. Os diferentes ciclos econômicos (e.g. extração do pau-brasil e o cultivo de cana-de-açúcar) possuem relação direta com a sua devastação (DEAN, 1996; JOLY; METZGER; TABARELLI, 2014). Atualmente, diversas atividades contribuem para a continuidade da

degradação, tais como a especulação imobiliária, o crescimento desordenado das cidades, a abertura de estradas, o cultivo de espécies exóticas e a defaunação (SILVEIRA; OLMOS; LONG, 2003; JOLY; METZGER; TABARELLI, 2014). O setor mais degradado de todo o domínio é o Centro de Endemismo Pernambuco (CEP), que fica localizado ao norte do rio São Francisco, do estado de Alagoas ao Rio Grande do Norte (SILVA; SOUSA; CASTELLETTI, 2004). O CEP possui o maior número de aves ameaçadas de todo o domínio (OLMOS, 2005; PEREIRA; ARAÚJO; AZEVEDO-JÚNIOR, 2016), é onde estão situadas a Estação Ecológica de Murici, que possui o maior número de táxons de aves ameaçados das Américas (VALE et al., 2018) e a Reserva Biológica de Pedra Talhada, um fragmento com cerca de 4.500 ha localizado entre os estados de Alagoas e Pernambuco (STUDER; NUSBAUMER; SPICHIGER, 2015), que possui 12 táxons endêmicos e 20 ameaçados (PEREIRA; ARAÚJO; AZEVEDO-JÚNIOR, 2016). No CEP o conhecimento das interações aves-diásporos ainda representa uma grande lacuna científica, com poucos estudos realizados (e. g. SILVA; TABARELLI, 2000; SILVA; LEITE; CASTRO, 2013).

Conhecer para conservar

Os pesquisadores ao concluírem as suas investigações, geralmente buscam divulgar os seus resultados em periódicos científicos, a fim de validar os seus achados diante da comunidade acadêmica. Essa é uma prática rigorosa, qualificada e muito respeitada de disseminação de conhecimento no meio acadêmico. No entanto, um dos maiores desafios enfrentados acerca da ciência produzida, é fazer com que esse conhecimento seja divulgado em meio a sociedade. A ciência também é uma prática social, e atualmente observamos uma necessidade crescente de aproximação entre as instituições de ensino superior e a sociedade de uma forma geral. Essa relação mais estreita contribui para a popularização e valorização da ciência, além de fortalecê-la politicamente.

Diante dessa perspectiva de inclusão social, a ciência deixa de ser parte do discurso de um grupo específico, para ser incorporada ao discurso do cidadão comum. Por outro lado, a divulgação científica é um trabalho de transmissão de conhecimentos, que necessita da formulação de um novo discurso (novos significados). Os textos de divulgação científica apresentam caráter próprio, autoexplicativos, que se utilizam de comparações e metáforas. Transitar por essa esfera exige dos pesquisadores o

desenvolvimento de habilidades para um outro tipo de escrita. (ver CUNHA; GIORDAN, 2009).

Outros caminhos também têm sido utilizados para facilitar essa aproximação, como a inclusão da sociedade na coleta de dados científicos (ciência cidadã). No caso dos estudos envolvendo as aves, o incentivo à observação e ao registro fotográfico destes animais na natureza vêm contribuindo com a construção do conhecimento científico em diferentes contextos ecológicos. Através do compartilhamento dos registros em plataformas digitais específicas, os pesquisadores podem acessar por exemplo, informações sobre comportamento alimentar (SILVA, 2023b), dispersão de sementes (SILVA, 2022) e polinização (BOSENBECKER et al., 2023).

Atualmente, os meios de comunicação facilitam o retorno dos resultados científicos para a sociedade em uma linguagem acessível, isso acelera a construção de novas concepções de ensino, formando cidadãos mais atuantes nas questões sociais e ambientais. Uma parcela importante da sociedade é o público infanto-juvenil. A mediação desse diálogo por professores, proporciona discussões consistentes em salas de aulas. As revistas de conteúdo científico voltadas para esse tipo de público são ferramentas bem promissoras para a construção desse conceito social.

REFERÊNCIAS

- BOSENBECKER, C.; ANSELMO, P.A.; ANDREOLI, R.Z.; SHIMIZU, G.H.; OLIVEIRA, P.E.; MARUYAMA, P.K. Contrasting nation-wide citizen science and expert collected data on hummingbird–plant interactions. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 21, p. 164-171. 2023.
- BRAVO, C.; CHAMORRO, D.; HIRALDO, F.; SPEZIALE, K.; LAMBERTUCCI, S.A.; TELLA, J.T.; BLANCO, G. Physiological dormancy broken by endozoochory: Austral parakeets (*Enicognathus ferrugineus*) as legitimate dispersers of calafate (*Berberis microphylla*) in the Patagonian Andes. *Journal of Plant Ecology*, v. 13, p. 538-544. 2020.
- BUFALO, F.S.; GALETTI, M.; CULOT, L. Seed dispersal by primates and implications for the conservation of a biodiversity hotspot, the Atlantic Forest of South America. *International Journal of Primatology*, v. 37, p. 333-349. 2016.

- CARVALHO, R.B.; MALHI, Y.; MENOR, I.O. Frugivory and seed dispersal in Cerrado: network structure and defaunation effects. *Biotropica*, v. 55, p. 849-865. 2023.
- CONSERVATION INTERNATIONAL. Biodiversity Hotspots-Conservation International. <https://www.conservation.org/priorities/biodiversity-hotspots>. 2022.
- COMPAGNOLI, M.L; CHRISTIANINI, A.V. Temporal consistency in interactions among birds, ants and plants in a neotropical savanna. *Oikos*, v. 2. 2022.
- CORRAL, A.; VALÉRIO, L.M.; CHEUNG, K.C.; FERREIRA, B.H.S.; GUERRA, A.; SZABO, J.K.; REIS, L.K. Plant-bird mutualistic interactions can contribute to the regeneration of forest and non-forest urban patches in the Brazilian *Cerrado*. *Urban Ecosyst*, v. 24:205-213. 2020.
- CORREA, S.B.; COSTA-PEREIRA, R.; FLEMING, T.; GOULDING, M.; ANDERSON, J.T. Neotropical fish-fruit interactions: eco-evolutionary dynamics and conservation. *Biological Reviews*, v. 90, p. 1263-1278. 2015.
- DEAN, W. *A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica Brasileira*. São Paulo, Companhia das Letras, 1996. 484 p.
- DIRZO, R.; YOUNG, H.S.; GALETTI, M.; CEBALLOS, G.; ISAAC, N.J.B.; COLLEN, B. Defaunation in the anthropocene. *Science*, v. 345, p. 401-406. 2014.
- ENDRESS, P.K. *Diversity and evolutionary biology of tropical flowers*. Cambridge, Cambridge University Press. 1994.
- FLEMING, T.H.; KRESS, W.J. A brief history of fruits and frugivores. *Acta Oecologica*, v. 37, p. 521-530. 2011.
- FLEMING, T.H.; KRESS, W.J. *The ornaments of life: coevolution and conservation in the tropics*. Chicago, University of Chicago Press, 2013. 588 p.
- FLOREZ-MONTERO, G.; MUYLEAERT, R.D.L.; NOGUEIRA, M.R.; GEISELMAN, C.; SANTANA, S.; STEVENS, R.D.; TSCHAPKA, M.; RODRIGUES, F.A.; MELLO, M.A.R. Interactions: an data set of bat-plant interactions in the Neotropics. *Ecology*, v. 103. 2022.

- GALETTI, M.; GUIMARÃES, P.R. Seed dispersal of *Attalea phalerata* (Palmae) by crested caracaras (*Caracara plancus*) in the Pantanal and a review of frugivory by raptors. *Ararajuba*, v. 12, p. 133-135. 2004.
- GALETTI, M.; GUEVARA, R.; CÔRTEZ, M.C.; FADINI, R.; VON MATTER, S.; LEITE, A.B.; LABECCA, F.; RIBEIRO, T.; CARVALHO, C.S.; COLEVATTI, R.G.; PIRES, M.M.; GUIMARÃES, P.R.; BRANCALION, P.H.; RIBEIRO, M.C.; JORDANO, J. Functional extinction of birds drive rapid evolutionary changes in seed size. *Science*, v. 340, p. 1086-1090. 2013.
- GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I.G. *The Atlantic Forest of South America: Biodiversity Status, Threats and Outlook*. Washington, CABS and Island Press. 2003.
- GODÓ, L.; BORZA, S.; VALKÓ, O.; RÁDAI, Z.; DEÁK, B. Owl-mediated diploendozoochorous seed dispersal increases dispersal distance and supports seedling establishment. *Global Ecology and Conservation*, v. 25: e02519. 2023.
- HAUGAASEN, T. Seed predation of *Couratari guianensis* (Lecythidaceae) by macaws in central Amazonia, Brazil. *Ornitologia Neotropical*, v. 19, p. 321-328. 2008.
- HOWE, H.F.; SMALLWOOD, J. Ecology of seed dispersal. *Annual Review of Ecology and Systematics*, v. 13, p. 201-228. 1982.
- JANZEN, D.H. Herbivores and the number of trees species in tropical forests. *The American Naturalist*, v. 104, p. 501-528. 1970.
- JOLY, C.A.; METZGER, J.P.; TABARELLI, M. Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: Ecological findings and conservation initiatives. *New Phytologist*, v. 204, p. 459-473. 2014.
- JORDANO, P.; SCHUPP, E.W. Determinants of seed dispersal effectiveness: the quality component in the *Prunus mahaleb* – frugivorous bird interaction. *Ecological Monographs*, v. 70, p. 591-615. 2000.
- JORDANO, P.; GALETTI, M.; PIZO, M.A.; SILVA, W.R. Ligando frugivoria e dispersão de sementes à biologia da conservação. Pp. 411-436. In: DUARTE, C.F.; BERGALLO, H.G.; ALVES, M.A.S.; VAN SLUYS, M. (ed.). *Biologia da Conservação: essências*. São Paulo, Editora Rima. 2006.

- JORDANO, P. What is long distance dispersal? And a taxonomy seed dispersal events. *Journal of Ecology*, v. 105, p. 75-84. 2017.
- KUHLMANN, M.; RIBEIRO, J.F. fruits and frugivores of the Brazilian Cerrado: ecological and phylogenetic considerations. *Acta Botanica Brasilica*, v. 30, p. 495-507. 2016a.
- KUHLMANN, M.; RIBEIRO, J.F. Evolution of seed dispersal in the Cerrado biome: ecological and phylogenetic considerations. *Acta Botanica Brasilica*, v. 30, p. 271-282. 2016b.
- LEVEY, D.J. Spatial and temporal variation in Costa Rican fruit-eating bird abundance. *Ecological Monographs*, v. 58, p. 251-269. 1988.
- LEVEY, D.J.; SILVA, W.R.; GALETTI, M. (Eds) Seed dispersal and frugivory ecology: ecology evolution and conservation. CABI. 2002.
- LORENZI, H.; NOBLICK, L.K.; KAHN, F.; FERREIRA, E. *Flora Brasileira: Arecaceae (Palmeiras)*. São Paulo, Plantarum. 2010. 384p.
- MARUYAMA, P.K.; MELO, C.; PASCOAL, C.; VICENTE, E.; CARDOSO, J.C.F.; BRITO, V.L.G.; OLIVEIRA, P.E. What is on the menu for frugivorous birds in the Cerrado? Fruiting phenology and nutritional traits highlight the importance of habitat complementarity. *Acta Botanica Brasilica*, v. 33, p. 572-583. 2019.
- MOERMOND, T.C.; DENSLOW, J.S. Fruit choice in neotropical birds: effects of fruit type and accessibility on selectivity. *The Journal of Animal Ecology*, p. 407-420. 1983.
- MYERS, N.; MITTERMEIER, R.A.; MITTERMEIER, C.G.; FONSECA, G.A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, p. 853-858. 2000.
- O'FARRILL, G.; GALETTI, M.; CAMPOS-ARCEIZ, A. Frugivory and seed dispersal by tapirs: an insight on their ecological role. *Integrative zoology*, v. 8, p. 4-17. 2013
- OLMOS, F. Aves ameaçadas, prioridades e políticas de conservação no Brasil. *Natureza e Conservação*, v. 3, p. 21-42. 2005.
- PACHECO, J.F.; SILVEIRA, L.F.; ALEIXO, A.; AGNE, C.A.; BENCKE, G.A.; BRAVO, G.A.; BRITO, G.R.R.; COHN-HAFT, M.; MAURÍCIO, G.N.; NAKA, L.N.; OLMOS, F.; POSSO, S.R.; LEES, A.C.; FIGUEIREDO, L.F.A.; CARRANO, E.;

GUEDES, R.C.; CESARI, E.; FRANZ, I.; SCHUNK, F. & PIACENTINI, V.Q. Annotated checklist of the birds of Brazil by the Brazilian Ornithological Records Committee. 2 – second edition. *Ornithology Research*, v. 29, p. 94-105. 2021.

PARRINI, R. *Quatro estações – História natural das aves na Mata Atlântica: uma abordagem trófica*. Rio de Janeiro. Technical Books. 2015.

PAULA, W.S.; SOUZA, R.N.; SANTOS, E.G. Fruit consumption and seed dispersal of *Caryocar brasiliense* (Caryocaraceae) by *Caracara plancus* (Falconidae). *Brazilian Journal of Biology*, v. 81, p. 1-3. 2021.

PEREIRA, G.A.; ARAÚJO, H.F.P.; AZEVEDO-JÚNIOR, S.M. Distribution and conservation of three important bird groups of the Atlantic Forest in north-east Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, v. 76, p. 1004-1020. 2016.

PÉREZ-MENDEZ, N.; RODRÍGUEZ, A. Raptors as seed dispersers. In: NEWTON, (ed). *Birds of prey*. London: Merehurst Press, p. 143-162. 2018.

PIRES, M.M.; GALETTI, M. Beyond the “empty forest”: The defaunation syndromes of Neotropical Forest in the Anthropocene. *Global Ecology and Conservation*, e02362. 2023.

PIZO, M.A.; SANTOS, B.T.P. Frugivory, post-feeding flights of frugivorous birds and the movement of seeds in a brazilian fragmented landscape. *Biotropica*, v. 43, p. 335-342. 2011.

PIZO, M.A.; TONETTI, V.R. Living in a fragmented world: Birds in the Atlantic Forest. *The Condor*, v. 122, p. 1-14. 2020.

PIZO, M.A.; MORALES, J.M.; OVASKAINEN, O.; CARLO, T.A. Frugivory specialization in birds and fruit chemistry structure mutualistic networks across the neotropics. *American Naturalist*, v. 197, p. 236-249. 2021.

PIZO, M.A.; FONTANELLA, A.B.; CARLO, T.A.; GONZÁLES, C.A. Abundance predominates over niche factors as determinant of the frequency of interactions between frugivorous birds and plants. *Biotropica*, v. 54, p. 627-634. 2022.

PURIFICAÇÃO, K.N.; PASCOTTO, M.C.; PEDRONI, F.; PEREIRA, J.M.N.; LIMA, M.A. Interactions between frugivorous birds and plants in savanna and forest formation of the Cerrado. *Biota Neotropica*, v 14, p. 1-14. 2014.

- QUINTERO, E.; PIZO, M.A.; JORDANO, P. Fruit resource provisioning for avian frugivores: the overlooked side of effectiveness in seed dispersal mutualisms. *Journal of Ecology*, v. 108, p. 1358-1372. 2020.
- RATTER, J.A.; RIBEIRO, J.F.; BRIDGEWATER, S. The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. *Annals of Botany*, v. 80, p. 223-230. 1997.
- RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P.; MARTENSEN, A.C.; PONZONI, F.; HIROTA, M.M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, v. 142, p. 1141-1153. 2009.
- SCHUPP, E.W.; JORDANO, P.; GÓMEZ, J.M. Seed dispersal effectiveness revisited: a conceptual review. *New Phytologist*, v. 188, p. 333-353. 2010.
- SNOW, D. W. Tropical frugivorous birds and their food plants: a world survey. *Biotropica*, v. 13, p. 1-14. 1981.
- SICK, H. *Ornitologia Brasileira*. Rio de Janeiro. Editora Nova Fronteira. 1997, 912p.
- SILVA, J.M.C. Birds of the Cerrado region, South America. *Streenstrupia*, v. 21, p. 69-92. 1995.
- SILVA, J.M.; TABARELLI, M. Tree species impoverishment and the future flora of the Atlantic Forest of northeast Brazil. *Nature*, v. 404, p. 72-74. 2000.
- SILVA, J.M.C.; BATES, J.M. Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: A Tropical savanna hotspot. *Bioscience*, v. 52, p. 225-234. 2002.
- SILVA, J.M.C.; SOUSA, M.C.; CASTELLETTI, C.H. Areas of endemism for passerine birds in the Atlantic Forest, South America. *Global Ecology and Biogeography*, v. 13, p. 85-92. 2004.
- SILVA, L.B.; LEITE, A.V.L.; CASTRO, C.C. Frugivoria por aves em *Miconia prasina* D.C (Melastomataceae) em um fragmento de Mata Atlântica o nordeste do Brasil. *Atualidades Ornitológicas*, v. 174, p. 4-7. 2013.
- SILVA, L.B.; SILVA, J.B.; SILVEIRA, C.; MENCK, M.; SALES, M.F.; CASTRO, C.C. Plant-animal interactions of understory species in an area of tropical rainforest, northeastern Brazil. *Austral Ecology*, v. 46, p. 561-573. 2021a.

- SILVA, L.B.; PEREIRA, G.A.; PASSOS FILHO, P.B.; ALMEIDA, N.M. Seed dispersal of the palm *Acrocomia aculeata* by the Blue-and-Yellow Macaw (*Ara ararauna*). *Brazilian Journal of Biology*, v. 83, p. 1-3. 2021b.
- SILVA, L.B. Teamwork: psittacids (Aves, Psittaciformes) disperse and help other birds disperse large diaspores. *Ornithology Research*, v. 30, p. 247-252. 2022a.
- SILVA, L.B. Frugivory and primary seed dispersal of *Elaeis guineensis* by birds of prey. *Brazilian Journal of Biology*, v. 84, p. 1-5. 2022b.
- SILVA, L.B. Can the Ferruginous pygmy-owl (Aves, Strigidae) disperse seeds? *Ornithology Research*, v. 31, p. 307-310. 2023a.
- SILVA, L.B. Use of anvils by the Great Kiskadee (Aves, Tyrannidae): a description based on citizen science data. *Animal Cognition*, v. x, p. 1141-1145. 2023.
- SILVEIRA, L.F.; OLMOS, F.; LONG, A. Birds in Atlantic Forest fragments in north-east Brazil. *Cotinga*, v. 20, p. 32-46. 2003.
- STRASSBURG, B.B.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; BALMFORD, A. Moment of thru for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology & Conservation*, v. 1, p. 1-3. 2017.
- STUDER, A.; NUSBAUMER, L.; SPICHIGER, R. Biodiversidade da Reserva Biológica de Pedra Talhada (Alagoas, Pernambuco - Brasil). *Boissiera*, v. 68, p. 1-818. 2015.
- TELLA, J.L.; HIRALDO, F.; PACÍFICO, E.; DÍAZ-LUQUE, J.A.; DÉNES, F.V.; FONTOURA, F.M.; GUEDES, N.; BLANCO, G. Conserving the diversity of ecological interactions: the role of two threatened macaw species as legitimate dispersers of “megafauna” fruits. *Diversity*, v. 12, p. 1-20. 2020.
- TRIVEDI, M.R.; CORNEJO, F.H.; WATKINSON, A.R. Seed predation on Brazil nuts (*Bertholletia excelsa*) by macaws (Psittacidae) in Madre de Dios, Peru. *Biotropica*, v. 36, p. 118-122. 2004.
- VALE, M.M.; TOURINHO, L.; LORINI, M.L.; RAJÃO, H.; FIGUEIREDO, M.S.L. Endemic birds of the Atlantic Forest: Traits, conservation status, and patterns of biodiversity. *Journal of Field Ornithology*, v. 89, p. 193–206. 2018.

VAN DER PIJL, L. *Principles of dispersal in higher plants*. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1982. 82 p.

VASCONCELLOS-NETO, J.; RAMOS, R.R.; PINTO, L.P. The impact of anthropogenic food supply on fruit consumption by dusk-legged guan (*Penelope obscura* Temminck, 1815): potential effects on seed dispersal in an Atlantic Forest area. *Brazilian Journal of Biology*, v. 75, p. 1008-1017. 2015.

WEINZETTEL, J.; VACKAR, D.; MEDKOVÁ, H. Human footprint in biodiversity hotspots. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 16, p. 447-452. 2018.

YOUNG, H.S.; MCCAULEY, D.J.; GALETTI, M.; DIRZO, R. Patterns, causes, and consequences of anthropocene defaunation. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 47, p. 333-358. 2016.

CAPÍTULO 1

(Manuscrito submetido *Biodiversity and Conservation*)



Biodiversity and Conservation

SEED DISPERSAL BY BIRDS IN CERRADO: EFFECTS OF FRAGMENTATION ON THE ORGANIZATION OF INTERACTION NETWORKS

Seed dispersal by birds in Cerrado: effects of fragmentation on the organization of interaction networks

Leonardo Barbosa da Silva^{1,*}, Paulo de Barros Passos Filho², Glauco Alves Pereira³, Jefferson Thiago Souza⁴, Camila Silveira Souza⁵, Cibele Cardoso de Castro^{1,6}, Natan Messias de Almeida^{1,7}

1-Departamento de Biologia, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade, Laboratório de Ecologia Reprodutiva de Angiospermas, Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Recife, PE, Brasil

2-E-fauna - Consultoria Ambiental, Maceió, AL, Brasil

3- Departamento de Biologia, Laboratório de Ornitologia, Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Recife, PE, Brasil

4-Universidade Estadual do Ceará-UECE, Iguatu, CE, Brasil

5-Universidade Estadual de Montes Claros, UNIMONTES, Montes Claros, MG, Brasil

6-Universidade Federal do Agreste de Pernambuco-UFAPE, Garanhuns, PE, Brasil

7-Universidade Estadual de Alagoas-UNEAL, Palmeira dos Índios, AL, Brasil

*Corresponding author. Email: lb_silva@yahoo.com.br

Abstract

Cerrado is the tropical savanna with the highest biodiversity on the planet. Seed dispersal by frugivorous animals is one of the interactions responsible for the maintenance and natural restoration of forests in Cerrado. Currently, more than half of the original vegetation of this biome has been destroyed, a condition that puts it among the 25 hotspots for biodiversity conservation in the world. Here, we bring information about the mutualistic interactions between birds and diaspores in two areas with different conservation states in the Brazilian Cerrado: a fragmented area and a continuous (conserved) area in the Midwest region of Brazil. We hypothesize that environmental fragmentation favors the functional homogenization of bird-diaspore mutualistic interactions. Using a network-based approach of interactions, we identified that larger birds capable of swallowing fruits containing large seeds had a smaller participation in the interactions in the fragmented area. On the other hand, interactions between small and generalist birds (e.g. Tyrannidae and Thraupidae) and plants that produce small diaspores (e.g. species of the families Malpighiaceae, Melastomataceae, Myrtaceae, and Rubiaceae) were important for the maintenance of the community structure. Our study presents empirical evidence of the occurrence of functional homogenization in bird-diaspore mutualistic interactions on a regional scale in the Brazilian Cerrado. This condition favors the propagation of plant groups mainly composed of generalist species. Maintaining the functional diversity of plant-disperser interactions represents a major challenge for the conservation of Cerrado. Disseminating the ecological and economic importance of seed dispersal by animals can help in the development of policies for the conservation and restoration of this tropical savanna.

