

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 09/04/2021.

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGIA VEGETAL)**

**Diversidade e estrutura arbórea ao longo de um gradiente altitudinal na
Floresta Tropical Pluvial Atlântica**

VITOR DE ANDRADE KAMIMURA

Novembro - 2020

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGIA VEGETAL)**

**Diversidade e estrutura arbórea ao longo de um gradiente altitudinal na
Floresta Tropical Pluvial Atlântica**

VITOR DE ANDRADE KAMIMURA

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio de Assis

Coorientadora: Dra. Priscilla de Paula Loiola

Coorientador no exterior: Dr. Francesco de Bello

Tese apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Ciências Biológicas (Biologia Vegetal).

**Rio Claro - SP
Novembro - 2020**

K15d

Kamimura, Vitor de Andrade

Diversidade e estrutura arbórea ao longo de um gradiente altitudinal na Floresta Tropical Pluvial Atlântica / Vitor de Andrade Kamimura.

-- Rio Claro, 2020

148 p. : tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Biociências, Rio Claro

Orientador: Marco Antonio de Assis

Coorientadora: Priscilla de Paula Loiola

1. Ecologia Vegetal. 2. Diversidade. 3. Florestas Tropicais. 4.
Ecologia Funcional. 5. Ecologia Evolutiva. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

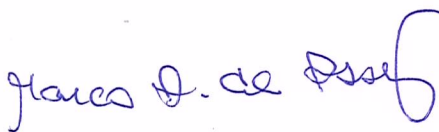
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: DIVERSIDADE E ESTRUTURA ARBÓREA AO LONGO DE UM GRADIENTE VERTICAL DE TEMPERATURA NA FLORESTA TROPICAL PLUVIAL ATLÂNTICA

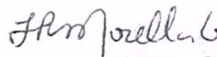
AUTOR: VITOR DE ANDRADE KAMIMURA
ORIENTADOR: MARCO ANTONIO DE ASSIS
COORIENTADORA: PRISCILLA DE PAULA LOIOLA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGIA VEGETAL), área: Biologia Vegetal pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCO ANTONIO DE ASSIS
Departamento de Botânica / UNESP/Rio Claro




Profa. Dra. LEONOR PATRICIA CERDEIRA MORELLATO
Departamento de Biodiversidade / UNESP - Instituto de Biociências de Rio Claro - SP



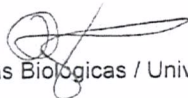
Profa. Dra. MARCIA CRISTINA MENDES MARQUES
Depo. de Botânica / Universidade Federal do Paraná



Profa. Dra. JULIA CARAM SFAIR
Departamento de Botânica / UFPE



Prof. Dr. DANILO RAFAEL MESQUITA NEVES
Departamento de Botânica - Instituto de Ciências Biológicas / Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte/MG



Rio Claro, 09 de outubro de 2020

Título alterado para:

DIVERSIDADE E ESTRUTURA ARBÓREA AO LONGO DE UM GRADIENTE ALTITUDINAL NA FLORESTA TROPICAL PLUVIAL ATLÂNTICA

“A função primária da comunicação escrita foi facilitar a servidão.”

Claude Lévi-Strauss

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Marco Antonio de Assis, que me acompanha nesta jornada de crescimento acadêmico e pessoal desde 2008. Agradeço por aceitar a desafiante tarefa de orientar este aluno inquieto, falante e abstruso. Agradeço a inenarrável chance que me proporcionou de conhecer a fundo os mistérios da Floresta Atlântica e outras vegetações, além de me oferecer sua amizade e conselhos ao longo destes anos de trabalho. Sou grato por ter a oportunidade de ser o seu último orientado nesta grande história que escreveu ao longo de sua vida acadêmica.

À minha (co)orientadora, a Dra. Priscilla de Paula Loiola, que me apresenta continuamente novas formas de aprender e conhecer o mundo da ecologia e estatística. Agradeço por me proporcionar uma experiência singular de orientação, e por sua transcendental amizade e camaradagem desde que nos conhecemos em uma saída de campo, magnífica, na imponente Floresta Atlântica. Sou muito grato por ter a oportunidade de desfrutar de toda sua sabedoria e sua companhia, sou grato por compartilhar minha vida com essa pessoa que considero da maior sagacidade e inteligência que já me deparei neste globo.