Keywords: Seed dispersal, Bird ecology, Frugivory, functional homogenization, Networks of interactions, Neotropical Savanna

Introduction

Seed dispersal is one of the key processes for the maintenance and natural recovery of tropical forests. Several groups of animals have developed morphological, physiological and behavioral adaptations to feed on fruits and act on seed dispersal (zoochory) (Fleming and Kress 2013). At the same time, angiosperms have developed strategies that strengthen these relationships, including the production of diaspores (fruits and seeds) with different traits (e.g. color, odor, size, disposition, and nutritional composition) that converge with the needs of animals (Levey et al. 2002; Fleming and Kress 2013; Maruyama et al. 2019; Pizo et al. 2021). This fidelity can ensure that seeds are more efficiently transported to more distant sites avoiding higher predation rates, pathogen infection and intraspecific competition typical of locations close to the parent plant (Janzen 1970; Howe and Smallwood 1982). This spatial circumstance increases the chances of establishing progeny in new areas and influences the genetic structure of populations (Levey et al. 2002; Fleming and Kress 2013).

Among dispersing animals, birds represent one of the largest and most diverse groups (Quintero et al. 2020; Carlo et al. 2022). In tropical forests, seed dispersal by birds (ornithochory) is one of the main mechanisms of seed displacement for many species of angiosperms (Quintero et al. 2020; Silva et al. 2021a; Carlo et al. 2022). These mutualistic associations may form networks of interactions composed of multiple species and with a high degree of complexity due to the several factors related to the ecological niches of the species that directly influence their structures, such as the fruiting phenology, feeding behavior, displacement capacity, and morphological correspondence between bird size (ingestion capacity) and diaspore size (see Silva and Tabarelli 2000; Fuzessy et al. 2022; Pizo et al. 2021; 2022). Furthermore, the distribution of tropical mega-biodiversity across different types of forests promotes unique structures of interaction networks, that is, networks composed of species typical of each forest formation (Pizo et al. 2021; 2022).

The savanna found in the Neotropical region, known as Cerrado, has the greatest biodiversity on Earth and represents one of the largest forest formations in the South American continent, mostly located in the central region of Brazil (originally covering about 23% of the Brazilian territory) (Ratter et al. 1997; Silva and Bates 2002). Over 12,000 species of vascular plants have already been recorded in Cerrado (Mendonça et al. 2008). Such a high plant diversity results in a mosaic of ecosystems with different

phytophysiognomies [e.g. rupestrian field, “campo limpo” (dry grassland), “cerradão” (dense woodland), and gallery forest] with a high level of endemism (Klink and Machado 2005). Cerrado *stricto sensu* is the vegetation type that predominates in Cerrado, occupying about 70% of its total area. This vegetation type is characterized by the presence of shrubs and low trees with twisted trunks (see Ratter et al. 1997). Most of the plant species produce diaspores with characteristics associated with bird dispersal (ornithochoric dispersal) (Kuhlmann and Ribeiro 2016; Maruyama et al. 2019).

The predominance of bird-dispersed diaspores is not incidental. Brazil has one of the largest diversity of birds in the world (1971 species) (Pacheco et al. 2021), and the biome Cerrado is home to about 950 species (Silva 1995; Sick 1997; Gwynne et al. 2010). However, despite the knowledge gathered about the co-evolutionary relationships between birds and plant diaspores (Kuhlmann and Ribeiro 2016; Gottsberger and Silberbauer-Gottsberger 2018; Maruyama et al. 2019), few studies have directly evaluated the role of these animals in the maintenance of plant communities in Cerrado (Corral et al. 2020; Purificação et al. 2014; Purificação et al. 2022). Notwithstanding the great importance of Cerrado, more than half of its original cover has been totally destroyed by direct anthropogenic actions such as mechanized agriculture, extensive livestock farming, and urban sprawl. At a rapid pace, the devastation generates a highly fragmented landscape, forming islands of vegetation (Ratter et al. 1997). In the Anthropocene, fragmentation is one of the driving forces of the biodiversity crisis, as it puts taxonomic diversity, especially the diversity of endemic species, at risk (Myers et al. 2000; Pizo and Tonetti 2020), disrupts food webs (Silva and Tabarelli 2000; Morante-Filho and Faria 2017), and causes functional and genetic impoverishment of ecosystems (Olden 2006).

In an extremely worrying scenario, Cerrado is considered one of the 25 priority areas (hotspots) for biodiversity conservation in the world (Myers et al. 2000). Therefore, studies on bird seed dispersal systems are critical to understand how interactions are organized. Such studies can shed light into the resilience and specificity of relationships and the consequences of the loss of ecological functions. In view of the above, the present study aimed to analyze the process of seed dispersal by birds in two areas with different conservation states in the Brazilian Cerrado: a fragmented area and a continuous (conserved) area. We used the following approaches: a survey of potentially seed-

dispersing avifauna (omnivorous and frugivorous species); a survey of woody plants with bird-dispersed diaspores; monitoring of diaspore-bird interactions; and construction of interaction networks. We tested the hypothesis that environmental fragmentation favors the functional redundancy of bird-diaspore mutualistic interactions.

Material and methods

Study area

The study was developed in two areas of Cerrado located in the state of Goiás, Midwest region of Brazil. The first area (A1, fragmented) was the headquarters of the Agricert Agro Mercantil Ltda farm and its surroundings, located in the district of Montividiu (17°10'58" S; 51°17'38" W; 934 m). The area is composed of Cerrado forest *stricto sensu*, has a flat relief and altitudes ranging from 760 to 938 m. Most of the area is used for the cultivation of commodities (soybeans, corn and sugarcane), resulting in a landscape with totally fragmented native vegetation. The second area (A2, conserved) was the Sítio Verde farm, located in Serra do Kayapó, in the district of Caiapônia (17°09'38" S; 51°19'42" W; 615 m). The area is well preserved and composed of Cerrado *stricto sensu* and cerrado. The relief is rugged with altitudes ranging from 560 to 790 m (Figure. 1).

Survey of seed-dispersing bird species

Between September 2014 and November 2015, we performed eight field expeditions lasting 10 days each (five days in A1 and five days in A2). We established five 1-km long transects in each area (divided into five points, 200 m apart from each other). Direct visual observation sessions (*ad libitum*) (Altmann 1974) between 5 h and 9 h, totaling 320 hours, were conducted to record the birds. We used 8 x 32 mm binoculars and cameras. The birds were also identified through their vocalizations. A Sony D-50 recorder connected to a Sennheiser ME-66 directional microphone was used to record the vocalizations and for the subsequent analysis. We also captured the birds in the understory using 10 mist nets (16-mm mesh, 12-m long and 3-m high). The nets were exposed for five days in each area (at five different points at least 1 km apart from each other), between 5 h and 9 h, totaling 320 h. After capturing the birds, we identified the species and kept them in cotton bags (30 x 20 cm) for about 30 min before releasing them (for the collection of feces

and/or regurgitated seeds). Species identification was performed with the aid of field guides (Gwynne et al. 2010; Cintra 2014). The taxonomic sequence and nomenclature are in accordance with the Brazilian Committee of Ornithological Records (Pacheco et al. 2021). Information on the weight and total length of birds was obtained from specialized literature (Sick 1997; Gwynne et al. 2010).

Plant species

During each expedition, we observed the availability of bird-dispersed fruits (exposed, fleshy, odorless, and with colors that signal maturation stages) in areas A1 and A2. Fertile samples (with flowers or fruits) of all woody species found in the field were collected, herborized, and then identified with the help of specialists from the Federal University of Goiás (UFG), Samambaia campus. Diaspore size (diameter) values were obtained in the field with the aid of a digital caliper and by consulting specialized literature (Kuhlmann 2018a, b).

Frugivory and seed dispersal

We selected 15 bird-dispersed species that occurred in both areas A1 and A2 (*Xylopia aromaica*, *Scheffera macrocarpa*, *Acrocomia aculeata*, *Curatella americana*, *Davilla elliptica*, *Ocotea pomaderroides*, *Miconia albicans*, *Miconia ciliata*, *Miconia nervosa*, *Virola sebifera*, *Myrcia guianensis*, *Myrcia splendens*, *Psychotria carthagenensis*, *Zanthoxylum rhoifolium*, and *Cecropia pachystachya*) and conducted direct visual observation sessions (ad libitum) (Altmann 1974) in the morning between 5 h and 10 h and in the afternoon between 16 h and 18 h, totaling 120 h (4 h observation for each species in each area). We used 8 x 32 mm binoculars to observe the details of the interactions and cameras to register these records. We consider it as a visit the moment in which the birds arrived and started foraging until they left the plant. Fecal samples collected during the capture of the birds were washed in a 1-mm mesh sieve and the seeds were separated for later identification. Dispersal interactions were considered to happen when defecated and/or regurgitated seeds were observed (including samples collected in mist nests).

Network analysis

With the collected data, an interaction network was set up for each area. These networks were built through a matrix, where the sampled plant species were put in the rows and the disperser species in the columns. The matrix was filled based on the frequency of interactions between the species. The sampling effort for the networks was first evaluated (Chacoff et al. 2012; Vizentin-Bugoni et al. 2016). For this purpose, each combination of plant species and disperser species was considered as a “species” and the frequency of each interaction between the pairs in the network represented the “abundance” (Vizentin-Bugoni et al. 2016). The diversity of interactions was estimated using the Chao1 estimator of species richness (Chao 1984; Colwell and Coddington 1994) and the sampling effort was calculated as the ratio of the observed to estimated richness of interactions (Chacoff et al. 2012). The Chao 1 estimator was calculated using the INEXT package (Hsieh et al. 2014) in the R program (R Development Core Team 2023).

The structure of the plant-bird interaction network (for A1 and A2) was characterized through the following metrics: nestedness, modularity, degree of specialization of the species, and diversity of interactions. Nestedness describes whether specialist species interact with a subset of the species that interact with generalist species in the network (Ulrich and Almeida-Neto 2012). The nestedness of the studied network was calculated using the "wNODF" metric (Almeida-Neto & Ulrich 2011) in the "bipartite" package (Dormann et al. 2022). "wNODF" values range from 0 to 100, where 100 indicates a perfectly nested network (Almeida-Neto and Ulrich 2011). Modularity, in turn, informs the extent to which interactions are organized into modules or groups. The modularity index was calculated with the DIRTLPAbw + algorithm (Beckett 2016) using the computeModules function in the Bipartite package in the R program (Dormann et al. 2008). Modularity measures whether the network is organized so that there are interaction groups (modules) with more interactions within a module than among modules (Martín Gonzalez et al. 2015). The absolute value of modularity of the network was analyzed using the "modularity Q" index, which ranges from 0 for networks with minimal compartmentalization to 1 for networks composed of perfect modules. Network-wide specialization was calculated using the H2' index, which describes how species distribute their interactions based on the availability of community-wide partners (Blüthgen et al. 2006).

We calculated the degree, closeness centrality, and specialization of bird-dispersed species and dispersing birds. The degree expresses the number of interaction partners (dispersers) with which each species interacts in the network. Closeness centrality evaluates the species that have a high share of interactions in the network. The complementary specialization d' is an index that takes into account the frequencies of interaction of each node, evaluating the preference of species to interact before the total availability of partners (Blüthgen et al. 2006). The d' index ranges from 0 (highly generalist species) to 1 (highly specialist species). Degree and d' values were obtained using the “specieslevel” function of the “bipartite” package (Dormann et al. 2022) in R.

Since network indices can be affected by the number of interacting species in the community and the sampling effort (Fründ et al. 2016), besides the observed values of network metrics (modularity, nesting, and specialization), we also compared the metrics using a null model. Here, the Vaznull null model (Vázquez et al. 2005) was used. This model constrains the connectance, network size, and total number of interactions at each randomization. The estimated confidence interval was 95% for each metric of the 10,000 simulated values, and the value of the metric was considered significant when greater than the confidence interval generated by the randomizations of the null model used.

The degree, centrality and specialization indices between the two sampled networks were compared using linear models. Further, we used linear models to assess whether species indices (response variable) vary according to the weight and total length of the dispersing birds (predictor variables).

Results

We recorded 102 species of birds distributed in nine orders and 24 families. The order Passeriformes had the greatest diversity (73 species), notably the families Tyrannidae (26), Thraupidae (17), Psittacidae (7), and Icteridae (6) (Table 1 Supplementary Material and Figure 2). Five species (4.90%) occurred exclusively in area A1 (*Orthopsittaca manilatus*, *Pipra fasciicauda*, *Tyrannopsis sulphurea*, *Tyrannus savana*, *Agelaioides badius*), while 24 species (23.52%) were exclusive to area A2 (Table 1 Supplementary Material).

We recorded a total of 69 species of bird-dispersed plants distributed in 30 families. The most representative families were Myrtaceae (10), Melastomataceae (9), and Rubiaceae (7) (Table 2 Supplementary Material and Figure 3). Forty-five species were recorded in A1 and 67 in A2. Most species (63.76%) produced diaspores with length up to 10 mm (Table 2). Thirty-two species of birds were captured in the understory, and in 23 of them we observed defecated or regurgitated seeds. During the collection, it was possible to identify seeds of 21 bird-dispersed species. During the focal observation sessions of the interactions, we recorded 48 species of birds (47.05% of the registered guild), which carried out 1323 visits in total; 63.64% of these visits occurred in the conserved area (A2).

The total of interactions observed in A1 corresponded to 93% of the estimated diversity (125/134.505) and in A2 corresponded to 94% (221/222.999). The interaction networks showed significant modularity (A1 $Q = 0.36$; $p > 0.005$; A2 $Q = 0.33$; $p > 0.005$). The number of bird and plant species, their interactions, and the number of links per species decreased with environmental fragmentation. The network in A1 was composed of five modules, consisting of at least three bird species and three plant species. The network in A2 was composed of seven modules, all formed by at least six bird species and two plant species, with the exception of modules three and seven, which were formed by one bird species and one plant species (Fig 4). The networks were also significantly specialized, with the network in A1 being slightly more specialized ($H2 = 26.63$; $p < 0.05$) than that in A2 ($H2 = 0.33$; $p < 0.005$). The network in A1 showed a nestedness value of 16.55 and in A2 of 23.05, but the networks were not significantly nested.

Regarding the difference in the role of the species in the networks of the two sampled areas, for plants, the degree ($F = 2.15$; $p > 0.05$) and specialization ($F = 4.11$; $p > 0.05$) did not differ significantly between the two areas. Closeness centrality was higher in the plant species of A1 ($F = 3.15$; $p < 0.05$). For bird species, the degree did not differ between the two areas ($F = 4.64$; $p > 0.05$), but the closeness centrality ($F = 1.75$; $p < 0.05$) and specialization ($F = 1.98$; $p < 0.05$) was higher in A1 (Fig. 5). Regarding the traits of the bird species (total length and weight), it was found that smaller total length values of birds were related to greater degree ($r^2 = 0.18$; $p < 0.05$) and closeness centrality ($r^2 = 0.49$; $p < 0.05$) of the species. The opposite was found for specialization: the greater the total length value, the more specialized the birds were ($r^2 = 0.54$; $p < 0.05$). As for the

weight of the birds, the degree ($r^2 = 0.21$; $p < 0.05$), closeness centrality ($r^2 = 0.35$; $p < 0.05$), and specialization ($r^2 = 0.36$; $p < 0.05$; Fig. 6) followed the same trend observed for the total length.

Discussion

We found strong evidence of the negative effects of fragmentation on the functional diversity of bird-diaspore interactions. The results showed a decrease in the number of bird-dispersed plants and in the diversity of the dispersing bird guild, especially of larger frugivorous species. Our analyses suggest that fragmentation favors the specialization of interactions between small (more resilient) bird species and plants that produce small diaspores.

The organization of interaction networks is a consequence of ecological and evolutionary processes and is fundamental for the coexistence of species and functioning of ecosystems (Silva et al. 2021a; Pizo et al. 2021; Fuzessy et al. 2022). The plants studied had diaspores with a great diversity of morphological characteristics (type, color, shape, and size). However, size is one of the most important traits when it comes to endozoochorous dispersal (seed ingestion and passage through the digestive tract of animals) and for the composition of interaction networks (Silva and Tabarelli 2000; Pizo et al. 2020). Most of the species recorded in our study have fleshy fruits measuring about 10 mm in diameter and seeds measuring between 1 and 5 mm (e.g. those of Malpighiaceae, Melastomataceae, Myrtaceae, and Rubiaceae). We observed that these diaspores were dispersed by small birds, such as species of Tyrannidae, Fringillidae, and Thraupidae. On the other hand, plants that had diaspores ≥ 15 mm (about 35%) (e.g. those of the families Combretaceae, Malvaceae, Myristicaceae, and Sapotaceae) depended on large birds with a bigger beak opening, such as representatives of the families Cracidae, Cotingidae and Ramphastidae.

In seed-dispersing bird guilds, the larger species are the most sensitive to environmental fragmentation and the most vulnerable to selective hunting (Silva and Tabarelli 2000; Dirzo et al. 2014). In fact, during our observations in the area A1, we did not have records of species such as *Pyroderus scutatus* (Cotingidae) or the participation of *Crax fasciolata* (Cracidae) and *Ramphastos vitellinus* (Ramphastidae) in the interaction network. These last two species are currently threatened with extinction

(IUCN 2023). Furthermore, plantations of commodities can represent an insurmountable barrier for many birds, especially understory species (Pizo and Tonetti 2020). In our study, the modules of the network in the fragmented area presented a lower diversity of species and were mainly composed of small birds. These results support the hypothesis that environmental fragmentation favors the functional homogenization of bird-diaspore mutualistic interactions, since only plants with small diaspores continue being dispersed. This condition can trigger cascading effects on ecosystems, because it favors the predominance of pioneer species (mainly r-strategists) (Olden 2006; Lôbo et al. 2011).

In addition to directly affecting the recruitment of plants, the disruption in the interactions compromises the services provided by plants, such as food, medicines, fiber, cultural relationships, and the maintenance of genetic diversity in ecosystems (see Nascimento et al. 2012; Egerer et al. 2018; Jacob et al. 2022). There may be, for example, an important impact on the carbon cycle. Tropical forests store about 60% of the global forest carbon (Dixon et al. 1994) and up to 90% of woody plants in these forests are dispersed by animals (Howe and Smallwood 1982). Therefore, the decline in seed dispersal can generate major environmental and economic impacts associated with carbon sequestration (Bello et al. 2021). These pressures prompt a rapid evolutionary selection of strategies such as the production of smaller seeds to favor the ingestion by smaller birds, as observed in populations of *Euterpe edulis* (Galetti et al. 2013). However, although the morphological barrier (ingestion capacity and seed size) can be circumvented, other variables related to the body mass of birds are affected. Smaller birds feed more frequently (according to metabolic scaling laws) (Brown et al. 2004), but the retention time in the digestive tract is shorter, what means that the ingested seeds are released in smaller quantities and their spatial distribution can also be more restricted, that is, smaller sizes and biomass of birds directly compromises the variables involved in the success of the dispersal (Jordano 2000).

The distance between the functional extremes can be mitigated by the action of medium-sized birds. In our study, we draw attention to species of the Turdidae, Corvidae, and Tyrannidae families, which composed modules in the two networks. These birds are resilient, able to fly over large degraded areas (LBS, personal observation), and may act to connect the networks. Another important group is the one of Psittacidae birds (parrots, parakeets, cockatoos, lorikeets, and macaws). These birds are traditionally regarded as

seed predators (Sick 1997; Trivedi et al. 2004), but some studies have recently demonstrated their importance in seed dispersal (Silva et al. 2021b; Silva 2022). In the conserved area studied here, we observed a strong relationship between *Ara ararauna* and the fruits of *Acrocomia aculeata*. Interactions of this type deserve greater attention, since they involve large diaspores (e.g. *A. aculeata*, 50 mm) that depend on large animals to be dispersed, and these dispersers are the first to disappear from habitats impacted by human activities, as previously remarked (Silva and Tabarelli 2000; Dirzo et al. 2014). Birds of the family Psittacidae are able to act in this niche by transporting the fruits in the beak to feed on the pulp in places far from the parent plant, where they discard the intact seeds, performing a type of dispersal known as stomatochory (see Silva et al. 2021b; Silva 2022).

Understanding how the interactions between plants and their dispersers are organized and the impacts of fragmentation on this organization is of paramount importance. Human-induced environmental changes are not likely to cease because a large part of the world's population lives in conservation hotspots (Cincotta et al., 2000). Environmental fragmentation can suppress seed dispersal of many plant species and, in Cerrado, this mutualistic relationship is fundamental to their conservation. Here, we provide empirical evidence of the occurrence of functional homogenization of bird-diaspore mutualistic interactions on a regional scale in Cerrado. In an economic system based on profit and wealth accumulation, presenting the processes of seed dispersal by animals from the perspective of an ecosystem service of major economic importance can help in the development of conservation and restoration policies. In this sense, the comparison of the functional role of dispersing birds among areas with different conservation states can also be used as a model for understanding the economic and environmental impacts caused by the loss of species.

Acknowledgments

The authors thank Mr. Messias Periz and Mrs. Cida for their hospitality and for the help provided during the fieldwork, Agricert Agro Mercantil Ltda for the logistical support, and the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (capes) for the financial support in the form of a doctoral scholarship for the first author.

References

- Almeida-Neto M, Ulrich W (2011) A straightforward computational approach for measuring nestedness using quantitative matrices. *Environ Model Softw* 26:173–178
- Altmann J (1974). Observational study of behavior: sampling methods. *Behaviour* 49:227-266
- Bello C, Culot L, Agudelo CAR, Galetti M (2021) Valuing the economic impacts of seed dispersal loss on voluntary carbon markets. *Ecosyst Serv* 52:101362. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101362>
- Blüthgen N, Menzel F, Blüthgen N (2006) Measuring specialization in species interaction networks. *BMC Ecology* 6:1-12
- Brown JH, Gilloody JF, Allen AP, Savage VM, West GB (2004) Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology* 85:1771-1789. <https://doi.org/10.1890/03-9000>
- Carlo TA, Camargo PHSA, Pizo MA (2022) Functional ecology of neotropical frugivorous birds. *Ornithol Res* 30:139-154. <https://doi.org/10.1007/s43388-022-00093-2>
- Chacoff NP, Vázquez DP, Lomáscolo SB, Stevani EL, Dorado J, Padrón B (2012) Evaluating sampling completeness in a desert plant-pollination network. *J Anim Ecol* 81: 190-200
- Chao A (1984) Nonparametric estimation of the number of classes in a population. *Scand J Stat* 11:265-270
- Cincotta RP, Wisniewski J, Engelman R (2000) Human population in the biodiversity hotspots. *Nature* 404:990-992
- Cintra R (2014) *Aves do pantanal*. Editora INPA, Manaus
- Corral A, Valério LM, Cheung KC, Ferreira BHS, Guerra A, Szabo JK, Reis LK (2020) Plant-bird mutualistic interactions can contribute to the regeneration of forest and non-forest urban patches in the Brazilian Cerrado. *Urban Ecosyst* 24:205-213. <http://dx.doi.org/10.1007/s11252-020-01029-8>

Dirzo R, Young HS, Galetti M, Ceballos G, Isaac NJ, Collen B (2014) Defaunation in the Anthropocene. *Science* 345:401-406. <https://doi.org/10.1126/science.1251817>

Dixon RK, Solomon AM, Brown S, Houghton RA, Trexler MC, Wisniewski J (1994) Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263:185-190 <https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>

Dormann CF, Frund J, Blüthgen N (2022) Package bipartite: Visualising Bipartite Networks and Calculating Some (Ecological) Indices. R package version 2.16

Egerer MH, Fricke EC, Rogers H (2018) Seed dispersal as an ecosystem service: frugivore loss leads to decline of a socially valued plant, *Capsicum frutescens*. *Ecol Appl* 28:655-667. <https://doi.org/10.1002/eap.1667>

Fleming TH, Kress WJ (2013) The ornaments of life: coevolution and conservation in the tropics. University of Chicago Press, Chicago, IL, USA

Fuzessy L, Sobral G, Carreira D, Rother DC, Barbosa G, Landis M, Galetti M, Dallas T, Cláudio VC, Culot L, Jordano P (2022) Functional roles of frugivores and plants shape hyper-diverse mutualistic interactions under two antagonistic conservation scenarios. *Biotropica* 54:444-454. <https://doi.org/10.1111/btp.13065>

Galetti M, Guevara R, Côrtes MC, Fadini R, Matter SV, Leite AB, Labacca F, Ribeiro T, Carvalho CS (2013) Functional extinction of birds drives rapid evolutionary changes in seed size. *Science* 340:1086-1090. <https://doi.org/10.1126/science.1233774>

Gottsberger G, Silberbauer-Gottsberger, I (2018) How are pollination and seed dispersal modes in Cerrado related to stratification? Trends in a Cerrado *sensu stricto* woodland in southeastern Brazil, and a comparison with Neotropical forest. *Acta Bot Bras* 32: 434-445. <https://doi.org/10.1590/0102-33062018abb0186>

Gwynne JA, Ridgely RS, Argel M, Tudor G (2010) Guia Aves do Brasil: Pantanal e Cerrado. Editora Horizonte, São Paulo

Howe HF, Smallwood J (1982) Ecology of seed dispersal. *Ann Rev Ecol Syst* 13:201-228

Jacob MCM, Silva-Maia JK, Albuquerque UP, Pereira FO (2022) Culture matters: a systematic review of antioxidant potential of tree legumes in the semiarid region of Brazil and local processing techniques as a drive of bioaccessibility. *Plos One* 17:e0264950. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264950>

Janzen DH (1970) Herbivores and the number of trees species in tropical forest. *Am Nat* 104: 501-528

Jordano P (2000) Fruits and frugivory. In: Fenner M (eds) *Seeds: the ecology of regeneration in plant communities*. CABI International, Wallingford

Klink CA, Machado BR (2005) Conservation of the Brazilian Cerrado. *Conserv Biol* 19:707-713. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x>

Kuhlmann M (2018) Frutos e sementes do Cerrado: espécies atrativas para fauna:, vol 1. Ipsis Gráfica e Editora, Brasília

Kuhlmann M (2018) Frutos e sementes do Cerrado: espécies atrativas para fauna:, vol 2. Ipsis Gráfica e Editora, Brasília

Kuhlmann M, Ribeiro JP (2016) Fruits and frugivores of the Brazilian Cerrado: ecological and phylogenetic considerations. *Acta Bot. Bras* 30:495-507. <https://doi.org/10.1590/0102-33062016abb0192>

Levey DJ, Silva WR, Galetti M (2002) Seed dispersal and frugivory: ecology, evolution and conservation. CABI International, Wallingford

Lôbo D, Leão T, Melo FP, Santos AM, Tabarelli M (2011) Forest fragmentation drives Atlantic forest of northeastern Brazil to biotic homogenization. *Diversity Distrib* 17:287-296. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00739.x>

Martín González AM, Dalsgaard B, Nogué-Bravo D, Graham CH et al. (2015) The macroecology of phylogenetically structured hummingbird-plant networks. *Glob Ecol and Biogeogr* 24:1212–1224.

Maruyama PK, Melo C, Pascoal C, Vicente E, Cardoso JCF, Brito VLG, Oliveira PE (2019) What is on the menu for frugivorous birds in the Cerrado? Fruiting phenology and

nutritional traits highlight the importance of habitat complementarity. *Acta Bot Bras* 33: 572-583. <https://doi.org/10.1590/0102-33062019abb0221>

Mendonça RC, Felfili JM, Walter BMT, Silva JMC, Rezende AV, Filgueiras TS, Nogueira PE, Fagg CW (2008) Flora Vascular do Bioma Cerrado-Checklist com 12.356 espécies. In: Sano SM, Almeida SP, Ribeiro JF (eds) *Cerrado: ambiente e flora*. 2º vol. Embrapa, Planaltina, pp 421-443

Morante-Filho JC, Faria D (2017) An appraisal of bird-mediated ecological functions in a changing world. *Trop Conserv Sci* 10:1-10. <https://doi.org/10.1177/1940082917703339>

Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Da Fonseca GA, Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853

Nascimento VT, Vasconcelos MAS, Maciel MIS, Albuquerque UP (2012) Famine foods of Brazil's seasonal dry forest: ethnobotanical nutritional aspects. *Econ Bot* 66:22-34. <https://doi.org/10.1007/s12231-012-9187-2>

Olden JD (2006) Biotic homogenization: a new research agenda for conservation biogeography. *J Biogeogr* 33:2027-2039 <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01572.x>

Pacheco JF, Silveira LF, Aleixo A, Agne CA, Bencke GA, Bravo GA, Brito GRR, Conh-Haf M, Maurício GN, Naka LN, Olmos F, Posso SR, Lees AC, Figueiredo LFA, Carrano E, Guedes RC, Cesari E, Franz I, Schunk F, Piacentini VQ (2021). Annotated checklist of the birds of Brazil by the Brazilian Ornithological Records Committee-second edition. *Ornithol Res* 29:94-105. <https://doi.org/10.1007/s43388-021-00058-x>

Pizo MA, Fontanella AB, Carlo TA, Gonzáles-Castro A (2022) Abundance predominates over niche factors as determinant of the frequency of interactions between frugivorous birds and plants. *Biotropica* 54:627-634. <http://dx.doi.org/10.1111/btp.13076>

Pizo MA, Morales JM, Ovaskainen O, Carlo TA (2021) Frugivory specialization in birds and fruit chemistry structure mutualistic networks across the neotropics. *Am Nat* 197:236-249. <http://dx.doi.org/10.1086/712381>

Pizo MA, Tonetti VR (2020) Living in a fragmented world: Birds in the Atlantic Forest. *Condor* 122:duaa023. <https://doi.org/10.1093/condor/duaa023>

Purificação KN, Pascotto MC, F. Pedroni, J. M. N, Pereira, and N. A. Lima (2014) Interactions between frugivorous birds and plants in savanna and forest formations of the Cerrado. *Biota Neotrop* 14:e20140068. <https://doi.org/10.1590/1676-06032014006814>

Quintero E, Pizo MA, Jordano P (2020). Fruit resource provisioning for avian frugivores: the overlooked side of effectiveness in seed dispersal mutualisms. *J Ecol* 108:1358-1372. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13352>

R Development Core Team (2023) R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. www.r-project.org

Ratter JA, Ribeiro JF, Bridgewater S (1997) The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. *Ann Bot* 80:223-230

Sick H (1997) *Ornitologia brasileira*. Nova Fronteira, Rio de Janeiro

Silva JMC, Bates JM (2002) Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: a tropical savana hotspot. *Bioscience* 52:225-234. <https://doi.org/10.1641/0006-3568>

Silva JMC, Tabarelli M (2000) Tree species impoverishment and the future flora of the Atlantic forest of northeast Brazil. *Nature* 404:72-74

Silva JMC (1995) Birds of Cerrado Region, South America. *Steenstrupia* 21:69-92

Silva LB (2022) Teamwork: psittacids (Aves, Psittaciformes) disperse and help other birds disperse large diaspores. *Ornithol Res* 30: 247-252. <https://doi.org/10.1007/s43388-022-00106-0>

Silva LB, Silva JB, Souza CS, Menck GM, Sales MF, Castro CC (2021) Plant–animal interactions of understory species in an area of tropical rainforest, north-eastern Brazil. *Austral Ecol* 46:561–573. <https://doi.org/10.1111/aec.13004>

Silva LB, Pereira GA, Passos Filho PB, Almeida NM (2021) Seed dispersal of the palm *Acrocomia aculeata* by the blue-and-yellow macaw (*Ara ararauna*). *Braz J Biol* 83: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.244697>

Trivedi MR, Cornejo FH, Watkinson AR (2004) Seed predation on Brazil nuts (*Bertholletia excelsa*) by macaws (Psittacidae) in Madre de Dios, Peru. *Biotropica* 36: 118-122

Ulrich W, Almeida-Neto M (2012) On the meanings of nested ness: back to the basics. *Ecography* 35:865-871

Vinzentin-Bugoni J, Maruyama PK, Debastiani VJ, Duarte LDS, Dalsgaard B, Sazima M (2016) Influences of sampling effort on detected patterns and structuring processes of a Neotropical plant-hummingbird network. *J Anim Ecol* 85:262-272 <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12459>

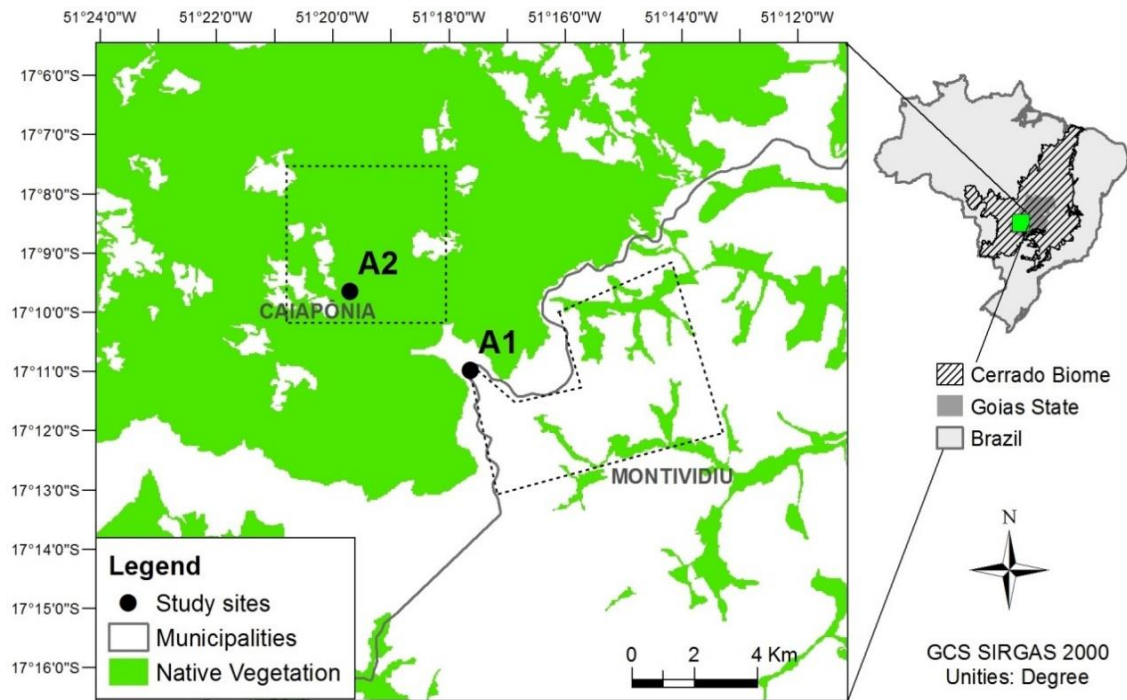


Figure 1. Fragmented area (A1) and conserved area (A2) of Cerrado in the districts of Montividiu and Caiapônia, Goiás, Midwest region of Brazil. The points represent the headquarters of the areas, and the dashed polygons represent the areas where the data were collected.

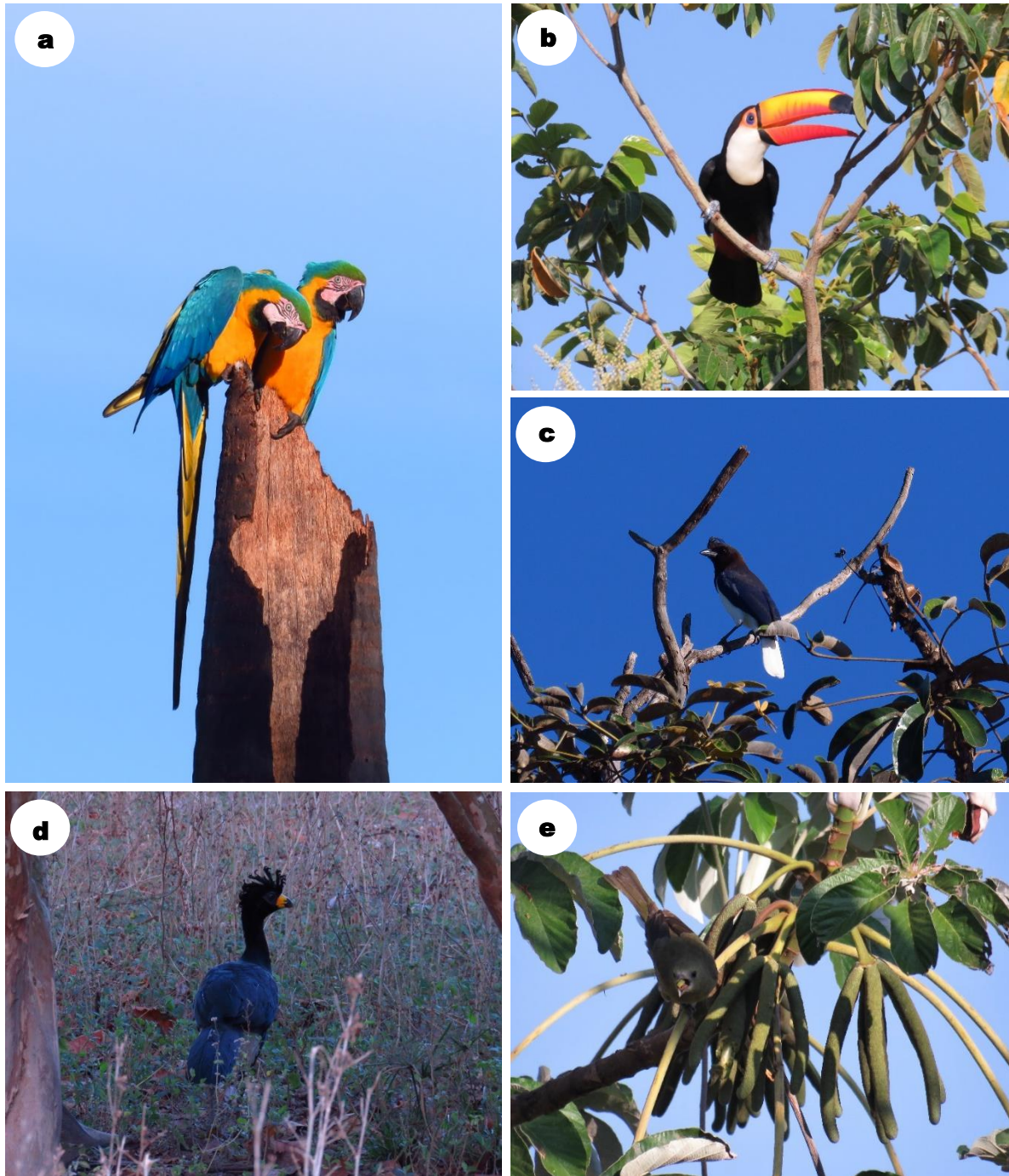


Figure 2. Seed-dispersing birds in areas of Cerrado in the state of Goiás, Midwest region of Brazil: **a** *Ara ararauna*, **b** *Ramphastos toco*, **c** *Cyanocorax cristatellus*, **d** *Crax fasciolata*, **e** *Thraupis palmarum* consuming the fruits of *Psychotria carthagenensis*. Photos: Leonardo B. da Silva

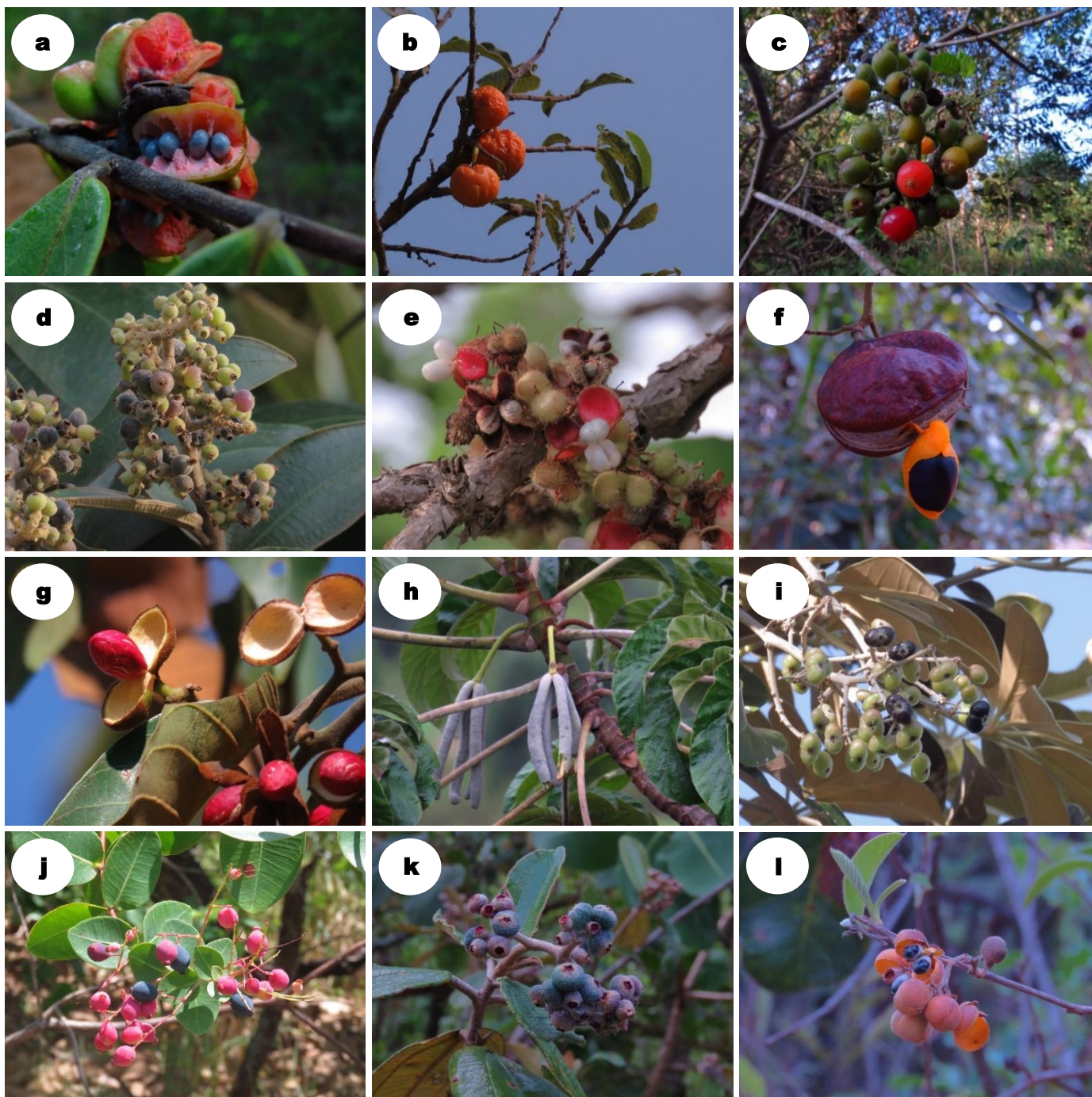


Figure 3. Woody plant species with bird-diaspore in areas of Cerrado in the state of Goiás, Midwest region of Brazil: **a** *Xylopia aromaica*, **b** *Brosimum gaudichaudii*, **c** *Psychotria carthagenensis*, **d** *Miconia ferruginata*, **e** *Curatella americana*, **f** *Copaifera langsdorffii*, **g** *Virola sebifera*, **h** *Psychotria carthagenensis*, **i** *Scheffera macrocarpa*, **j** *Eugenia bimarginata*, **k** *Miconia albicans*, *Davilla elliptica*. Photos: Leonardo B. da Silva