À minha família consanguínea, que é a base para que eu consiga seguir me arriscando e ascendendo nas sagas em que me coloco a viver. Vocês estão sempre criando um alicerce para que eu possa chegar nos pontos mais altos e melhores lugares da melhor forma possível. Aqui, coloco um agradecimento especial a minha mãe e irmã, que me possibilitam seguir acreditando nas transformações e progressos do mundo, que me fazem abrir os olhos para as belezas que a vida possui, além do cabresto que acabamos por vestir com o passar do tempo. Agradeço de forma especial a meu pai e meu tio-avô que são fontes inigualáveis de inspiração, ainda que em outra dimensão de suas existências. Agradeço às minhas avós e aos meus avôs, ao meu tio Gê, e às minhas tias, Ana e Beth, por sempre me apoiarem e me abastecerem com o conforto de seus braços e abraços. Agradeço ao Danilo, novo membro da família e meu sobrinho, o qual me gera mais forças para lutar contra o sistema vigente. Agradeço aos meus entes queridos, Gú, Ana, Tio Lú e Tininha, são mais de 30 anos me fazendo uma pessoa melhor.

À minha segunda família, que não compartilha laços sanguíneos, mas que é um dos portos-seguro que carrego desde o dia em que se deu início essa longa e maravilhosa passagem por Rio

Claro. São apenas riscos nos papéis, mas ficam os mais sinceros agradecimentos a vocês: Mudinho, Tcherbi, Play, Azê, Tabulesco, Porpz, Atum, Couch, Pereirula, Fisga, Pederneiras, Cogu, Padá, Pedro, Naty e Spock, e aos entes biológicos magníficos que convivi; a mais meiga de todas as cachorras, a Paçoca, e a minha rainha que está se deleitando em outras esferas, a Palinha. Agradeço também a todos companheiros da Tijuana e demais pessoas que compartilhei uma parte do espaço-tempo nesta inigualável experiência de saborear a vida unespiana, os quais me fizeram melhorar e crescer.

À minha terceira família, que também não compartilha laços sanguíneos, mas que é parte fundamental da minha história. Essa família que se criou no âmbito acadêmico e extrapolou qualquer previsão de enlaçamentos. Novamente, são apenas riscos nestes papéis digitais, mas ficam os mais sinceros agradecimentos aos Broncos: Marcusseira, Renovisk, Henriqueta e Mioletra.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa doutorado e auxílio financeiro concedido (processo nº 141781/2016-5), essenciais para o desenvolvimento deste estudo. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, no âmbito de bolsa de doutorado sanduíche (PDSE), a qual foi de suma importância para o meu crescimento profissional e pessoal. Agradeço o programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas (Biologia Vegetal), aos diretores dos núcleos Cunha, Picinguaba e Santa Virgínia do Parque Estadual da Serra do Mar, bem como todos os seus funcionários, por todo o suporte concedido para o desenvolvimento deste projeto.

À todos os colegas e coordenadores dos projetos Temáticos “BIOTA - Gradiente-funcional” e "ECOFOR: Biodiversidade e funcionamento de ecossistemas em áreas alteradas pelo homem nas Florestas Amazônica e Atlântica", por me ajudarem em diferentes pontos do meu trabalho, e por me cederem a oportunidade de trabalhar com um banco de dados extraordinário da Floresta mais encantadora e mística que já conheci no meu breve caminhar no mundo. Agradeço também aos meus colegas botânicos e ecólogos pelos grandes ensinamentos: Ana, Rodrigo, Diogo, Bigato, Elton, Pablo, Biral, Bruna e Gabi, e aos amigos de longa data: Mandoca, Maurer, Giba, Deivas, Carlão, Sota e Vilas.