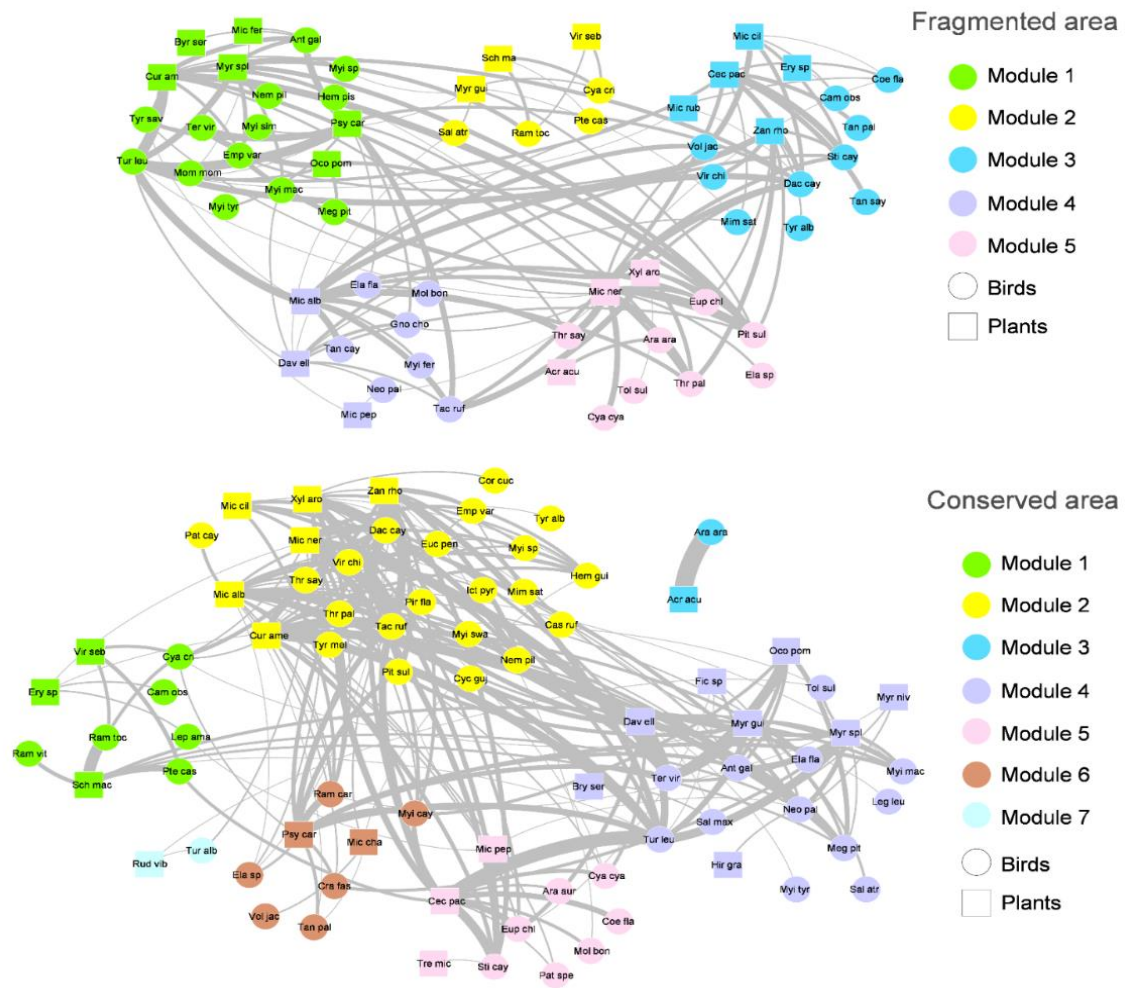


Figure 4. Bird-diaspore interaction networks in two areas of Cerrado, Goiás, Midwest region of Brazil. Modules are represented in different colors. Circles represent bird species, squares represent plant species, and the line thickness indicates the strength of the interaction between species.

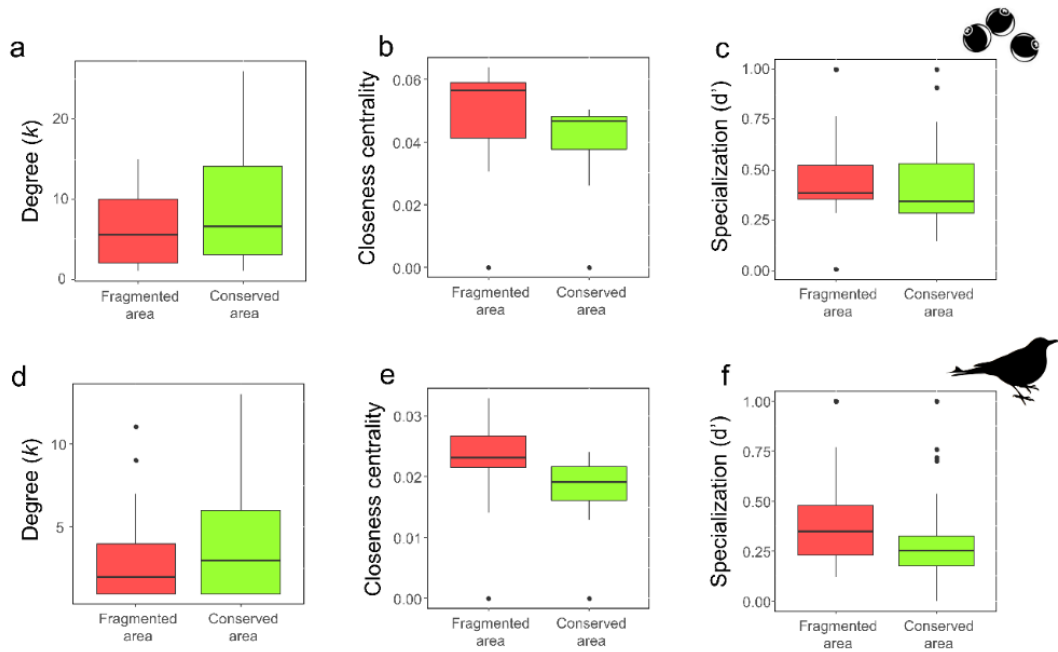


Figure 5. Degree (a), closeness centrality (b), and specialization (c) of bird-dispersed plant species and degree (d), closeness centrality (e), and specialization (f) of seed-dispersing bird species in two areas of Cerrado, Goiás, Midwest region of Brazil.

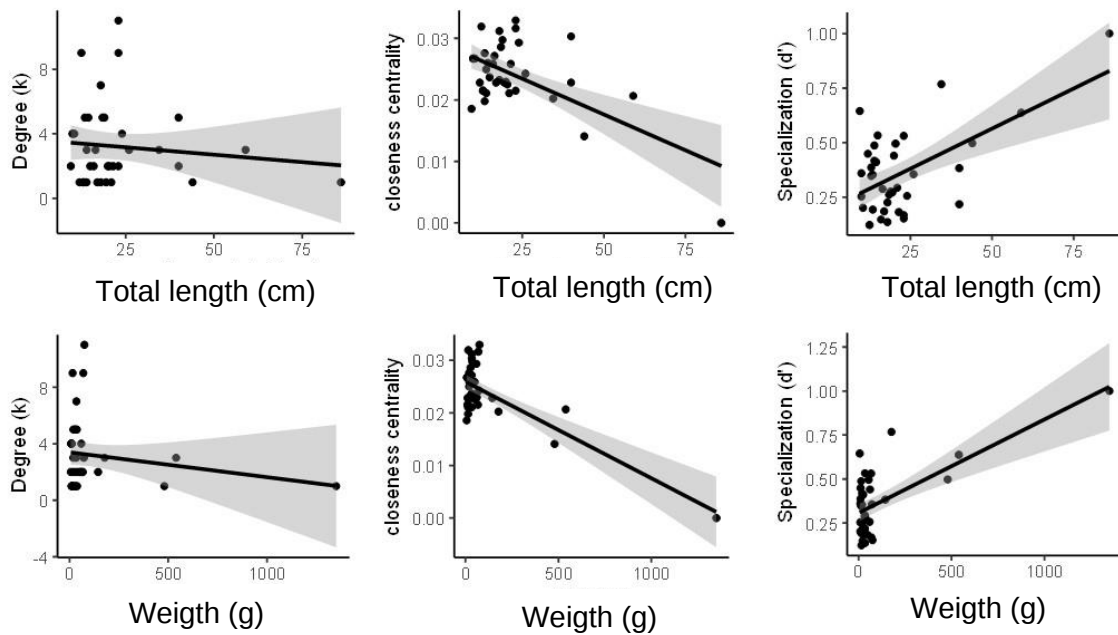


Figure 6. Degree (a), closeness centrality (b), and specialization (c) of traits (total length and weight) evaluated in seed-dispersing bird species in two areas of Cerrado, Goiás, Midwest region of Brazil.

Supplementary Material

Tab 1. Tab 1. Seed-dispersing bird guild in areas of Cerrado, Goiás, Midwest region of Brazil. A1 = Fragmented area; A2 = Conserved area; ID = Identification in the interaction network; No = Species not observed in the networks.

Taxon	A1	A2	ID Area network / Module
Tinamiformes			
Tinamidae			
<i>Crypturellus undulatus</i>	Yes	Yes	No
<i>Crypturellus parvirostris</i>	Yes	Yes	No
<i>Crypturellus tataupa</i>	Yes	Yes	No
Galliformes			
Cracidae			
<i>Penelope supercilialis</i>	Yes	Yes	No
<i>Crax fasciolata</i>	Yes	Yes	A2/6
Columbiformes			
Columbidae			
<i>Patagioenas speciosa</i>	No	Yes	No
<i>Patagioenas picazuro</i>	Yes	Yes	No
<i>Patagioenas cayennensis</i>	Yes	Yes	A2/2
<i>Leptotila verreauxi</i>	Yes	Yes	No
<i>Leptotila rufaxilla</i>	No	Yes	No
<i>Claravis pretiosa</i>	No	Yes	No
Cuculiformes			
Cuculidae			
<i>Piaya cayana</i>	Yes	Yes	No
Coraciiformes			
Momotidae			
<i>Baryphthengus ruficapillus</i>	No	Yes	No
<i>Momotus momota</i>	Yes	Yes	1/A1
Piciformes			
Ramphastidae			
<i>Ramphastos toco</i>	Yes	Yes	A1/1 – A2/2
<i>Ramphastos vitellinus</i>	Yes	Yes	A2/1
<i>Pteroglossus castanotis</i>	Yes	Yes	A2/1
Picidae			
<i>Melanerpes candidus</i>	Yes	Yes	No
<i>Celeus ochraceus</i>	No	Yes	No
<i>Colaptes melanochloros</i>	Yes	Yes	No
Falconiformes			
Falconidae			
<i>Caracara plancus</i>	Yes	Yes	No
<i>Milvago chimachima</i>	Yes	Yes	No
Psittaciformes			

Psittacidae

<i>Brotogeris chiriri</i>	Yes	Yes	No
<i>Aratinga auricapillus</i>	No	Yes	No
<i>Orthopsittaca manilatus</i>	Yes	No	No
<i>Primolius maracana</i>	No	Yes	No
<i>Ara ararauna</i>	Yes	Yes	A1/5 – A2/3
<i>Ara chloropterus</i>	Yes	Yes	No
<i>Diopsittaca nobilis</i>	Yes	Yes	No

Passeriformes**Pipridae**

<i>Neopelma pallescens</i>	Yes	Yes	A1/4 – A2/4
<i>Antilophia galeata</i>	Yes	Yes	A1/1 – A2/4
<i>Pipra fasciicauda</i>	Yes	No	No

Cotingidae

<i>Pyroderus scutatus</i>	No	Yes	No
---------------------------	----	-----	----

Tityridae

<i>Tityra cayana</i>	Yes	Yes	No
<i>Tityra semifasciata</i>	No	Yes	No
<i>Pachyrhamphus polychopterus</i>	Yes	Yes	No

Rhynchocyclidae

<i>Leptopogon amaurocephalus</i>	Yes	Yes	No
<i>Tolmomyias sulphureus</i>	Yes	Yes	A1/4 – A2/4
<i>Tolmomyias flaviventris</i>	No	Yes	No

Tyrannidae

<i>Camptostoma obsoletum</i>	Yes	Yes	A1/3 – A2/1
<i>Elaenia flavogaster</i>	Yes	Yes	A1/4 – A2/4
<i>Elaenia chilensis</i>	No	Yes	No
<i>Elaenia parvirostris</i>	No	Yes	No
<i>Elaenia mesoleuca</i>	No	Yes	No
<i>Elaenia cristata</i>	Yes	Yes	No
<i>Elaenia chiriquensis</i>	No	Yes	No
<i>Elaenia obscura</i>	No	Yes	No
<i>Suiriri suiriri</i>	No	Yes	No
<i>Phaeomyias murina</i>	Yes	Yes	No
<i>Legatus leucophaeus</i>	Yes	Yes	No
<i>Myiarchus swainsoni</i>	No	Yes	A2/2
<i>Myiarchus ferox</i>	Yes	Yes	A1/ 4
<i>Myiarchus tyrannulus</i>	Yes	Yes	A1/1 – A2/4
<i>Sirystes sibilator</i>	No	Yes	No
<i>Pitangus sulphuratus</i>	Yes	Yes	A1/5 – A2/2
<i>Myiodynastes maculatus</i>	Yes	Yes	A1/1 – A2/4
<i>Tyrannopsis sulphurea</i>	Yes	No	No
<i>Megarynchus pitangua</i>	Yes	Yes	A1/1 – A2/4
<i>Myiozetetes cayanensis</i>	Yes	Yes	A2/6
<i>Myiozetetes similis</i>	Yes	Yes	No
<i>Tyrannus albogularis</i>	Yes	Yes	A1/3 – A2/2
<i>Tyrannus melancholicus</i>	Yes	Yes	A2/2
<i>Tyrannus savana</i>	Yes	No	A1/1
<i>Empidonomus varius</i>	Yes	Yes	A1/1 – A2/2
<i>Sublegatus modestus</i>	Yes	Yes	No

Vireonidae			
<i>Cyclarhis gujanensis</i>	Yes	Yes	A2/2
<i>Vireo chivi</i>	Yes	Yes	A1/3 – A2/2
Corvidae			
<i>Cyanocorax cristatellus</i>	Yes	Yes	A1/2 – A2/1
<i>Cyanocorax cyanopogon</i>	Yes	Yes	No
Turdidae			
<i>Turdus leucomelas</i>	Yes	Yes	A1/1 – A2/4
<i>Turdus amaurochalinus</i>	Yes	Yes	No
<i>Turdus subalaris</i>	No	Yes	No
<i>Turdus albicollis</i>	No	Yes	A2/7
Mimidae			
<i>Mimus saturninus</i>	Yes	Yes	A1/3 – A2/2
Fringillidae			
<i>Euphonia chlorotica</i>	Yes	Yes	A1/5 – A2/5
<i>Euphonia lanirostris</i>	No	Yes	No
Passerillidae			
<i>Arremon taciturnus</i>	Yes	Yes	No
Icteridae			
<i>Psarocolius decumanus</i>	No	Yes	No
<i>Icterus pyrrhopterus</i>	Yes	Yes	A2/2
<i>Molothrus rufoaxillaris</i>	Yes	Yes	No
<i>Molothrus bonariensis</i>	Yes	Yes	No
<i>Gnorimopsar chopi</i>	Yes	Yes	A1/4
<i>Agelaioides badius</i>	Yes	No	No
Parulidae			
<i>Setophaga pitiaiyumi</i>	No	Yes	No
Cardinalidae			
<i>Piranga flava</i>	Yes	Yes	A2/2
Thraupidae			
<i>Nemosia pileata</i>	Yes	Yes	A1/1 – A2/2
<i>Hemithraupis guira</i>	Yes	Yes	A2/2
<i>Tersina viridis</i>	Yes	Yes	A1/1
<i>Cyanerpes cyaneus</i>	Yes	Yes	A1/5 – A2/5
<i>Dacnis cayana</i>	Yes	Yes	A1/3 – A2/2
<i>Saltatricula atricollis</i>	Yes	Yes	A1/2 – A2/4
<i>Saltator maximus</i>	Yes	Yes	A2/4
<i>Saltator similis</i>	Yes	Yes	No
<i>Coereba flaveola</i>	Yes	Yes	A1/3 – A2/5
<i>Volatinia jacarina</i>	Yes	Yes	A1/3 – A2/6
<i>Eucometis penicillata</i>	Yes	Yes	A2/2
<i>Coryphospingus cucullatus</i>	Yes	Yes	A2/2
<i>Tachyphonus rufus</i>	Yes	Yes	A1/4 – A2/2
<i>Ramphocelus carbo</i>	No	Yes	A2/6
<i>Thraupis sayaca</i>	Yes	Yes	A1/3 – A2/2
<i>Thraupis palmarum</i>	Yes	Yes	A1/3 – A2/2
<i>Stilpnia cayana</i>	Yes	Yes	A1/3 – A2/5

Tab 2. Bird-dispersed species in areas of Cerrado, Goiás, Midwest region of Brazil. A1 = Fragmented area; A2 = Conserved area; ID = Identification in the interaction network; No = Species not observed in the networks.

Family/species	Diaspore size (mm)	A1	A2	ID Area network / Module
Anacardiaceae				
<i>Schinus terebinthifolia</i>	5	Yes	No	No
<i>Tapirira guianensis</i>	10	No	Yes	No
Annonaceae				
<i>Xylopia aromaica</i>	6,5	Yes	Yes	A1/5 – A2/2
Araliaceae				
<i>Scheffera calva</i>	10	No	Yes	No
<i>Scheffera macrocarpa</i>	15	Yes	Yes	A1/2 – A2/1
Areaceae				
<i>Acrocomia aculeata</i>	50	Yes	Yes	A1/5 – A2/3
<i>Euterpe edulis</i>	15	No	Yes	No
<i>Mauritia flexuosa</i>	50	Yes	Yes	No
Burseraceae				
<i>Protium heptaphyllum</i>	15	Yes	Yes	No
Cannabaceae				
<i>Trema micrantha</i>	5	No	Yes	A2/5
Chrysobalanaceae				
<i>Hirtella gracilipes</i>	17	No	Yes	A2/4
Combretaceae				
<i>Buchenavia tomentosa</i>	30	No	Yes	No
Connaraceae				
<i>Rourea induta</i>	10	Yes	Yes	No
Dilleniaceae				
<i>Curatella americana</i>	5	Yes	Yes	A1/1 – A2/2
<i>Davilla elliptica</i>	5	Yes	Yes	A1/4 – A2/4
Euphorbiaceae				
<i>Alchornea glandulosa</i>	5	Yes	Yes	No
Erythroxylaceae				
<i>Erythroxylum campestris</i>	10	No	Yes	A2/1
<i>Erythroxylum daphnites</i>	10	Yes	Yes	No
<i>Erythroxylum suberosum</i>	10	No	Yes	No
Fabaceae				
<i>Copaifera langsdorffii</i>	15	Yes	Yes	No
Hypericaceae				
<i>Vismia gracilis</i>	15	Yes	Yes	No
Lauraceae				
<i>Ocotea pomaderroides</i>	10	No	Yes	A2/4
<i>Ocotea aciphylla</i>	25	No	Yes	No
Malpighiaceae				
<i>Byrsonima basiloba</i>	25	Yes	Yes	No
<i>Byrsonima coccolobifolia</i>	10	Yes	Yes	No
<i>Byrsonima sericea</i>	10	Yes	Yes	A1/1 – A2/4

Malvaceae				
<i>Sterculia apetala</i>	35	No	Yes	No
<i>Sterculia striata</i>	25	No	Yes	No
Melastomataceae				
<i>Miconia albicans</i>	10	Yes	Yes	A1/4 – A2/2
<i>Miconia chamissois</i>	7	No	Yes	A2/6
<i>Miconia ciliata</i>	5	Yes	Yes	A1/3 – A2/2
<i>Miconia elegans</i>	6	Yes	Yes	No
<i>Miconia fallax</i>	10	Yes	Yes	No
<i>Miconia ferruginata</i>	8	Yes	Yes	A1/1
<i>Miconia nervosa</i>	10	Yes	Yes	A1/5 – A2/2
<i>Miconia rubiginosa</i>	5	Yes	Yes	No
<i>Miconia pepericarpa</i>	5	Yes	Yes	A2/5
Moraceae				
<i>Brosimum gaudichaudii</i>	30	Yes	Yes	No
<i>Ficus</i> sp 1	15	No	Yes	No
<i>Ficus</i> sp 2	15	Yes	Yes	No
Myristicaceae				
<i>Virola sebifera</i>	15	Yes	Yes	A1/2 – A2/1
Myrtaceae				
<i>Eugenia bimarginata</i>	15	Yes	Yes	No
<i>Eugenia involucrata</i>	25	Yes	Yes	No
<i>Myrcia fenzliana</i>	8	No	Yes	No
<i>Myrcia guianensis</i>	10	Yes	Yes	A1/2 – A2/4
<i>Myrcia nivea</i>	10	Yes	Yes	A2/4
<i>Myrcia splendens</i>	10	Yes	Yes	A1/1 – A2/4
<i>Myrcia tomentosa</i>	8	No	Yes	No
<i>Psidium</i> sp 1	30	Yes	Yes	No
<i>Psidium</i> sp 2	20	Yes	Yes	No
<i>Siphoneugena densiflora</i>	10	No	Yes	No
Ochnaceae				
<i>Ouratea castaneifolia</i>	10	No	Yes	No
<i>Ouratea hexasperma</i>	10	Yes	Yes	No
Primulaceae				
<i>Myrsine coriacea</i>	4	Yes	No	No
Rubiaceae				
<i>Chomelia obtusa</i>	10	No	Yes	No
<i>Chomelia pohliana</i>	10	No	Yes	No
<i>Cordia concolor</i>	10	No	Yes	No
<i>Guettarda viburnoides</i>	17	No	Yes	No
<i>Palicourea rigida</i>	8	Yes	Yes	No
<i>Psychotria carthagenensis</i>	8	Yes	Yes	A1/1 – A2/6
<i>Rudgea viburnoides</i>	10	Yes	Yes	A2/7
Rutaceae				
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	3	Yes	Yes	A1/3 – A2/2
Sapindaceae				
<i>Allophylus sericeus</i>	10	Yes	Yes	No
<i>Matayba guianensis</i>	10	Yes	Yes	No
Sapotaceae				
<i>Micropholis venulosa</i>	15	No	Yes	No

<i>Pouteria gardneri</i>	26	No	Yes	No
Simaroubaceae				
<i>Simarouba versicolor</i>	15	Yes	Yes	No
Siparunaceae				
<i>Siparuna guianensis</i>	4	Yes	Yes	No
Urticaceae				
<i>Cecropia pachystachya</i>	3	Yes	Yes	A1/3 – A2/5

CAPÍTULO 2

(Manuscrito a ser submetido *Functional Ecology*)



DISPERSÃO SOB MEDIDA: INTERAÇÕES AVES-DIÁSPOROS EM UM FRAGMENTO DE MATA ATLÂNTICA NO NORDESTE DO BRASIL

Dispersão sob medida: interações aves-diásporos em um fragmento de Mata Atlântica no Nordeste do Brasil

Leonardo Barbosa da Silva^{1,*}, Raphael Matias da Silva², Jefferson Thiago Souza³, Cibele Cardoso de Castro^{1,4}, Natan Messias de Almeida^{1,5}

1-Departamento de Biologia, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade, Laboratório de Ecologia Reprodutiva de Angiospermas, Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Recife, PE, Brasil

2-Universidade Federal de Jataí, Jataí, GO, Brasil

3-Universidade Estadual do Ceará-UECE, Iguatu, CE, Brasil

4-Universidade Federal do Agreste de Pernambuco-UFAPE, Garanhuns, PE, Brasil

5-Universidade Estadual de Alagoas-UNEAL, Palmeira dos Índios, AL, Brasil

*Corresponding author. Email: lb_silva@yahoo.com.br

RESUMO

1. A Mata Atlântica é uma das formações florestais mais biodiversas do planeta, e ao longo da sua distribuição possui diferentes áreas de concentração de espécies endêmicas. Por outro lado, historicamente vem sofrendo uma grande pressão antrópica, sendo considerada uma área prioritária para a conservação da biodiversidade no planeta.
2. Compreender os processos ecológicos envolvidos na manutenção da Mata Atlântica é fundamental para a sua conservação e recuperação natural. Sendo assim, o estudo teve como objetivo analisar o processo de dispersão de sementes por aves em um fragmento de Mata Atlântica no Centro de Endemismo Pernambuco.
3. Utilizamos as seguintes abordagens: levantamento das espécies de aves potencialmente dispersoras de sementes; levantamento das plantas lenhosas com diásporos ornitocóricos; acompanhamento das interações aves-diásporos; correlação entre o tamanho dos diásporos e a largura de bico das aves (capacidade de ingestão).
4. Encontramos uma rede de interação com uma modularidade considerável, onde as variáveis largura de bico e tamanho de diásporos são fundamentais para a especialização das espécies, entretanto se tornam uma barreira para a ocorrência das interações.
5. Nossos resultados sugerem que em ambientes fragmentados da Mata Atlântica, as espécies vegetais que produzem diásporos grandes e dependem das aves para a dispersão apresentam uma menor resiliência dispersiva.

Palavras-chave: Centro de Endemismo Pernambuco, Dispersão de sementes, Ecologia de aves, Fragmentação ambiental, *Hotspots*, Redes ecológicas

INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é a segunda maior floresta tropical úmida da América do Sul, com aproximadamente 95% da sua cobertura original ocorrendo na costa atlântica do Brasil (cerca de 17% da área total do país), o restante na Argentina e no Paraguai (Silva et al., 2004; Joly et al., 2014). É uma das florestas mais biodiversas do planeta, com um elevado número de espécies endêmicas (Myers et al., 2000). Essa grande diversificação da fauna e da flora é consequência de uma história evolutiva complexa, caracterizada pela ação conjunta de diferentes processos climáticos e geológicos (e.g. faixa latitudinal de cerca de 25 graus, grande variação altitudinal de 0 a 1700 m, atividades neotectônicas e barreiras fluviais) (ver Marques & Grelle 2021). Esses processos influenciaram diretamente a formação de tipos distintos de vegetação, bem como, a distribuição das espécies. Com isso, a Mata Atlântica brasileira possui diferentes áreas de concentração de espécies endêmicas, os centros de endemismo (Serra do Mar, Central Bahia, Costa da Bahia e o Centro Pernambuco) (Silva et al., 2004).

O Centro de Endemismo Pernambuco (CEP) corresponde a porção da floresta que ocorre ao norte do Rio São Francisco, nos estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, região nordeste. O CPE é conhecido como uma importante área de endemismo para as aves (Silva et al., 2004). Possui 435 espécies registradas (cerca de 2/3 das aves registradas em toda a Mata Atlântica brasileira), sendo 26 endêmicas (Roda et al., 2011; Pereira et al., 2014; 2016). Essas aves são responsáveis pela realização de diferentes serviços ecossistêmicos, entre eles, a dispersão de sementes, que é fundamental para a manutenção das florestas tropicais (Levey et al., 2002; Fleming & Kress 2013). As pressões coevolutivas que moldam as relações entre aves e diásporos são responsáveis pela grande diversidade de tipos, cores, formatos e tamanhos dos frutos e sementes (Fleming & Kress 2013). O tamanho é uma característica determinante para o sucesso da dispersão, pois ele restringe a atuação das aves dispersoras, ou seja, plantas que produzem diásporos grandes dependem de espécies capazes de ingeri-los (com uma largura de bico grande) (Silva & Tabarelli 2000).

A manutenção da Mata Atlântica está associada a essas interações ecológicas. Grande parte das espécies de árvores dependem das aves para dispersarem os seus diásporos e darem continuidade ao seu ciclo de vida (Silva & Tabarelli 2000; Pizo, 2004; Silva et al., 2013). Entretanto, a área de distribuição da Mata Atlântica tem uma forte

relação com a ocupação humana (Cincotta et al., 2000; Myers et al., 2000). Os impactos antrópicos vêm se intensificando desde a colonização europeia (cerca de 500 anos), onde estavam associados aos diferentes ciclos econômicos, como o corte seletivo de madeira (e.g. Pau-Brasil, *Paubrasilia echinata*), o desmatamento para a plantação de commodities agrícolas (e.g. cana-de-açúcar) e a expansão da pecuária (Dean, 1996). O resultado atual é uma paisagem extremamente fragmentada e intercalada por grandes centros urbanos (ver Silva & Tabarelli 2000; Tabarelli et al., 2006; Pereira et al., 2014; 2016). O CEP é a região mais degradada da Mata Atlântica brasileira, e detém muitas espécies de aves globalmente ameaçadas (Tabarelli et al., 2006; Pereira et al., 2014; 2016).

Além da fragmentação florestal, a caça seletiva e o comércio ilegal de animais silvestres são fatores que contribuem para a extinção local de aves dispersoras, criando um contexto de quebra de interações dispersivas, que pode acontecer através da incompatibilidade morfológica entre a capacidade de ingestão das aves (largura de bico) e o tamanho dos diásporos (Silva & Tabarelli 2000). Sendo assim, o estudo teve como objetivo analisar o processo de dispersão de sementes por aves na Reserva Biológica de Pedra Talhada, um fragmento de Mata Atlântica localizado no CEP. Para isso, utilizamos as seguintes abordagens: levantamento das espécies de aves potencialmente dispersoras de sementes (frugívoras e onívoras); levantamento das plantas lenhosas com diásporos ornitocóricos; acompanhamento das interações aves-diásporos; correlação entre o tamanho dos diásporos e a largura de bico das aves (capacidade de ingestão). Hipotetizamos que as espécies que produzem diásporos maiores apresentam uma menor redundância dispersiva.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado na Reserva Biológica de Pedra Talhada (Rebio de Pedra Talhada), um fragmento de Mata Atlântica localizado entre as coordenadas 36°22' à 36°28' O e 9°11' à 9°16' S. A Reserva de Pedra Talhada possui cerca de 4.500 ha e abrange os municípios de Quebrangulo e Chã Preta no estado de Alagoas e Lagoa do Ouro no estado de Pernambuco, região nordeste do Brasil (Figura 1). O relevo é acidentado, com altitude variando entre 459 m e 883 m. O clima da região é caracterizado como tropical úmido, com duas estações bem definidas: o verão (seca) de outubro a abril e o inverno (chuvoso)

de maio a setembro. A média pluviométrica é de 1.275 mm/ano e a temperatura média é de 25 °C (Stduder et al., 2015).

Aves dispersoras

Entre janeiro de 2020 e abril de 2021, realizamos 10 expedições a campo com duração de seis dias cada. Estabelecemos dois transectos com cerca de 8 Km de extensão. Para registrar as aves realizamos sessões de observação visual direta (ad libitum) (Altman 1974) entre às 5 h e 10 h, totalizando 60 h. Utilizamos binóculos com magnitudes de 8 x 32 mm e câmeras fotográficas. As aves também foram identificadas por meio das suas vocalizações.

Largura de bico

Mensuramos a largura de bico de todas as espécies que compuseram a guilda dispersora. Os dados foram obtidos na coleção ornitológica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e em pesquisas de campo realizadas na região nordeste, onde as aves foram capturadas em rede de neblina (malha 16 mm). As informações foram coletadas com um paquímetro digital (precisão de 0.01 mm) (Figura 2).

Espécies vegetais

Durante cada expedição, verificamos a ocorrência de espécies lenhosas com diásporos ornitocóricos (frutos ou sementes com atributos atrativos às aves). Amostras em estágio fértil (com flores e/ou frutos) de todas as espécies encontradas nos dois transectos (cerca de 8 km cada) foram coletadas, herborizadas e em seguida identificadas com a ajuda de especialistas da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Georreferenciamos 10 indivíduos de cada espécie (com distância mínima entre si de 15 metros) para a coleta de diásporos (10 em cada indivíduo). Os diásporos foram mensurados (comprimento e largura) com paquímetro digital (precisão de 0.01 mm).

Frugivoria e dispersão de sementes

Selecionamos 17 espécies (*Thyrsodium spruceanum*, *Maytenus obtusifolia*, *Erythroxylum squamatum*, *Vitex polygama*, *Cinnamomum triplinerve*, *Byrsonima sericea*, *Miconia centrodesma*, *Miconia minutiflora*, *Ficus* sp., *Eugenia* sp., *Myrcia guianensis*, *Myrcia*

splendens, *Myrcia tomentosa*, *Guapira opposita*, *Ziziphus cotinifolia*, *Casearia sylvestris*, *Cupania oblongifolia*) e realizamos sessões de observação visual direta (*ad libitum*) (Altmann, 1974) pela manhã entre às 5 h e 10 h, totalizando 136 h (8 h de observação para cada espécie). Para acompanhar os detalhes das interações utilizamos binóculos com magnitudes de 8 x 32 mm, e para documentar os registros utilizamos câmeras fotográficas. Consideramos como sendo uma visita, o período em que as aves chegavam e iniciavam o forrageamento até deixarem a planta ou saírem do campo de visão. Contabilizamos o número de visitas de cada espécie e a quantidade de diásporos consumidos por visita.

Análise de rede de interações

A estrutura da rede de interação aves-diásporos foi caracterizada usando três métricas: aninhamento, modularidade e grau de especialização das espécies. Os dados foram organizados em uma matriz de frequência de interação, em que as linhas representaram as espécies de aves frugívoras e as colunas representaram as espécies de plantas ornitocóricas. Os valores das células indicaram a frequência de interação, considerando o número de frutos consumidos por cada espécie de frugívoro em cada espécie de planta. Assim, células com valor zero indicaram ausência de interação. O aninhamento descreve o padrão das interações na rede, ou seja, se as espécies especialistas interagem com um subconjunto de espécies que interagem com as generalistas (Ulrich e Almeida-Neto 2012). O aninhamento da rede estudada foi calculado usando a métrica "wNODF" (Almeida-Neto & Ulrich 2011), com o pacote "bipartite 2.18" (Dormann et al., 2022) no R. O valor de "wNODF" varia de 0 a 100, sendo que 100 indica uma rede perfeitamente aninhada (Almeida-Neto & Ulrich 2011). Para testar o nível de significância do aninhamento, um modelo nulo foi realizado com 1000 randomizações, sendo o aninhamento da rede estudada comparado com o do modelo nulo. Essa análise foi realizada usando a função "nullmodel" e o algoritmo "r2dtable" do pacote "bipartite" (Dormann & Strauss 2014). O modelo nulo reorganiza as interações na matriz, mantendo as dimensões e o número de interações da rede observada (Almeida-Neto et al., 2008).

A modularidade analisa o grau em que as interações são organizadas em módulos ou grupos. A modularidade quantitativa da rede estudada foi estimada usando o algoritmo "QuanBiMo" (Dormann & Strauss 2014), utilizando a função "computeModules" no pacote "bipartite". Esse algoritmo detecta a presença de módulos em redes bipartidas

ponderadas com base em uma representação hierárquica das frequências das interações e alocação ideal das espécies em módulos (Dormann & Strauss 2014). Desta forma, a análise mede se a rede está organizada de forma que existem grupos de interação (módulos) com mais interações dentro de um módulo do que entre módulos (Martín Gonzalez et al. 2015). O valor absoluto da modularidade da rede foi analisado através do índice "modularity Q", que varia de 0 para redes com mínima compartimentalização a 1 para redes compostas de módulos perfeitos (Newman, 2004). Para testar o nível de significância da modularidade "Q", foi utilizada uma análise de modelo nulo em que foi comparada a modularidade observada na rede estudada contra a expectativa do modelo nulo com 1000 redes construídas aleatoriamente usando o algoritmo "r2dtable" (função "nullmodel"; pacote "bipartite"; Dormann & Strauss 2014).

Para avaliar se a largura do bico dos frugívoros foi uma característica determinante para explicar a formação dos módulos, foi realizado um modelo linear usando a função "lm" no R para testar se a largura média do bico das aves (variável resposta) variou entre os módulos (variável preditora). Após detectar significância no modelo linear, um teste post hoc foi realizado para calcular as diferenças significativas entre os diferentes módulos. Para isso, foi utilizada a função "lsmeans" com ajuste Dunn do pacote "emmeans" (Lenth et al., 2019) no R. Também foi analisada a dissimilaridade no tamanho dos frutos das espécies dos diferentes módulos com o método de escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS), usando a distância Euclidiana. Para isso, foi utilizada a função "metaMDS" do pacote "vegan" (Oksanen et al., 2019) no R. As medidas de média, mediana, desvio padrão e variância do comprimento e largura dos frutos de cada espécie foram utilizadas como dados de entrada da ordenação. Neste método, os pontos mais próximos entre si correspondem as espécies com tamanho de frutos mais semelhantes e os pontos mais afastados, as espécies com maior dissimilaridade. Em seguida, para verificar se houve diferenças significativas do tamanho dos frutos entre os módulos foi utilizada a função "envfit" com 999 permutações do pacote "vegan", que considera a distância Euclidiana dos centroides dos diferentes módulos. Para explorar a relação entre a largura do bico dos frugívoros e o comprimento dos frutos consumidos por eles, foi usado um modelo polinomial de segunda ordem com a função "lm" no R. O modelo polinomial se ajustou melhor aos dados do que modelos lineares e logarítmicos, comparados por meio dos valores F e do R^2 ajustado. O comprimento e a

largura dos frutos foram relacionados (Figura 1 Material Suplementar), por isso optou-se por usar apenas o comprimento como medida de tamanho dos frutos.

Foram calculadas duas medidas de especialização das espécies de plantas e aves dispersoras: grau de especialização das espécies (*degree*) e especialização complementar d' . O grau de especialização é uma medida qualitativa (Jordano et al. 2003), correspondendo o número de espécies às quais uma espécie interagiu, ou seja, número de frugívoros que consumiram os frutos de uma planta (grau da espécie vegetal), ou número de plantas consumidas por um frugívoro (grau da espécie de frugívoro). O grau é calculado com base em uma matriz de interação binária e, portanto, descreve a especialização de forma qualitativa. As espécies especialistas têm grau mais baixo do que os generalistas. Já a especialização complementar d' é um índice que leva em conta as frequências de interação de cada nó (Blüthgen et al., 2006). O índice determina o grau em que a especialização da interação de uma espécie pode diferir das expectativas do modelo nulo em que as espécies interagem com parceiros proporcionalmente à sua disponibilidade (Blüthgen et al. 2006). O índice d' varia de 0 (espécie altamente generalista) a 1 (espécie altamente especialista). Os valores de grau e d' foram obtidos usando a função “specieslevel” do pacote “bipartite” (Dormann, 2022) no R. Posteriormente, modelos lineares foram usados para testar se o grau e d' (variáveis respostas) estavam relacionados com a largura média do bico dos frugívoros (variável preditora). Também foi testado se o grau e d' estavam relacionados com o comprimento médio dos frutos. Os modelos lineares foram realizados usando a função “lm” no R.

Avaliamos a função desempenhada pelas diferentes espécies na manutenção da estrutura da rede, através do cálculo do grau dentro dos módulos (z) e da conectividade entre módulos (c) (Guimera et al., 2005). Os valores críticos de c e z propostos por Olesen et al. (2007) foram definidos para redes binárias e, portanto, adotados nesse estudo para atribuir um papel ecológico na rede para cada espécie da seguinte forma: periféricas, eixos de módulo, conectoras entre módulos e conectoras da meta rede. Espécies com valores $c \leq$ que 0,62 e $z \leq$ que 2,5 foram consideradas periféricas (*peripherals*) ou especialistas, ou seja, tinham apenas alguns links e quase sempre apenas com espécies dentro do seu módulo. As espécies com valores c e/ou z altos foram generalistas. Elas incluem eixos de módulo (*module hubs*), ou seja, espécies altamente conectadas com várias espécies dentro do seu módulo ($c \leq$ que 0,62, $z >$ que 2,5) ou conectoras entre módulos (*connectors*) que

se conectam com várias espécies em diferentes módulos ($c > \text{que } 0,62$, $z \leq \text{que } 2,5$). As espécies com valores $c > \text{que } 0,62$ e $z > \text{que } 2,5$ foram consideradas conectoras da meta rede ou super generalistas (*network hubs*). Os valores c e z foram calculados para cada espécie usando a função "czvalues" do pacote "bipartite". Todas as análises estatísticas foram realizadas usando o R, versão 4.3.1 (R Development Core Team, 2023).

RESULTADOS

A guilda de aves dispersoras foi composta por 71 espécies distribuídas em 6 ordens e 21 famílias. A Figura 3 mostra alguns representantes da guilda. A ordem Passeriformes apresentou o maior número de espécies (63 espécies), com destaque para as famílias Thraupidae (17), Tyrannidae (14) e Pipridae (4). Mensuramos a largura de bico em 353 espécimes (Tabela 1 Material Suplementar). Em relação a comunidade vegetal, encontramos 30 espécies com diásporos ornitocóricos em fase dispersiva, que foram distribuídas em 19 famílias. As mais representativas foram Myrtaceae (5), Sapindaceae (4) e Melastomataceae (3) (Tabela 2 Material Suplementar). Durante as sessões de observação focal das interações, registramos 48 espécies de aves (67,60% da guilda), que realizaram 501 visitas e removeram 935 diásporos no total.

A rede de interações apresentou baixo aninhamento (weighted NODF=19,50429). O valor médio do modelo nulo foi de 43,12 (mínimo 37,18; máximo 47,80). Portanto, a rede teve um aninhamento menor do que o esperado ao acaso ($p < 0,001$). A rede apresentou uma modularidade considerável ($Q = 0,3922143$). O valor médio do modelo nulo foi de 0,1286 (mínimo 0,1077; máximo 0,1544). Portanto, a rede teve uma modularidade maior do que o esperado ao acaso ($p < 0,001$). A rede foi composta por 4 módulos formados por pelo menos oito espécies de aves e duas espécies vegetais (Figura 4).

A largura de bico das aves foi uma característica determinante para a formação dos módulos na rede, uma vez que houve diferenças na largura do bico entre os módulos ($F = 17,33$; $p < 0,001$). Os módulos 1 e 3 foram formados por aves que possuem bicos de largura similar e que são significativamente mais largos do que os bicos das aves dos módulos 2 e 4, que não possuem diferenças significativas (Figura 5). Os módulos também apresentaram diferença significativa quanto ao tamanho dos diásporos ($R^2 = 0,5639$; $p < 0,005$). Similar ao encontrado para a largura do bico, diásporos dos módulos 1 e 3

possuem tamanhos similares, mas que são significativamente diferentes dos módulos 2 e 4, sendo os diásporos destes dois últimos módulos de tamanho estatisticamente similar (Figura 6). Encontramos uma relação significativamente positiva entre a largura de bico das aves e o comprimento dos diásporos consumidos por elas ($R^2 = 0,3315$; $F = 60, 118$; $df = 1$; $p < 0,001$) (Figura 7).

A largura de bico influencia significativamente e positivamente o nível de especialização das aves, mas não o grau (degree) (Figura 8). Para as plantas o tamanho dos diásporos influencia significativamente e negativamente o grau (degree) (Figura 8). Em relação ao papel das espécies na manutenção da estrutura da rede, a maioria delas, tanto de plantas quanto de aves, foram periféricas (Figura 9). As espécies que não foram periféricas foram conectoras entre módulos. As aves conectoras da rede foram *Turdus leucomelas*, *Turdus albicollis* e *Vireo chivi*. Já as plantas consideradas conectoras foram *Myrcia tomentosa* e *Myrcia splendens* (Figura 9).

DISCUSSÃO

Observamos que as interações possuem uma forte relação entre a largura de bico e o tamanho dos diásporos. Nossos resultados também indicam que as aves dispersoras de grande porte registradas na área podem estar em declínio populacional, levando em consideração a ausência das mesmas durante as observações das interações, bem como os impactos da fragmentação e da caça seletiva, atividade comum na área de estudo (Studer et al., 2015). A ausência dessas aves pode levar a extinção local das plantas com diásporos maiores (Silva & Tabarelli 2000). A análise de rede nos mostrou que as interações ocorrem em módulos, e que espécies mais resilientes podem ser importantes para a conservação da estrutura da rede, à medida que atuam conectando os módulos.

Em todo o planeta, as guildas de animais dispersores vêm sofrendo com o declínio populacional e com a extinção das espécies (Dirzo et al., 2014;). Na Mata Atlântica brasileira, a região nordeste é a porção mais degradada (Silva et al., 2004; Tabarelli et al., 2006). Os grupos de animais mais sensíveis a fragmentação, como as maiores aves frugívoras são as primeiras a serem extintas localmente (Silva & Tabarelli 2000; Galetti et al., 2013). No caso de espécies endêmicas, como o mutum-do-nordeste (*Pauxi mitu*, Cracidae), também representa a extinção das suas interações ecológicas (Silva & Tabarelli 2000). Apesar de termos registrado algumas espécies frugívoras de grande

porte, como os representantes das famílias Cracidae, Ramphastidae e Cotingidae, estas não foram observadas consumindo os diásporos. Com exceção de *Ortalis araucuam* (Cracidae), uma das espécies mais resilientes desses grupos (Sick, 1997).