Agradezco enormemente al Dr. Francesco de Bello por enseñarme una nueva manera de disfrutar de los encantos de la ecología. Gracias por acogerme en su grupo de estudio y darme la oportunidad de probar un poco de su sabiduría y de vivir la genial vida valenciana. Gracias al Dr. Carlos Carmona por enseñarme algunos de los misterios de la programación y la estadística. Le dejo un personal agradecimiento al Dr. Patrício Garcia-Fayos por su amistad, orientación y las grandes conversaciones durante las comidas en el restaurant del CIDE y en su casa. Gracias a los magnánimos investigadores del CIDE, Dr. Juli Pausas, Dr. Miguel Verdú, Dra. Ester Bochet, Dr. César Azorín-Molina y Dr. Bruno Moreira por compartir sus conocimientos conmigo. Agradezco la convivencia y el aprendizaje junto a Dra. Alicia Montesinos, una de las personas más inteligentes y alegres que he conocido en mi vida. Gracias a todos los amigos que hice en el CIDE, Lola, Guille, Maya, Lucas, Ricardo, Santi y Thomas, vosotros me fuisteis esenciales para que yo me sintiera acogido en Valencia. Gracias especialmente a Carmen, por su amistad, charlas maravillosas y por haber me soportado y por mostrarme las bellezas que hay en la vida en España. Finalmente, agradezco a mis amigos sudamericanos, Marco, Oscar, Calcita, Andrea, Fabi, Gary, Miguel, Kathia y Cristian, por toda alegría que me generaron durante el tiempo que estuve en Valencia, y en específico a Carlitos, un hermano chileno que encontré en los primeros días en Valencia; muchas gracias por su compañía y amistad, voy a visitarte en tu país, seguramente.

I am very grateful to Prof. Dr. Jan “Suspa” Leps and Dr. Pavel Fibich for receiving me at the Department of Botany, Faculty of Science, University of South Bohemia, for helping me a lot to develop my skills with spatial models and present to me different ways to work with different subjects in functional ecology.

Por fim, agradeço aos desatinos e atinos da longa jornada na vida acadêmica, que para além do conhecimento científico têm me dado a oportunidade de experimentar um ambiente único. Este ambiente de vivência que me permite crescer diariamente, em diversas direções, seja no âmbito do conhecimento científico e pessoal, seja no âmbito filosófico e social. Encerro os agradecimentos da mesma forma que os principiei no mestrado, mantendo a esperança de poder agradecer de uma forma mais verdadeira a todos e a “tudo” durante minha jornada nesta pequena vila chamada mundo.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	10
RESUMO GERAL	13
ABSTRACT	15
INTRODUÇÃO GERAL	17
REFERÊNCIAS	21
CAPÍTULO I: Splitting and merging: The importance of using different ecological approaches to understand diversity-elevation relationships	27
ABSTRACT.....	28
1. INTRODUCTION	29
2. METHODS	33
3. RESULTS	37
4. DISCUSSION	43
5. CONCLUSIONS.....	48
6. REFERENCES.....	49
CAPÍTULO II: Phylogenetic structure sheds light on the effect of selective logging along an elevation gradient in Atlantic Rainforest tree communities	63
ABSTRACT.....	64
1. INTRODUCTION.....	65
2. MATERIAL AND METHODS	67
3. RESULTS	70
4. DISCUSSION	75
5. REFERENCES.....	78
CAPÍTULO III: Which, where and when traits are functional? Trait interactions control tropical tree demography depending on environmental context	95
ABSTRACT.....	96
1. INTRODUCTION	97
2. METHODS	99
3. RESULTS	106
4. DISCUSSION	113
5. CONCLUSIONS.....	119
6. REFERENCES.....	120
CONSIDERAÇÕES FINAIS	146

APRESENTAÇÃO

Sobre o formato da tese

Esta tese foi estruturada em três capítulos, com uma Introdução Geral que apresenta, de forma simplificada, os conceitos básicos e o suporte teórico necessário para o entendimento de todos os capítulos que a compõe. Os capítulos são referentes a estudos realizados com diferentes abordagens sobre um grande conjunto de dados da comunidade arbórea da Floresta Atlântica, redigidos em inglês e no formato de manuscritos para apreciação em periódicos científicos. Ainda, estão inseridas as Considerações Finais, em que coloco pontos de vista, questões e compreensões pessoais sobre a temática desenvolvida e resultados encontrados.

Para facilitar o entendimento e a fluidez na leitura dos capítulos, as figuras e tabelas foram inseridas no corpo do texto, e os materiais suplementares de cada manuscrito estão ao final do capítulo correspondente.

A escolha do tema e a trajetória

A exuberância e encantos da Floresta Atlântica foram fatores determinantes na escolha de toda a minha carreira acadêmica até este ponto. Desde o Trabalho de Conclusão de Curso, passando ao Mestrado até culminar no Doutorado, a sua imensurável diversidade continua a me despertar extrema curiosidade e furor. Apesar de ser uma formação florestal com um número relativamente grande de estudos e sob diferentes abordagens, ainda nos resta muito a conhecer e tentar desvendar sobre tudo aquilo que concerne a sua riqueza de espécies e ecologia. As Florestas Tropicais, no geral, ainda apresentam muitas lacunas de conhecimento e possibilidades de novos estudos. Assim, qualquer proposta de trabalho envolvendo estes locais são inerentemente justificáveis e interessantes para o conhecimento científico e público.