A manutenção das redes depende diretamente da conservação das interações entre as espécies (Silva et al., 2021; Carvalho et al., 2023). Na rede observada, as interações foram separadas por módulos, que apresentaram uma forte relação entre a largura de bico e o tamanho dos diásporos. As aves que possuem as maiores largura de bico foram as mais especializadas. Resultado semelhante para as espécies vegetais, onde os diásporos maiores foram os mais especializados e apresentaram menos dispersores. Esses resultados dão suporte para a hipótese de que os diásporos maiores apresentam uma menor redundância funcional. Com isso, as espécies vegetais mais importantes para a conservação da rede são as espécies que produzem diásporos pequenos (≤ 10 mm). Esse desequilíbrio pode provocar em um curto intervalo de tempo uma grande diminuição da biodiversidade vegetal (Silva & Tabarelli 2000) e o consequente efeito em cascata nos ecossistemas (Lôbo et al., 2011; Carvalho et al., 2023).

Entre as aves registradas durante as observações das interações, destacamos as espécies das famílias Tyrannidae, Vireonidae e Turdidae, que apesar de serem aves de menor porte, possuem uma largura de bico relativamente grande e durante o forrageamento costumam engolir os diásporos inteiros (observações pessoais LBS). Essas aves também são resilientes e costumam ocorrer em ambientes alterados (Sick, 1997). Já as espécies da família Thraupidae, que foram a maioria em nosso estudo, no geral possuem uma largura de bico pequena, além do comportamento de “mastigar” os frutos antes de engolir, o que acaba separando as sementes da polpa (observações pessoais LBS; Parrini, 2015). Essas aves são importantes para a dispersão de pequenos frutos carnosos com muitas sementes, como os produzidos pelas espécies da família Melastomataceae (Silva et al., 2013; Parrini, 2015).

A conservação dos fragmentos florestais que compõem atualmente o CEP, principalmente os mais próximos geograficamente é uma boa estratégia para facilitar o deslocamento das aves (Tabarelli et al., 2006). A conexão entre os fragmentos pode representar a conexão entre as redes de interações e o fluxo gênico entre as espécies (Jordano et al., 2006). Nesse contexto, encontramos os fragmentos que compõem a Estação Ecológica de Murici, uma área de grande importância para a conservação da

biodiversidade do CEP (Tabarelli et al., 2006). Entretanto, boa parte das áreas florestais está localizada em propriedades privadas destinadas a produção de açúcar e álcool (Uchôa-Neto & Tabarelli 2003). Portanto, são necessárias ações políticas mais pontuais, como o incentivo a transformação dessas áreas em Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo suporte financeiro na forma de bolsa de doutorado para o primeiro autor, ao instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) por permitir a realização do estudo na área e a Nordeste Reflorestamento e Educação pelo apoio logístico.

REFERÊNCIAS

- Almeida-Neto, M., Guimarães, P., Guimarães, P. R Jr., Loyola, R. D., & Ulrich, W. (2008). A consistent metric for nestedness analysis in ecological systems: reconciling concept and measurement. *Oikos*, 117 (8) 1227–1239.
- Almeida-Neto, M., & Ulrich, W. (2011). A straightforward computational approach for measuring nestedness using quantitative matrices. *Environ Model Softw*, 26 (2) 173–178.
- Altmann, J. (1974). Observational study of behavior: sampling methods. *Behaviour*, 49 (3-4) 227-266.
- Blüthgen, N., Menzel, F., & Blüthgen, N. (2006). Measuring specialization in species interaction networks. *BMC Ecology*, 6 (1) 1-12.
- Carvalho, R. B., Malhi, Y., & Menor, I.O. (2023). Frugivory and seed dispersal in Cerrado: network structure and defaunation effects. *Biotropica*, 55 849-865.
- Cincotta, R. P., Wisniewski, J., & Engelman, R. (2000). Human population in the biodiversity hotspots. *Nature*, 404 (6781) 990-992.
- Dean, W. (1996). *A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica Brasileira*. São Paulo, Companhia das Letras. 484 p.

Dormann, C. F., & Strauss, R. (2014). A method for detecting modules in quantitative bipartite networks. *Methods in Ecology and Evolution*, 5 90–98.

Dormann, C. F. (2022). Package ‘bipartite’: Visualising Bipartite Networks and Calculating Some (Ecological) Indices. v2.8.

Dormann, C. F., Frund, J., & Blüthgen, N. (2022). Package bipartite: Visualising Bipartite Networks and Calculating Some (Ecological) Indices. *R package version 2.16*

Fleming, T. H., & Kress, W. J. (2013) The ornaments of life: coevolution and conservation in the tropics. University of Chicago Press, Chicago, IL, USA

Galetti, M., Guevara, R., Côrtes, M. C., Fadini, R., Matter, S. V., Leite, A. B., Labecca, F., Ribeiro, T., & Carvalho, C. S. (2013). Functional extinction of birds drives rapid evolutionary changes in seed size. *Science*, 340 (6136) 1086-1090.

Guimera, R., Mossa, S., Turtleschi, A., & Amaral, L. A. N. (2005). The worldwide air transportation network: anomalous centrality, community structure, and cities global roles. *Proceedings of the National Academy of Science*, 102 (22) 7794–7799.

Joly, C. A., Metzger, J. P., & Tabarelli, M. (2014). Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: Ecological findings and conservation initiatives. *New Phytologist*, 204 (3) 459-473.

Jordano, P., Galetti, M., Pizo, M. A., & Silva, W. R. (2006) Ligando frugivoria e dispersão de sementes à biologia da conservação. Pp. 411-436. In: Duarte, C.F.; Bergallo, H.G.; Alves, M.A.S.; Van Sluys, M. (ed.). *Biologia da Conservação: essências*. São Paulo, Editora Rima.

Lenth, R., Singman, H., Love, J., Buerkner, P., & Herve, M. (2019). emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means. R package version 1.4. Website: <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>

Lôbo, D., Leão, T., Melo, F. P., Santos, A. M., & Tabarelli, M. (2011) Forest fragmentation drives Atlantic forest of northeastern Brazil to biotic homogenization. *Diversity and Distributions*, 17 (2) 287-296.

- Marques, M. C., & Grelle, C. E. (2021). The Atlantic Forest. *History, Biodiversity, Threats and Opportunities of the Mega-diverse Forest*. Springer International Publishing
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403 (6772) 853-858.
- Newman, M. E. J. (2004). Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Physical Review E*, 69 (6) 066133.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H., Szoecs, E., & Wagner, H. (2019). *vegan: community ecology package*.
- Parrini, R. (2015). *Quatro estações – História natural das aves na Mata Atlântica: uma abordagem trófica*. Rio de Janeiro. Technical Books.
- Pereira, G. A., Dantas, S. M., Silveira, L. F., Roda, S. A., Albano, C., Sonntang, F. A., Leal, S., Periquito, M. C., Malacco, G. B., & Lees, A. C. (2014). Status of the globally threatened forest birds of northeast Brazil. *Papéis Avulsos de Zoologia*, 54 177-194.
- Pereira, G. A., Araújo, H. F. P., & Azevedo-Júnior, S. M. (2016). Distribution and conservation of three important bird groups of the Atlantic Forest in north-east Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 76 1004-1020.
- Pizo, M. A. (2004). Frugivory and habitat use by fruit-eating birds in a fragmented landscape of southeast Brazil. *Ornitologia Neotropical*, 15 117-126.
- R Development Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. www.r-project.org
- Roda, S. A., Pereira, G. A., & Albano, C. (2011) *Conservação de Aves Endêmicas e Ameaçadas do Centro de Endemismo Pernambuco*. Editora Universitária da UFPE, Recife.
- Sick, H. (1997) *Ornitologia brasileira*. Nova Fronteira, Rio de Janeiro

Silva, J. M. C., & Tabarelli, M. (2000). Tree species impoverishment and the future flora of the Atlantic forest of northeast Brazil. *Nature*, 404 (6773) 72-74.

Silva, J. M. C., Sousa, M. C., & Castelletti, C.H. (2004). Areas of endemism for passerine birds in the Atlantic Forest, South America. *Global Ecology and Biogeography*, 13 (1)85-92. 2004.

Silva, L. B., Leite, A. V. L., & Castro, C. C. (2013). Frugivoria por aves em *Miconia prasina* D.C. (Melastomataceae) em um fragmento de Mata Atlântica no nordeste do Brasil. *Atualidades Ornitológicas*, 174 4-7.

Silva, L. B., Silva, J. B., Souza, C. S., Menck, G. M., Sales, M. F., & Castro, C. C. (2021). Plant–animal interactions of understory species in an area of tropical rainforest, north-eastern Brazil. *Austral Ecology*, 46 (4) 561–573.

Studer, A., Nusbaumer, L., & Spichiger R. (2015). Biodiversidade da Reserva Biológica de Pedra Talhada (Alagoas, Pernambuco - Brasil). *Boissiera*, 68 1-818.

Tabarelli, M., Siqueira-Filho, J. A., & Santos, A. M. M. (2006). Conservação da Floresta Atlântica ao norte do Rio São Francisco. (org. K.C. Pôrto, J.S. Almeida-Cortez and M. Tabarelli), pp. 41–48. *Diversidade biológica e conservação da Floresta Atlântica ao norte do Rio São Francisco*. MMA, Brasília.

Uchôa-Neto, C. A. M., & Tabarelli, M. (2003). Diagnóstico e estratégia de conservação do Centro de Endemismo Pernambuco. Termo de Referência N° CS FY02/00X Conservation International do Brasil. Centro de Pesquisas Ambientais do Nordeste, Recife. <http://www.cepan.org.br>

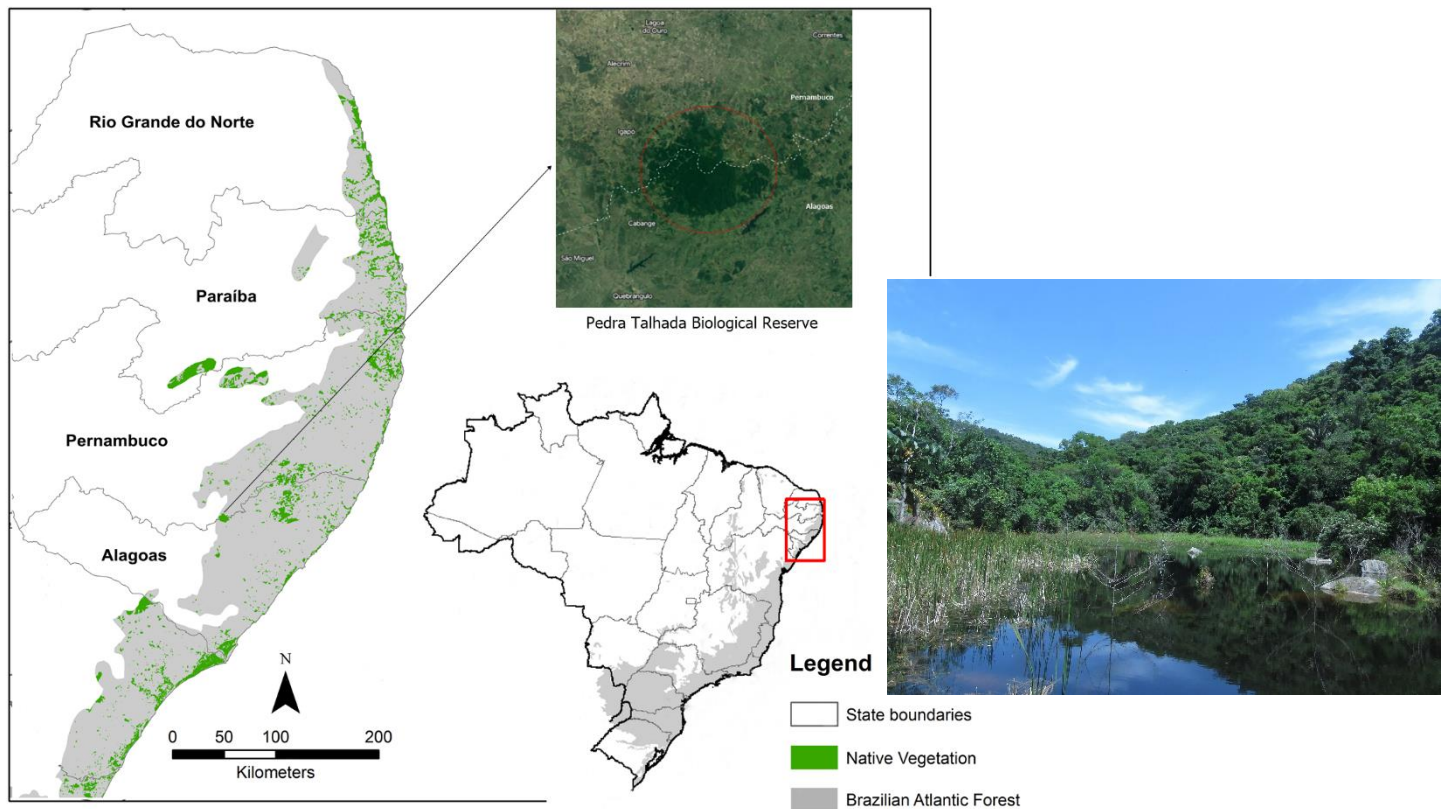


Figura 1. Reserva Biológica de Pedra Talhada, nordeste do Brasil.



Figura 2. Coleta de dados (largura de bico) das aves dispersoras de sementes na Reserva Biológica de Pedra Talhada, nordeste do Brasil: **a** *Pteroglossus inscriptus* e **b** *Megarynchus pitangua* (coleção ornitológica), **c** *Cyclarhis gujanensis*, **d** *Tolmomyias flaviventris*. Fotos: Leonardo B. da Silva

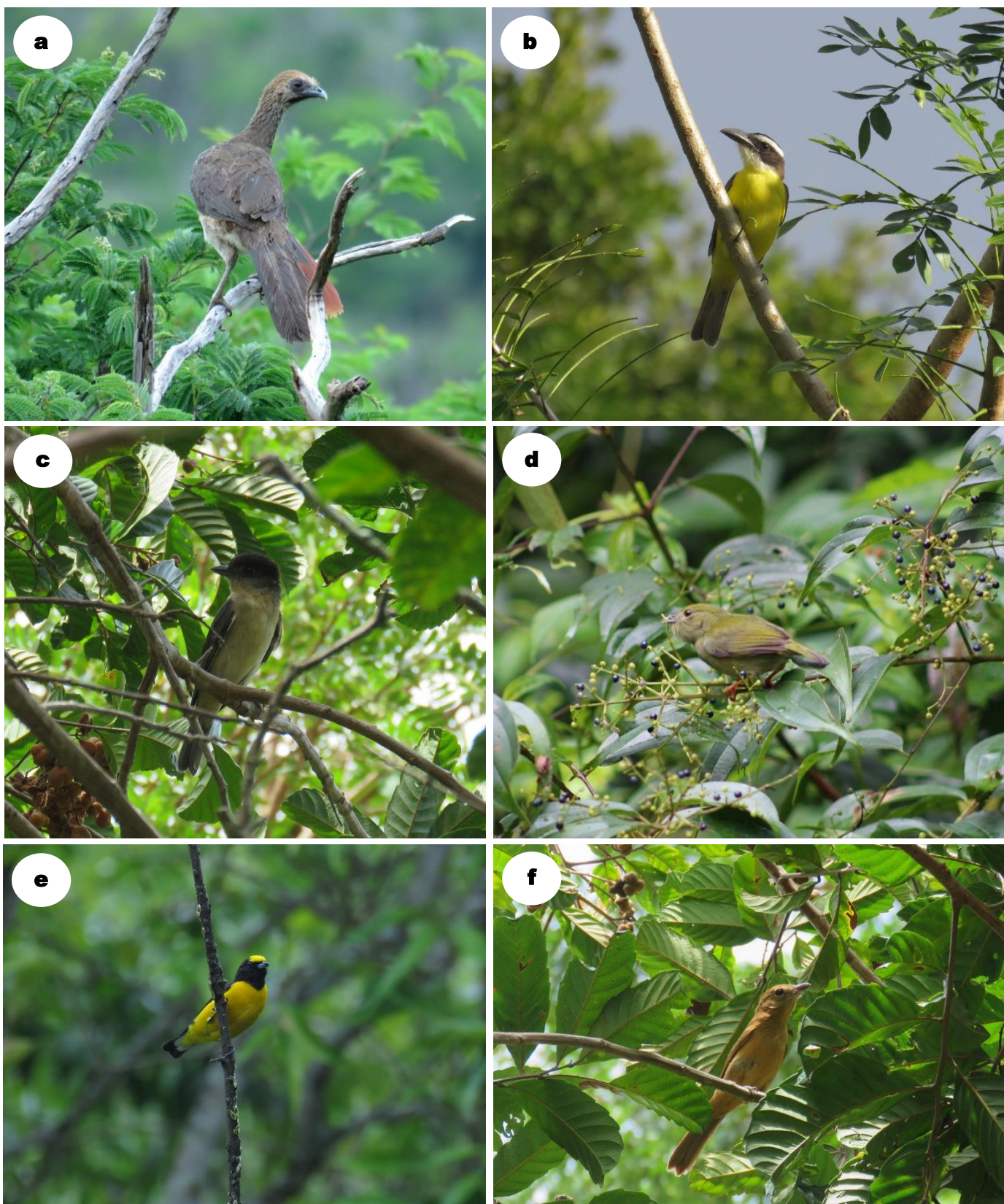


Figura 3. Aves dispersoras de sementes na Reserva Biológica de Pedra Talhada, nordeste do Brasil: **a** *Ortalis araucuan*, **b** *Megarynchus pitangua*, **c** *Pachyramphus validus*, **d** *Manacus manacus*, **e** *Euphonia chlorotica*, **f** *Loricotus cristatus*. Fotos: Leonardo B. da Silva

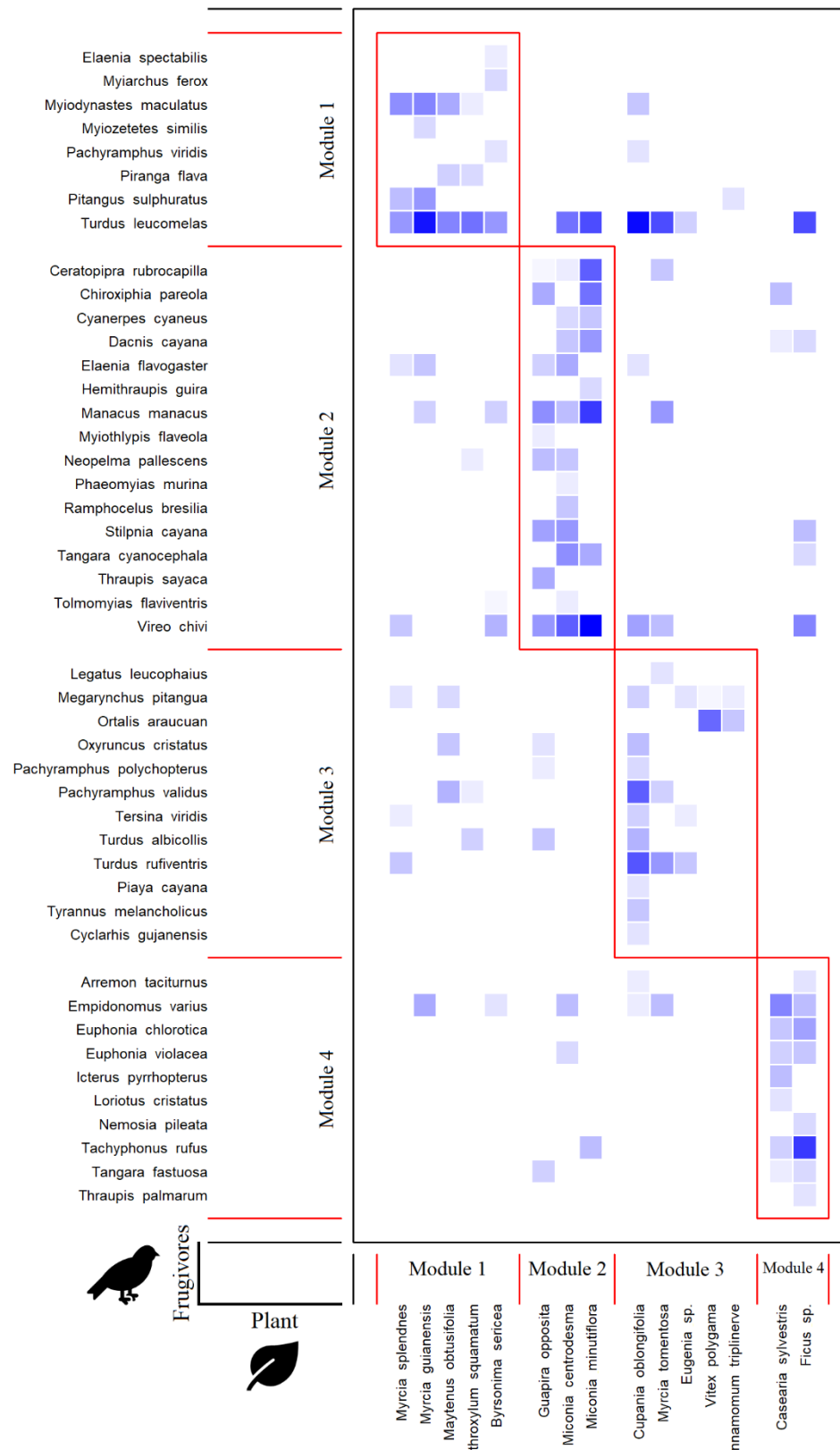


Figura 4. Rede de interação aves-plantas na Reserva Biológica de Pedra Talhada, nordeste do Brasil.

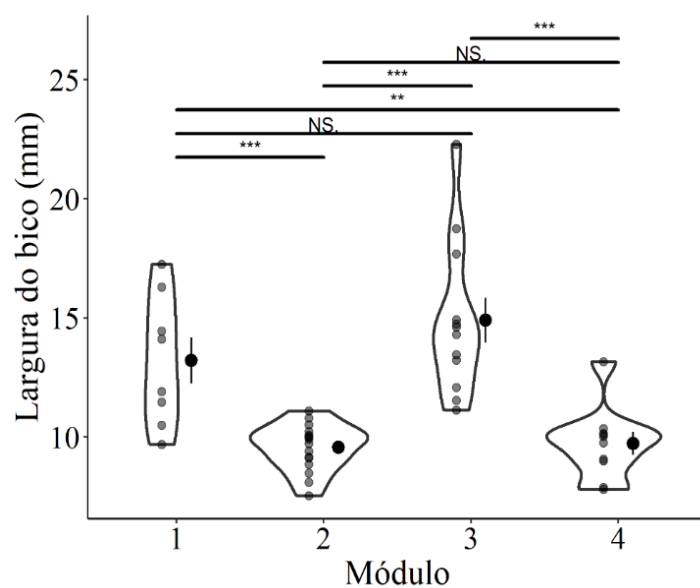


Figura 5. Módulos formados com base nas medidas de largura de bico das aves dispersoras na Reserva Biológica de Pedra Talhada, nordeste do Brasil.

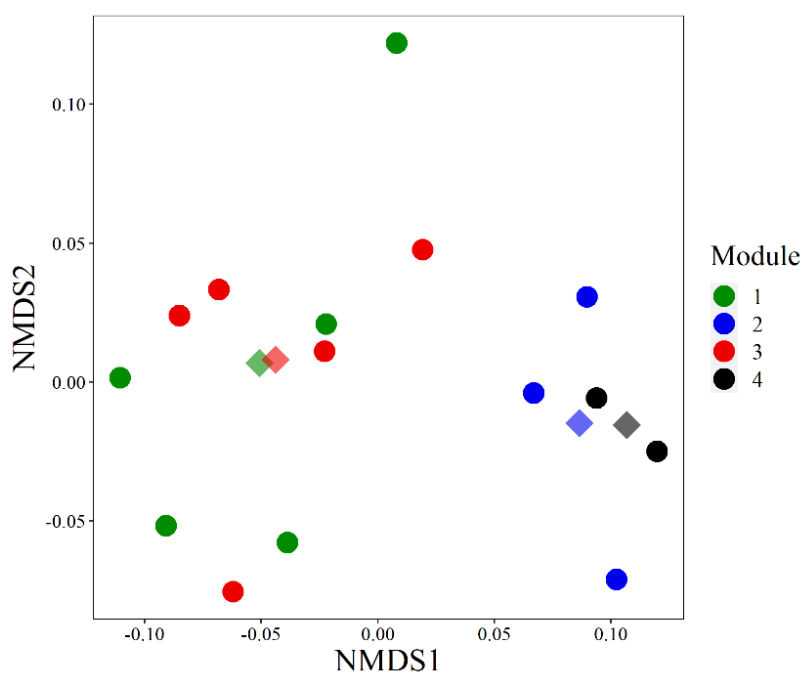


Figura 6. Módulos formados com base no tamanho dos diásporos ornitocóricos na Reserva Biológica de Pedra Talhada, nordeste do Brasil.

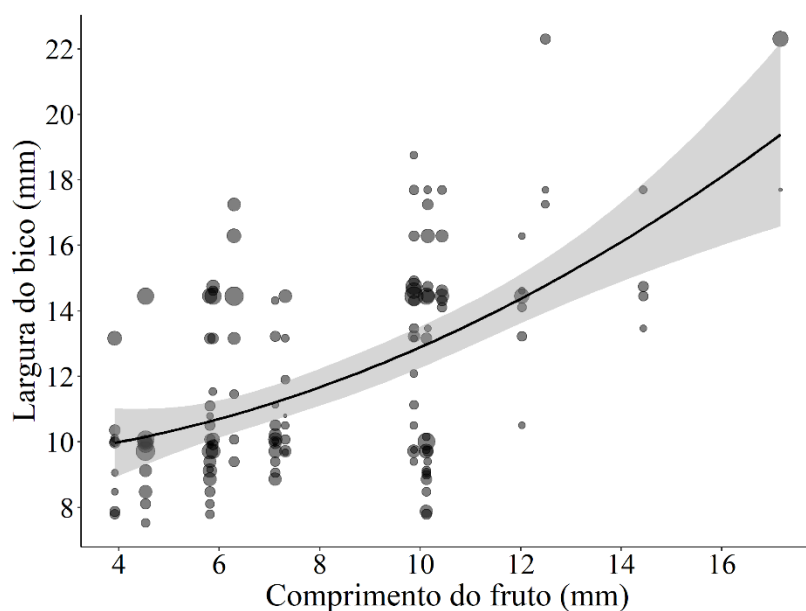


Figura 7. Relação entre a largura de bico das aves e o tamanho dos diásporos na Reserva Biológica de Pedra Talhada, nordeste do Brasil.

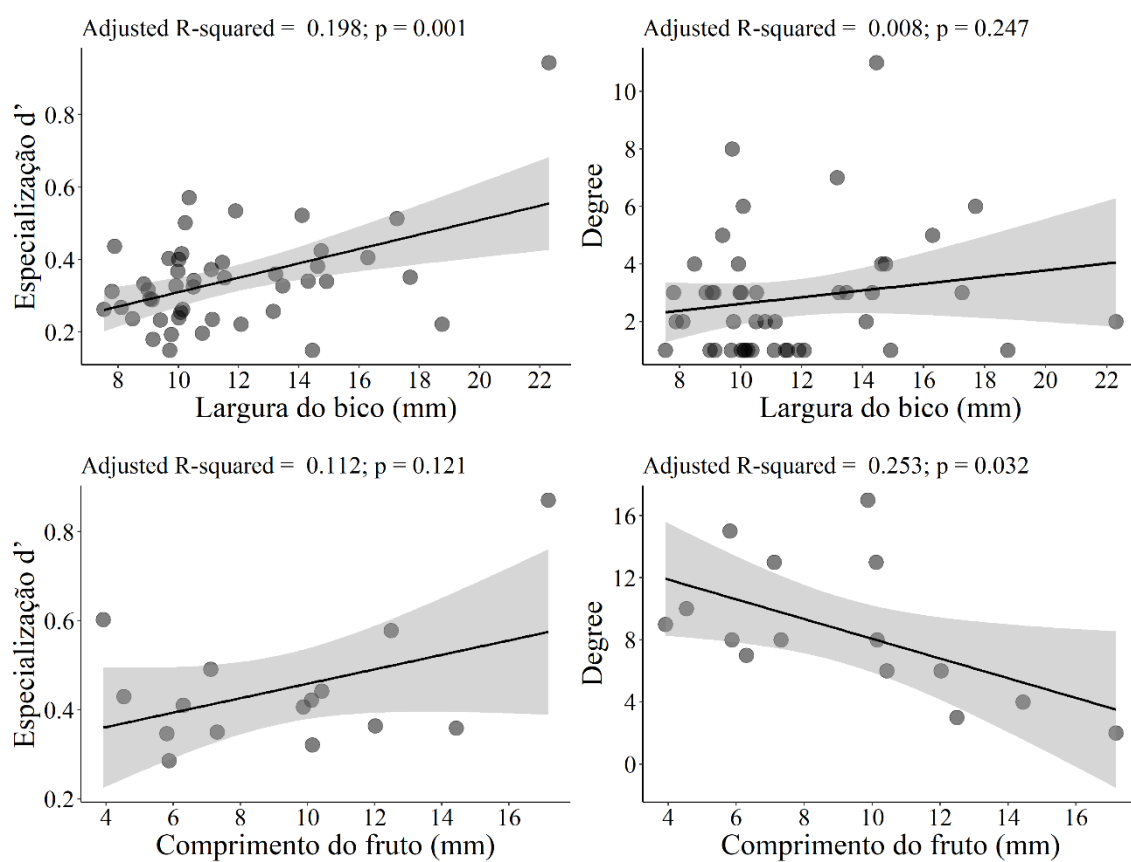


Figura 8. Especialização e grau de conectividade das aves e diásporos na Reserva Biológica de Pedra Talhada, nordeste do Brasil.

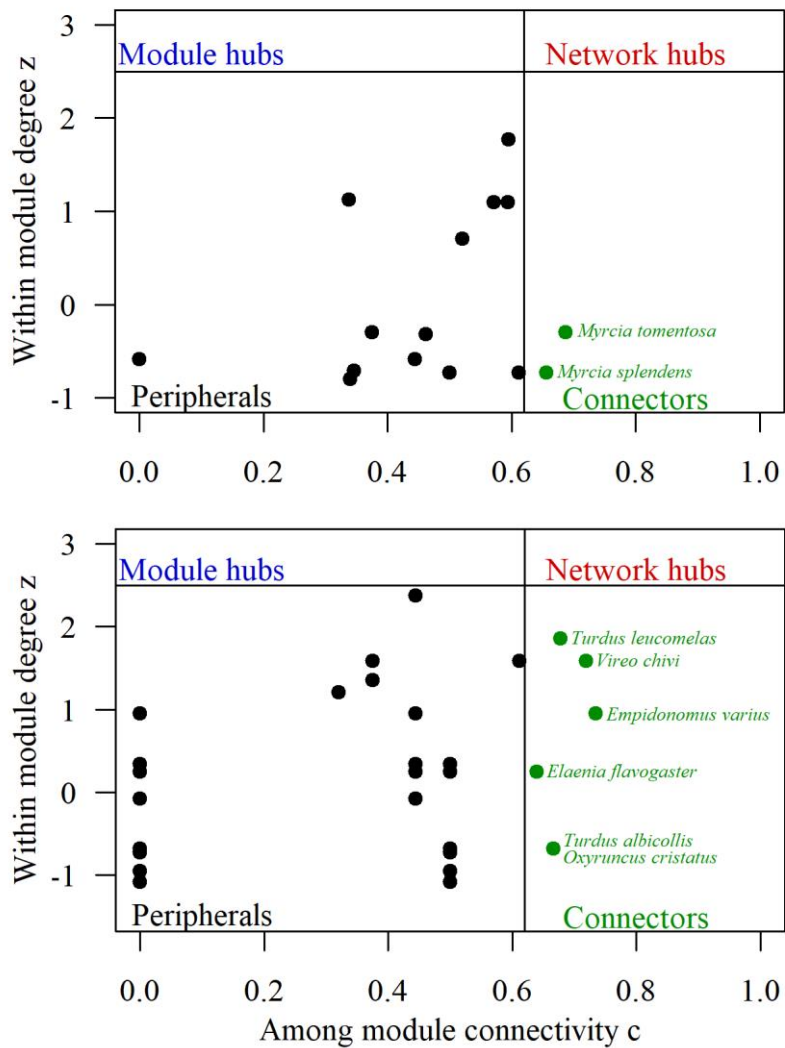


Figura 9. Módulos formados com base no papel das espécies para a manutenção da estrutura da rede dispersão aves-diásporos na Reserva Biológica de Pedra Talhada, nordeste do Brasil.

Material Suplementar

Tabela 1. Aves dispersoras e tamanho médio da largura de bico na Reserva Biológica de Pedra Talhada, nordeste do Brasil.

Táxon	Número de indivíduos	Tamanho médio da largura de bico (mm)
Galliformes		
Cracidae		
<i>Penelope superciliaris</i>	1	23,67
<i>Ortalis araucuan</i>	2	22,30
Columbiformes		
Columbidae		
<i>Patagioenas picazuro</i>	2	11,00
<i>Zenaida auriculata</i>	3	9,41
Cuculiformes		
Cuculidae		
<i>Piaya cayana</i>	2	18,75
Piciformes		
Ramphastidae		
<i>Pteroglossus inscriptus</i>	5	25,51
Falconiformes		
Falconidae		
<i>Caracara plancus</i>	10	27,49
<i>Milvago chimachima</i>	9	21,72
Passeriformes		
Pipridae		
<i>Neopelma pallescens</i>	10	10,51
<i>Chiroxiphia pareola</i>	6	9,98
<i>Manacus manacus</i>	5	10,08
<i>Ceratopipra rubrocapilla</i>	6	9,92
Cotingidae		

<i>Procnias averano</i>	1	17,89
<i>Xipholena atropurpurea</i>	2	15,84
Tityridae		
<i>Pachyramphus viridis</i>	4	10,50
<i>Pachyramphus polychopterus</i>	10	11,09
<i>Pachyramphus validus</i>	10	14,61
Oxyruncidae		
<i>Oxyruncus cristatus</i>	1	14,31
Rhynchocyclidae		
<i>Tolmomyias sulphurescens</i>	5	11,95
<i>Tolmomyias flaviventris</i>	3	10,79
Tyrannidae		
<i>Camptostoma obsoletum</i>	4	7,16
<i>Elaenia flavogaster</i>	3	9,40
<i>Elaenia spectabilis</i>	4	9,68
<i>Phaeomyias murina</i>	4	9,15
<i>Legatus leucophaeus</i>	3	11,53
<i>Attila spadiceus</i>	2	17,23
<i>Myiarchus ferox</i>	4	11,90
<i>Myiarchus tyrannulus</i>	5	12,77
<i>Pitangus sulphuratus</i>	6	17,25
<i>Myiodynastes maculatus</i>	10	15,92
<i>Megarynchus pitangua</i>	9	17,69
<i>Myiozetetes similis</i>	7	11,46
<i>Tyrannus melancholicus</i>	6	14,91
<i>Empidonomus varius</i>	4	13,15
Vireonidae		
<i>Cyclarhis gujanensis</i>	5	12,08
<i>Vireo chivi</i>	10	9,72
Corvidae		

<i>Cyanocorax cyanopogon</i>	10	16,66
Turdidae		
<i>Turdus leucomelas</i>	7	14,44
<i>Turdus rufiventris</i>	4	14,74
<i>Turdus albicollis</i>	2	13,22
Mimidae		
<i>Mimus saturninus</i>	3	12,10
Fringillidae		
<i>Euphonia chlorotica</i>	4	7,88
<i>Euphonia violácea</i>	3	7,79
<i>Euphonia pectoralis</i>	5	8,56
Passerellidae		
<i>Arremon taciturnus</i>	2	9,76
<i>Zonotrichia capensis</i>	3	8,35
Icteridae		
<i>Icterus pyrrhopterus</i>	3	10,36
<i>Molothrus bonariensis</i>	2	10,26
Parulidae		
<i>Myiothlypis flaveola</i>	1	10,02
Cardinalidae		
<i>Piranga flava</i>	2	14,11
Thraupidae		
<i>Nemosia pileata</i>	4	8,99
<i>Chlorophanes spiza</i>	2	9,17
<i>Hemithraupis guira</i>	4	7,53
<i>Tersina viridis</i>	3	13,46
<i>Cyanerpes cyaneus</i>	4	8,10
<i>Dacnis cayana</i>	6	8,48
<i>Saltator maximus</i>	4	12,39
<i>Saltator fuliginosus</i>	2	12,38

<i>Coereba flaveola</i>	5	6,90
<i>Volatinia jacarina</i>	11	8,06
<i>Loriotus cristatus</i>	10	10,11
<i>Tachyphonus rufus</i>	7	10,01
<i>Ramphocelus bresilia</i>	4	11,09
<i>Thlypopsis sordida</i>	4	8,55
<i>Conirostrum speciosum</i>	2	8,31
<i>Schistochlamys ruficapillus</i>	9	9,97
<i>Thraupis sayaca</i>	10	10,22
<i>Thraupis palmarum</i>	10	10,14
<i>Stilpnia cayana</i>	6	8,86
<i>Tangara fastuosa</i>	9	9,06
<i>Tangara cyanocephala</i>	3	9,12

Tabela 2. Espécies ornitocóricas lenhosas na Reserva Biológica de pedra Talhada, nordeste do Brasil.

Família/espécie	Medidas dos diásporos (mm)	
	Comprimento	Largura
Anacardiaceae		
<i>Thyrsodium spruceanum</i>	22,61	19,51
Burseraceae		
<i>Protium heptaphyllum</i>	12,17	7,20
Celastraceae		
<i>Maytenus obtusifolia</i>	10,42	6,79
Chrysobalanaceae		
<i>Hirtella racemosa</i>	11,16	9,81
Combretaceae		
<i>Buchenavia tetraphylla</i>	23,13	15,87
Erythroxylaceae		
<i>Erythroxylum squamatum</i>	12,02	6,77
Lamiaceae		
<i>Vitex polygama</i>	17,17	15,76
Lauraceae		
<i>Cinnamomum triplinerve</i>	12,49	7,27
<i>Ocotea</i> sp.	17,02	11,29
Malpighiaceae		
<i>Byrsonima sericea</i>	7,31	8,41
<i>Byrsonima stipulaceae</i>	8,21	10,31
Melastomataceae		
<i>Miconia centrodesma</i>	5,81	8,04
<i>Miconia minutiflora</i>	4,53	5,03
<i>Miconia prasina</i>	5,79	7,11
Moraceae		
<i>Ficus</i> sp.	10,11	11,46

Myrtaceae

<i>Eugenia</i> sp.	14,43	12,92
<i>Myrcia guianensis</i>	6,29	6,11
<i>Myrcia splendens</i>	10,14	6,38
<i>Myrcia tomentosa</i>	5,87	6,71
<i>Myrcia</i> sp.	11,83	7,53

Nyctaginaceae

<i>Guapira opposita</i>	7,11	13,33
-------------------------	------	-------

Rhamnaceae

<i>Ziziphus cotinifolia</i>	15,03	17,10
-----------------------------	-------	-------

Rubiaceae

<i>Psychotria carthagenensis</i>	7,69	8,82
----------------------------------	------	------

Salicaceae

<i>Casearia sylvestris</i>	3,91	3,97
----------------------------	------	------

Sapindaceae

<i>Cupania oblongifolia</i>	9,87	7,77
<i>Cupania racemosa</i>	18,01	15,41
<i>Matayba guianensis</i>	11,47	9,47
<i>Talisia</i> sp.	10,65	10,32

Sapotaceae

<i>Manilkara triflora</i>	23,38	24,54
---------------------------	-------	-------

Simaroubaceae

<i>Simarouba amara</i>	13,33	10,50
------------------------	-------	-------

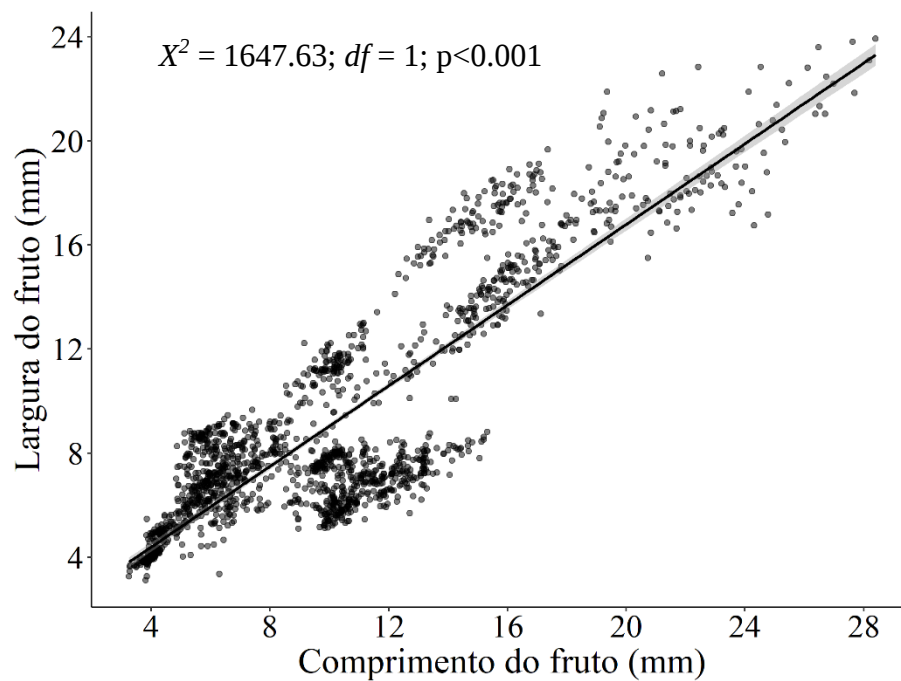


Figura 1. Correlação entre o comprimento e a largura dos diásporos ornitocóricos na Reserva Biológica de Pedra Talhada, nordeste do Brasil.

CAPÍTULO 3

(Manuscrito publicado *Brazilian Journal of Biology*)



<https://doi.org/10.1590/1519-6984.258191>

WHEN HUNGER IS GREATER THAN THE BEAK: GUIRA TANAGER (AVES, THRAUPIDAE) STRATEGY TO OPTIMIZE FRUGIVORY

**When hunger is greater than the beak: Guira Tanager (Aves, Thraupidae)
strategy to optimize frugivory**

L. B. Silva^{1,2,*}, W.C. Silva², J.R.F. Lima², J.T. Souza³, C.C. Castro¹ and N.M. Almeida^{1,2}

¹ Laboratório de Ecologia Reprodutiva de Angiospermas, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade, Departamento de Biologia, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, CEP 52171-900, Dois Irmãos, Recife, PE, Brasil.

² Universidade Estadual de Alagoas, Campus III, Rodovia AL-115, km 03, Palmeira dos Índios, AL, Brasil.

³ Universidade Estadual do Ceará, Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Iguatu, Avenida Dário Rabelo, s/n, CEP 63502-253, Iguatu, CE, Brasil.

*Corresponding author: lb_silva@yahoo.com.br

The use of tools was a determining factor for the biological and cultural evolution of the human species (Richerson and Boyd, 2006). The first studies addressing the use of tools by other animals in the context of food resource collection consider as “true” tools those that are detached from a substrate and held by the animal in the hand or mouth, as an extension of their bodies (Goodall, 1964). Several studies on this theme have mainly focused on manipulative animals with large brain capacity, such as several species of primates (Goodall, 1964; Moraes et al., 2014; Falótico et al., 2017).

Unlike mammals, birds do not have hands to manipulate a tool. Despite the fantastic ability to use the beak for the fabrication and “handling” of tools, displayed by members of the family Corvidae (Hunt, 1996; Rutz et al., 2007; Rutz et al., 2010), records of this practice in other groups of birds are mainly associated with another category of tools, the “borderline”, which include objects that are part of a substrate, such as anvils against which prey items are struck, baits that are deposited in water to attract fish, spines to hold food, among others (Hunt et al., 2002; Lefebvre et al., 2002).

However, obtaining observational data on these behaviors by birds in nature is still a challenge. In the Neotropical region, these records are scarce. Among them are the observations made by Sazima (2007). In his study, the author describes the use of baits by *Butorides striata* (Linnaeus, 1758) to attract fish. There are also observations on the use of a stone anvil by *Taraba major* (Vieillot, 1816) to break land snail shells made by Efe et al. (2015). Here, we present what appears to be the first record of tool use by Guira Tanager (*Hemithraupis guira*) (Linnaeus, 1766). We recorded the use of cavities in branches, which helped in the “handling” (holding or moving with the beak) of diaspores of Camboatã (*Cupania oblongifolia*) Mart. (Sapindaceae) during removal of arils in a Brazilian Atlantic Forest area.