Quando fui devidamente apresentado, em 2008, às imensas riquezas e poesia das diferentes formações florestais da Mata Atlântica, eu me vi tentado e impulsionado a

compreender os eventos e processos que são capazes de promover tamanha co-ocorrência de espécies. Contando com a ajuda do meu ‘contínuo’ orientador, o Professor Marco Antonio Assis, iniciei minha trajetória no mundo do conhecimento botânico. Hoje, sei que este foi um primeiro passo fundamental na minha curta aventura acadêmica, culminando em uma publicação da pesquisa realizada no Trabalho de Conclusão de Curso (Kamimura, et al., 2008; “Floristic, structure and ecological groups of a tree community in the Atlantic Rainforest at Serra do Mar, SP, Brazil.” - *Nativa: Pesquisas Agrárias e Ambientais*), e que me permite falar com um pouco mais de propriedade sobre tudo aquilo que pesquisei até hoje, embora tenha rumado mais a fundo para a área da Ecologia.

Este anfractuoso caminho teve um despertar na graduação, quando fui apresentado a Ecologia de Comunidades, por intermédio da Professora Leila Moura. Embora houvesse esse lado desperto, meu mestrado teve um caráter taxonômico como escopo inicial, no qual iniciamos com uma revisão das espécies da Família Lauraceae que ocorrem ao longo de um gradiente de elevação na Floresta Atlântica do sudeste brasileiro. Além disso, propusemos a produção de uma chave de identificação destas espécies, por meio de seus caracteres vegetativos. Contudo, na minha dissertação final e defesa, apresentei os padrões de variação da diversidade e estrutura dessa família ao longo da área estudada, nos quais encontramos uma novidade para as relações entre riqueza de espécies arbóreas e altitude, verificamos o aumento de espécies de Lauraceae conforme aumento da elevação. Como produto deste longo e gratificante trabalho, conseguimos uma publicação no tradicional periódico internacional “*Flora*” (Kamimura, et al., 2017; “Tree diversity and elevational gradient: The case of Lauraceae in the Atlantic Rainforest.” - *Flora*)

Este fato, junto a tudo aquilo descrito anteriormente e a minha descoberta da Ecologia Funcional e Filogenética, me levaram a buscar compreender os processos e mecanismos que levam a arrebatadora diversidade arbórea da Floresta Atlântica. Estes quatro anos e meio de doutorado, além de me abastecerem com um enorme crescimento acadêmico, experiências na

docência, saídas de campo inigualáveis, conhecer pessoas e lugares incríveis; me proporcionou uma das mais transformadoras oportunidades que tive em minha vida. No período de novembro de 2018 a outubro de 2019, fui contemplado com um bolsa de doutorado sanduíche (PDSE) da CAPES, por meio de uma aplicação individual. Esta oportunidade me possibilitou trabalhar junto a um incrível grupo de pesquisa e desenvolver com grande qualidade um dos capítulos desta tese. Trabalhei no Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE), Valência, Espanha, supervisionado pelo Dr. Francesco de Bello e com colaboração do Dr. Pavel Fibich do Departamento de Botânica, University of South Bohemia, České Budějovice, República Checa. A experiência de viver em outro país, beber de uma nova cultura, saborear novas conversas, e aprender com um dos mais renomados pesquisadores da área de Ecologia Funcional, e todos pesquisadores do CIDE, entre outros locais, é algo que não seria possível traduzir em palavras.

Porém, neste final de doutorado, me vejo impulsionado, novamente, a expandir minha área de trabalho e mantendo toda a gratidão pelo que essa jornada me trouxe de conhecimento, espero juntá-la a outras áreas de estudo, para poder ressignificar tudo isso, e lograr trazer um pouco de subjetividade a esta grande área do conhecimento. Por exemplo, inserido a Filosofia da Alteridade, tal como elucubrada por Emmanuel Lévinas, neste contexto das ciências biológicas e possibilitar, quiçá, uma maior comunicação entre a ecologia e outras áreas do conhecimento, bem como com pessoas que não estão dentro da academia.

RESUMO GERAL

A ecologia busca elucidar os processos e mecanismos responsáveis pelos padrões de diversidade, estrutura, montagem e funcionamento das comunidades. Neste trabalho, investigamos três questões fundamentais na ecologia de comunidades, utilizando um grande conjunto de dados da composição, demografia e atributos funcionais de comunidades arbóreas amostrados ao longo de um gradiente de elevação na Floresta Atlântica. No primeiro capítulo, utilizamos abordagens integrativas por meio de métricas da diversidade de espécies e filogenética sob diferentes arranjos de espécies (p.e. comunidade vs. famílias) para avaliar os processos ecológicos que conduzem as relações entre diversidade e elevação em florestas com mega diversidade. Encontramos um padrão de variação unimodal da diversidade da comunidade arbórea, emergindo da combinação dos diferentes padrões de diversidade de suas famílias com maior abundância. A diversidade filogenética local foi negativamente relacionada com a elevação e a diversidade regional (*turnover*) de espécies foi maior quanto maior a distância entre as comunidades. Estes resultados indicam a competição e a filtragem ambiental como principais processos nos mecanismos de montagem de comunidades ao longo de gradiente de elevação, e que a união das abordagens ecológica e evolutiva, sob diferentes arranjos de espécies, é fundamental para entender os processos que conduzem as relações entre diversidade e os gradientes ambientais. No segundo capítulo, além dos efeitos da variação de altitude, estudamos os efeitos da extração seletiva de madeira no padrão de diversidade e na estrutura filogenética de comunidades arbóreas, e avaliamos como a escala espacial pode alterar os resultados dessas análises. O corte seletivo e o filtro de altitude aumentaram a diversidade filogenética, apesar de conduzirem ao agrupamento filogenético. Os efeitos da altitude e da exploração madeireira foram mais fortes em larga escala, e os resultados foram alterados de acordo com os clados usados na análise. Dessa maneira, o filtro ambiental pode ofuscar o efeito da extração seletiva de madeira e, quando o filtro de elevação é excluído, os nichos abertos provavelmente por perturbações da exploração madeireira, levam a maior co-ocorrência de

espécies filogeneticamente distantes. No terceiro capítulo, estudamos as relações entre os atributos funcionais e as taxas demográficas das espécies arbóreas considerando a importância de incluir interações entre os atributos, assim como o tipo florestal e o intervalo de tempo entre os censos (incluindo ou não um evento de seca), usando técnicas estatísticas inovadoras para melhorar o teste de premissas da análise funcional com um grande conjunto de dados. Aplicando o ‘aprendizado de máquina’ por meio de modelos de árvore de regressão impulsados, descobrimos que a inclusão das interações entre atributos aumentou significativamente o poder dos modelos para prever as relações entre atributos e taxas demográficas, dependentes do tipo de vegetação e do intervalo de tempo. Assim, para avaliar a funcionalidade das comunidades vegetais, é importante considerar que pode haver múltiplos fenótipos com respostas demográficas semelhantes, resultados de interações entre atributos em diferentes habitats e intervalos de tempo. Concluindo, demonstramos que o uso de diferentes abordagens na ecologia de comunidades é fundamental para que possamos avaliar os processos ecológicos e mecanismos que conduzem a mega-diversidade de florestas tropicais e o funcionamento de suas comunidades.

Palavras-chave: Aprendizado de máquinas, árvores, corte seletivo de madeira, demografia, diversidade, ecologia de comunidades, ecologia evolutiva, ecologia funcional, diversidade, floresta atlântica, floresta tropical, gradiente de elevação.

ABSTRACT

A central point in ecology is to elucidate the processes and mechanisms responsible for the patterns of diversity, structure, assembly, and functioning of communities. Here, by using a large set of data on the composition, demography, and functional attributes of tree communities sampled along an elevation gradient in the Atlantic Forest, we investigated three fundamental questions across three chapters in the ecology of communities. In the first chapter, we used an integrated approach of species diversity and phylogenetic diversity under different species arrangements (e.g. community vs. families) to assess the ecological processes that drive the relationships between diversity and elevation in mega-diversity forests. We found a unimodal pattern of diversity variation for the tree community, emerging from the combination of different patterns of diversity of its most abundant families. The local phylogenetic diversity was negatively related to the elevation and the regional diversity (turnover) of species was greater as greater the elevation difference between communities. These results showed species competition and environmental filtering as the most important processes in the community's assembly mechanisms along an elevation gradient and that the union of ecological and evolutionary approaches, under different species arrangements, are fundamental to evaluate the processes that drive relationships between diversity and environmental gradients at each scale. In the second chapter, along with the effects of altitude variation, we studied the effects of selective logging on the diversity and phylogenetic structure of tree communities and evaluated how spatial scale change these results. Selective logging tends to increase phylogenetic diversity but leads to phylogenetic clustering. The effects of elevation and logging were stronger on large scale, and the results were changed according to the clades used in the analysis. Therefore, the environmental filter can overshadow the effects of selective logging, when the elevation-filter was excluded, it revealed open niche-spaces probably created by disturbance of logging, leading to the co-occurrences of distantly related species. In the third chapter, we studied the trait-demography rates relationships of tree species taking into account