The observations were made during a study on frugivory and seed dispersal by birds in the Pedra Talhada Biological Reserve, an area of Atlantic Forest covering about 4,000 ha, located between the states of Alagoas and Pernambuco in northeastern Brazil. During the month of January 2020, we carried out direct visual observation sessions between 6:00 am and 12:00 am in two Camboatã individuals in a forest edge area, totaling 12 hours of observations. We used 8 x 32 mm binoculars and a photographic camera to record the behavior of the birds.

Guira Tanager is a species of the family Thraupidae that measures about 13 cm in total length and weighs about 10 g. It has sexual dimorphism; the male has black head and throat sides while the female has olive head and yellowish chest. It is found throughout most of Brazil and is common on the edges of wet and dry forests. It feeds mainly on fruits and nectar (Sick 1997).

Camboatã is an endemic tree of the Atlantic Forest that can reach about 20 m in height, occurring throughout the extension of this forest in Brazil. Its fruits are three-winged dehiscent capsules enclosing ellipsoid seeds with an orange aril, rich in lipids and proteins (Lorenzi 1998).

During our observations, we considered a visit to be the period in which the bird arrived and remained feeding until leaving the plant or our field of vision. We collected beak width measurements from two adult individuals of Guira Tanager (one male and one female) from the ornithological collection of the UFPE. We also randomly collected 30 Camboatã seeds with aril for collection of morphometric data (length and width) with the aid of a digital caliper with a precision of 0.01 mm.

We recorded a total of 26 visits by Guira Tanager to Camboatã. In 22 visits, the birds used a cavity in one of the plant's branches to support the seeds during the removal of the aril. When the beak width was smaller than or just as large as the seeds (Table 1), which could pose a limitation for handling and ingestion, the birds collected the diaspores and took them to a cavity surrounded by mosses in a branch of the Camboatã individual. Using this cavity, the birds were able to manipulate and remove the entire aril, without dropping the seeds to the forest ground. In total, we observed 58 processed seeds (Figure 1). The birds also showed the behavior of removing seeds that had already been processed from the cavity when there were between 5 and 7 seeds in there.

Most visits (84.61%) were made by two individuals (couple). However, on one occasion, we observed the simultaneous visitation of two pairs, but one of them did not use the cavities to remove the arils. This same pair collected the diaspores and dropped them during manipulation, with no success in feeding. We observed that those individuals also consumed small pieces of aril without removing the seeds from the fruits.

In addition to having a small beak width, Guira Tanager belongs to a group of birds known as mashers, which are more efficient in exploiting small diaspores (about 4 mm in diameter) (Levey 1987). Low food availability or nutritional advantage may be ecological factors that motivated the use of tools instead of conventional foraging techniques (Rutz et al., 2010). In fact, in the period of our observations, few ornithochoric species (with diaspores attractive to avifauna) had their fruits dispersed, and all had diaspores above 4 mm, some with dimensions much larger than the beak of Guira Tanager, as for example *Vitex polygama* Cham. (about 15 mm), *Talisia* sp. (about 10 mm), and *Byrsonima sericea* DC. (about 10 mm).

Diaspore size can represent a barrier to the foraging activity of birds. Larger diaspores are ingested and better utilized by birds that have larger beak width, which in turn disperse them by endozoochory (Silva and Tabarelli 2000). However, the use of the cavity made it possible for the birds to completely remove and ingest the aril at all times. Although we observed that during the cleaning of the cavity, the seeds were dropped to the ground in the vicinity of the mother plant, which may hinder the establishment of new individuals (Santos et al. 2006). The use of this tool can also lead to the process of synzoochory (transport of diaspores) because the birds transported the seeds in their beak to be processed farther away from the plant of origin.

Guira Tanager birds live in pairs or in small groups that accompany mixed flocks during foraging activities (Sick 1997). This behavior can favor learning processes among individuals. Thus, the use of cavities could be imitated or transmitted to new generations, as observed in species of the family Corvidae (Rutz et al. 2010).

In the Neotropical region, the ecological and evolutionary context, and the adaptive importance of tool use by birds are still poorly understood. Thus, valuable insights can be gained through studies that assess ecological processes such as frugivory and seed dispersal. Brazil has one of the greatest bird diversity in the world, and in the Atlantic Forest, many of them include fruits and seeds in their diets (Sick 1997; Silva and Tabarelli 2000). Monitoring the feeding behavior of these birds with a closer look can help us understand different questions, such as: what are the environmental pressures that favor the use of those tools? How is this ability transmitted to other individuals? How can the use of cavities influence ecological processes such as seed dispersal?

Acknowledgements

The authors thank the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for financial support, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) for allowing the study to be carried out in the area and Nordeste Reforestation & Education for logistic support.

References

- EFE, M.A., PAIVA, F.N., HOLDERBAUM, J.M. and LADLE, R.J., 2015. Rapid development of tool use as a strategy to predate invasive land snails. *Journal of ethology*, vol. 33, no.1, pp. 55-57.
- FALÓTICO, T., SIQUEIRA, J.O. and OTTONI, E.B., 2017. Digging up food: excavation stone tool use by wild capuchin monkeys. *Scientific reports*, vol. 7, no. 1, pp. 1-10.
- GOODALL, J., 1964. Tool-using and aimed throwing in a community of free-living chimpanzees. *Nature*, vol. 201, no. 4926, pp. 1264-1266.
- HUNT, G.R., 1996. Manufacture and use of hook-tools by New Caledonian crows. *Nature*, vol. 379, no. 6562, pp. 249-251.

- HUNT, G.R., SAKUMA, F. and SHIBATA, Y., 2002. New Caledonian crows drop candle-nuts onto rock from communally-used forks on branches. *Emu*, vol. 102, no. 3, pp. 283-290.
- LEFEBVRE, L., NICOLAKAKIS, N. and BOIRE, D., 2002. Tools and brains in birds. *Behaviour*, vol. 139, no. 7, pp. 939-973.
- LEVEY, D.J., 1987. Seed size and fruit-handling techniques of avian frugivores. *The American Naturalist*, vol. 129, no. 4, pp. 471-485.
- LORENZI, H., 1998. *Árvores Brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil*. Plantarum, São Paulo
- MORAES, B.L.C., SOUTO, A.S. and SCHIEL, N., 2014. Adaptability in stone tool use by wild capuchin monkeys (*Sapajus libidinosus*). *American Journal of Primatology*, vol. 76, no. 10, pp. 967-977.
- RICHERSON, P.J. and BOYD, R., 2006. *Not by Genes Alone: How Culture Transformed Human Evolution*. University of Chicago Press, Chicago
- RUTZ, C., BLUFF, L.A., WEIR, A.A.S. and KACELNIK, A., 2007. Video Cameras on wild birds. *Science*, vol. 318, no. 5851, pp. 765-765.
- RUTZ, C., BLUFF, L.A., REED, N., TROSCIANKO, J., NEWTON, J., INGER, R., KACELNIK, A. and BEARHOP, S., 2010. The ecological significance of tool use in New Caledonian crows. *Science*, vol. 329, no. 5998, pp. 1523-1526.
- SANTOS, B.A., MELO, F.P.L. and TABARELLI, M., 2006. Seed shadow, seedling recruitment, and spatial distribution of *Buchenavia capitata* (Combretaceae) in a fragment of the Brazilian Atlantic Forest. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 66, pp. 883-890.
- SAZIMA, I., 2007. Frustrated fisher: geese and tilapias spoil bait-fishing by the Green Heron (*Butorides striata*) in an urban park in Southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Ornitologia*, vol. 15, no. 4, pp. 611-614.
- SICK, H., 1997. *Ornitologia brasileira*. Nova Fronteira, Rio de Janeiro
- SILVA, J.M.C. and TABARELLI, M., 2000. Tree species impoverishment and the future flora of the Atlantic Forest of northeast Brazil. *Nature*, vol. 404, no. 6773, pp. 72-74.

Table 1. Morphometry of Camboatã (*Cupania oblongifolia*) seeds and measures of beak width of Guira Tanager (*Hemithraupis guira*).

Seeds (mm)		Beak width (mm)	
Length	Width	Male	Female
9.11 ± 0.66	7.41 ± 0.44	7.71	7.18



Figure 1. Use of branch cavities by Guira Tanager (*Hemithraupis guira*) to aid in the removal and ingestion of arils of Camboatã (*Cupania oblongifolia*) seeds in the Pedra Talhada Biological Reserve, northeastern, Brazil. A - Male individual of Guira Tanager collecting Camboatã seeds; B - Cavity used; C - Male individual of Guira Tanager removing and ingesting the aril; D - Female individual of Guira Tanager removing and ingesting the aril. Photos: Leonardo B. da Silva

CAPÍTULO 4

(Manuscrito aceito *Ciência Hoje das Crianças*)



AS AVES QUE SEMEIAM AS FLORESTAS

As aves que semeiam as florestas

Autores

Leonardo Barbosa da Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Biodiversidade

Autor para correspondência: lb_silva@yahoo.com.br

Jacilene Bezerra da Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Jefferson Thiago Souza

Universidade Estadual do Ceará (UECE/Iguatu)

Cibele Cardoso de Castro

Universidade Federal do Agreste de Pernambuco

Natan Messias de Almeida

Universidade Estadual de Alagoas (UNEAL/Palmeira dos Índios)



As aves que semeiam as florestas

Apresentação - Elas são coloridas e adoram cantar. Se alimentam de frutos e vivem a voar. Semeiam as florestas sem na terra pisar. É claro que estamos falando das aves dispersoras de sementes! Se você ainda não as conhece, vamos te apresentar!

As florestas são fundamentais para a conservação dos seres vivos. Além do mais, nos fornecerem alimentos, medicamentos e matéria-prima para a fabricação de um monte de coisas. Elas são tão importantes, que a ONU criou em 2012 o dia internacional das florestas, comemorado em 21 de março. No Brasil, elas ocupam mais da metade do território. Diante da grandeza de uma floresta, você já deve ter se perguntado, como todas essas plantas chegaram aqui? As aves podem nos ajudar a responder!

As florestas tropicais, como a Amazônia, a Caatinga, o Cerrado e a Mata Atlântica, abrigam uma grande quantidade de relações envolvendo os seres vivos, as chamadas interações ecológicas! E uma das mais importantes é a que promove o deslocamento das plantas. Como assim, deslocamento? Sabemos que as plantas não conseguem andar! É verdade, mas elas precisam chegar em novas áreas. Para resolver esse problema a maioria das espécies produz sementes, que podem ser transportadas e encontrar outros locais e boas condições para germinarem e dar origem a novas plantas.

Algumas espécies produzem sementes que são transportadas pelo vento, como o dente-de-leão. Outras são transportadas pela água, como o coco. Lembra que nos desenhos animados as ilhas oceânicas sempre possuem coqueiros? Pois é! Chegaram lá através das águas do mar!! Porém, nas nossas florestas predominam as espécies que contam com a ajuda dos animais. Mas, não é qualquer animal que pode ajudar. Apenas os dispersores de sementes, ou seja, os que espalham sementes pela floresta. E o que eles ganham em troca desse serviço? Uma recompensa suculenta e nutritiva. Frutos! Isso mesmo, as plantas produzem frutos que atraem os animais, e quando eles os consomem acabam ingerindo junto as sementes, que depois serão liberadas nas fezes. Já estão começando a entender?

Frutos na dieta

Os frutos estão no cardápio de diferentes grupos de animais: mamíferos, aves, peixes, répteis e até formigas. As aves se destacam, pois representam um dos grupos mais numerosos e diversificados de animais frugívoros. É assim que são conhecidos os animais que gostam de comer frutos. Tucanos, jacus e mutuns estão entre as maiores aves frugívoras das nossas florestas. Para encontrar os frutos, elas contam com uma excelente visão e uma boa memória. Mesmo assim, pode não ser uma tarefa simples. Para facilitar essa procura, as plantas desenvolveram uma estratégia... produzir frutos com cores chamativas (amarela, laranja, vermelha etc.). Essas cores além de contrastarem com o verde das folhas, também indicam que os frutos estão maduros, prontos para serem comidos



Plantas que têm as suas sementes dispersas por aves. (A) Virola; (B) Mama-cadela; (C) Miconia; (D) Copaíba. Fotos: Leonardo B. da Silva

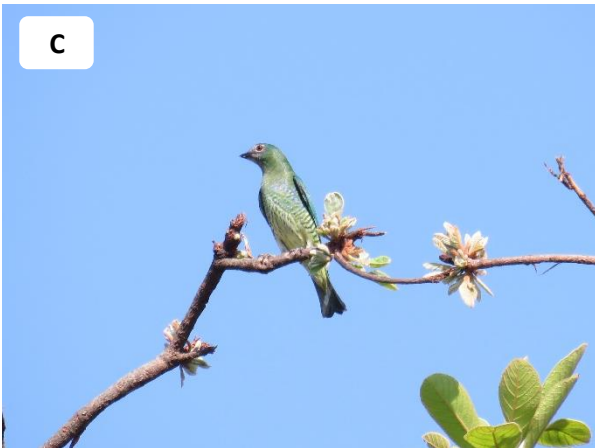
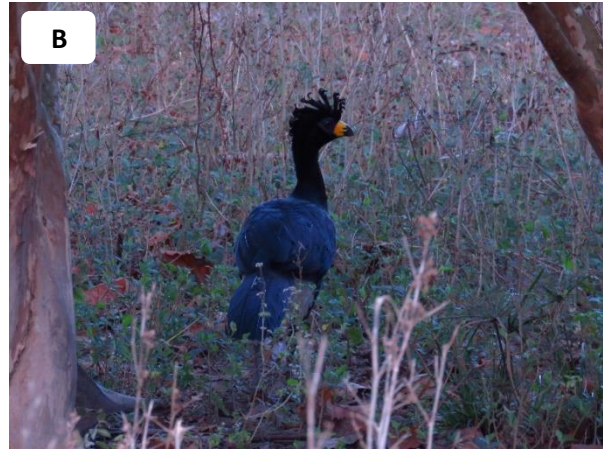
Tamanho de bico é documento!

Para as plantas é importante que as aves sejam capazes de engolir os frutos com as suas sementes. Essa é uma das formas mais eficientes de transportá-las. As aves que possuem uma largura de bico pequena, como as saíras e os sanhaços, só conseguem engolir frutos e sementes pequenas, como as produzidas pelas miconias (espécies da família Melastomataceae). Já as aves que possuem uma largura de bico grande, como os tucanos, além dos frutos pequenos, também conseguem engolir os frutos com sementes maiores. Então, plantas como a virola (família Myristicaceae) e a mama-cadela (família Moraceae) contam sempre com a ajuda das aves de bico grande para dispersarem as suas sementes.

Chuva de sementes

Não é à toa que muitas espécies de plantas tenham estabelecido essa relação com as aves. A capacidade de voar desses animais pode garantir que as sementes sejam levadas para locais mais afastados. E quanto mais distante, melhor. Várias espécies de aves se deslocam por longas distâncias à procura de seus frutos preferidos, e principalmente através das fezes, acabam dispersando pelo caminho as sementes antes ingeridas. Realizam uma verdadeira chuva de sementes! Sem o trabalho das aves, os frutos

amadureceriam e cairiam todos abaixo da planta-mãe, onde as condições para o desenvolvimento de novas plantas não são boas. Imagine um monte de plantas-filhas crescendo e competindo por espaço, luminosidade, água e nutrientes. Uma grande confusão! E o pior, a maior parte delas não consegue sobreviver por muito tempo.



Aves dispersoras de sementes. (A) Tucanuçu; (B) Mutum-de-penacho (macho); (C) Saí-andorinha (fêmea); (D) Sanhaçu-cinzento. Fotos: Leonardo B. da Silva

Dispersão ameaçada!

Apesar das florestas ainda cobrirem boa parte do Brasil, dispersar sementes está ficando difícil, até para quem voa! Nossas florestas estão sendo derrubadas para dar lugar a grandes plantações, pastagens, para a extração de madeira e para o crescimento das cidades. Com isso, elas vão ficando bem fragmentadas, e muitos destes fragmentos ficam isolados. Deixar a proteção de uma floresta para sobrevoar grandes áreas abertas é um desafio que muitas espécies de aves não conseguem superar, acabam isoladas também! As aves maiores ainda sofrem com a caça. Elas são as primeiras a desaparecer dos fragmentos florestais. E as plantas que dependem diretamente delas para dispersarem as suas sementes?

Sem dispersão de sementes, sem biodiversidade...

A dispersão de sementes é fundamental para a manutenção e para a recuperação natural das florestas. As plantas necessitam das aves para transportarem as suas sementes, bem como, as aves necessitam dos frutos para se alimentarem. Se esta interação for quebrada, as florestas vão perdendo a sua biodiversidade. Estudos já nos mostram que se as aves frugívoras de bico grande forem extintas de uma floresta, muitas espécies de plantas também podem deixar de existir. Isso pode provocar um efeito dominó sobre outras interações ecológicas, afetando diretamente a ocorrência de outros grupos de plantas e animais. Aposto que vocês não imaginavam que o cocô dessas aves fosse tão importante!

Curiosidades

As aves de rapina também gostam de frutos e podem dispersar sementes

Com garras fortes e afiadas, bico curvo e pontiagudo e grande agilidade, ninguém duvida que as aves de rapina são excelentes predadoras de animais. No entanto, o que pouca gente sabe, é que algumas delas também gostam de comer frutos. É! Adoram a polpa de frutos como o pequi, a macaúba e o dendê. Elas podem transportá-los no bico para consumir a polpa em locais distantes. Isso também é um tipo de dispersão de sementes!

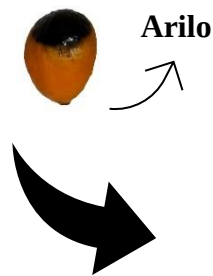
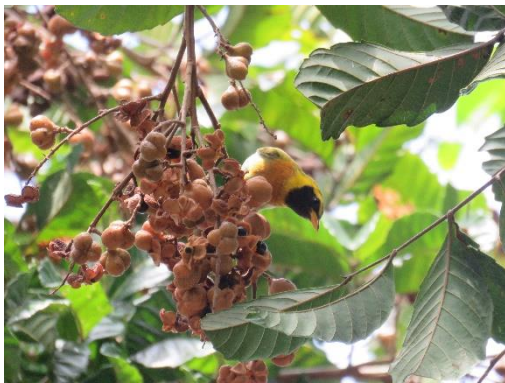


Dispersão de sementes de dendê pelo Carcará. (A) Cacho de frutos de dendê e (B) Carcará com um fruto no bico.

Fotos: Leonardo B. da Silva

E quando a fome é maior do que o bico?

As aves são bem espertas, e algumas espécies já foram observadas solucionando problemas. Como é o caso da saíra-de-papo-preto, que foi registrada em um estudo recente, utilizando cavidades formadas por musgos nos galhos de árvores, para apoiar sementes que eram muito grandes para serem ingeridas, ou até mesmo, “manipuladas” com o bico.



Saíra-de-papo-preto utilizando cavidades em galhos de árvores para se alimentar do arilo (parte rica em nutrientes) das sementes de uma árvore conhecida como Camboatã. Registro realizado na Reserva biológica de Pedra Talhada em Alagoas. Fotos: Leonardo B. da Silva

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa tese tem uma importância prática para a conservação do Cerrado e da Mata Atlântica. Utilizamos como modelo de estudo as interações mutualísticas que envolvem aves e plantas. Cada um dos capítulos nos permitiu avançar no estado da arte dos estudos sobre dispersão de sementes por aves na região tropical. Apesar dessas interações já serem bem estudadas, os manuscritos aqui presentes trazem novas perspectivas na abordagem de variáveis ambientais, morfológicas e comportamentais das espécies no processo de dispersão. Abaixo elencamos os principais achados.

1 – A fragmentação ambiental diminui a diversidade de espécies nas guildas de aves dispersoras e favorece a redundância funcional nas redes de interações aves-diásporos.

2 – O tamanho dos diásporos e a capacidade de ingestão das aves dispersoras (largura de bico) definem como a dispersão de sementes através da endozoocoria pode ser conduzida.

3 – Quanto maior é o tamanho dos diásporos, menor é a sua redundância dispersiva.

4 – As relações morfológicas entre o tamanho dos diásporos e a capacidade de ingestão das aves podem exercer pressões que direcionam o desenvolvimento e o estabelecimento de traços comportamentais para otimizar o forrageamento.

Embora a realização de estudos com essas abordagens possua alguns desafios logísticos, especialmente na coleta de dados *in situ*, é possível incorporar métodos mais acessíveis aos pesquisadores, como o levantamento de dados gerados pela ciência cidadão, a coleta de dados morfológicos em coleções ornitológicas e em coleções botânicas. Também sugerimos a realização de estudos que venham buscar entender a percepção das interações aves-diásporos por populações que costumam lidar com os ambientes florestais e as suas variações no tempo e no espaço.

Esperamos que esta tese e seus produtos possam motivar futuros estudos sobre o papel das aves na conservação da biodiversidade. Através da realização de serviços ecossistêmicos, como a polinização e a dispersão de sementes, as aves são

importantíssimas para a conservação e recuperação natural das áreas de *hotspots*. Como grande parte da população brasileira desenvolve as suas atividades em áreas de ocorrência do Cerrado e da Mata Atlântica, vale ressaltar a importância da conscientização ambiental. Assim, parte das informações presentes nesta tese são apresentadas em uma linguagem acessível para a sociedade em geral, e em particular para o público infanto-juvenil. Esse tipo de iniciativa também contribui para a valorização da ciência.

ANEXOS

DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA PRODUZIDA A PARTIR DESTA TESE

Guia de observação de aves produzido durante a coleta de dados na Reserva
Biológica de Pedra Talhada, AL

O Guia fotográfico traz imagens, informações ecológicas e dicas de observação para 30 espécies de aves encontradas na Reserva Biológica de Pedra talhada. Ele está dividido em três capítulos: Aves frugívoras, Aves de rapina e Aves associadas a ambientes aquáticos.





Saíra-pintor



Inconfundível pelo colorido da sua plumagem, pode ser observada se alimentando de frutos, tanto no interior como na borda da floresta. Costuma construir seus ninhos dentro de bromélias epífitas.

Classificação Científica

Ordem: Passeriformes
 Família: Thraupidae **Cabanis, 1847**

Nome Científico

Tangara fastuosa (Lesson, 1831)

Nome em Inglês

Seven-colored Tanager

Comprimento Médio



Estado de Conservação

(IUCN 3.1)
VULNERÁVEL



Ocorrência



Fonte: IBGE