trait-interactions, forest type, time-interval between censuses (including or not a drought event) under robust statistical techniques to improve testing functional ecology assumptions by means of large datasets. Using machine learning through boosted regression tree models, we found that the inclusion of the trait-interactions significantly increased the power of the models to predict the trait-demography rates relationships and that trait-interactions were dependent on vegetation type and on time interval. Thus, to assess the functionality of the attributes, it is necessary to incorporate the concept of multiple phenotypes with similar demographic responses, resulting from various trait-interactions in different habitats and time intervals. To sum up, we demonstrate that the use of different approaches over community ecology is crucial for assessing the ecological processes and mechanisms that lead to a mega-diversity of tropical forests and the functioning of their communities.

Keywords: Atlantic forest; community ecology; demography; diversity; elevation gradient; evolutionary ecology, functional ecology, machine learning; selective logging; tree; tropical forest.

INTRODUÇÃO GERAL

Um dos principais e mais antigos objetivos da Ecologia é elucidar os processos ecológicos e mecanismos responsáveis pelos padrões de distribuição das espécies e funcionamento das comunidades (Pavoine & Bonsall 2011). Há séculos, os padrões de distribuição de espécies vegetais e a variação de diversidade são alvos de diversos estudos que foram baseados, inicialmente, em levantamentos florísticos (e.g. Wright 1878, Preston 1948, Whittaker 1960, Eiten 1972). Com o avanço e consolidação do conhecimento florístico, muitos trabalhos passaram a avaliar as mudanças de composição e riqueza de espécies entre diferentes comunidades (Gentry 1988, Lieberman *et al.* 2013), e buscaram explicar as causas da variação da diversidade vegetal ao longo de gradientes ambientais (Körner 2018, Laiolo *et al.* 2018). Somado a isto, o aprofundamento sobre abordagens filogenéticas e funcionais permitem outros entendimentos e possibilidades de análises acerca dos mecanismos e processos que atuam sobre a montagem e funcionamento das comunidades em diferentes contextos ambientais (Webb *et al.* 2002, Swenson *et al.* 2006, Worthy & Swenson 2019).

Os estudos das implicações da variação altitudinal sobre a riqueza de espécies estão entre os mais difundidos na literatura (McCain & Grytnes 2010). Porém, não há consenso sobre um padrão de alteração da distribuição e riqueza de espécies relacionado à variação altitudinal (McCain & Grytnes 2010, Graham *et al.* 2014). No geral, dois padrões são relatados para a variação de diversidade, um linear decrescente e outro unimodal-parabólico ou em forma de “sino” (e.g. Gentry 1988, Rahbek & Museum 1995, Kluge *et al.* 2006, McCain & Grytnes 2010, Khine *et al.* 2019). Nas Florestas Tropicais, estes dois padrões vêm sendo amplamente descritos ao longo de gradientes verticais de variação de riqueza de espécies, permanecendo uma falta de consenso dos principais fatores que poderiam conduzir a estas diferenças encontradas entre os estudos (Rahbek 2005, McCain & Grytnes 2010, Sanders & Rahbek 2012). Segundo Nogués-Bravo *et al.* (2008), a escala de estudo e os impactos por atividade humana seriam dois grandes fatores gerando diferenças entre padrões de variação de riqueza em gradientes altitudinais, no

qual partindo de uma escala regional para escalas menores de estudo, o padrão linear ou monotônico de variação da diversidade se altera a um padrão unimodal-parabólico. Além da escala espacial, estas variações nos padrões de diversidade podem estar associadas às abundâncias relativas das famílias mais ricas em uma comunidade, que podem variar em curtas distâncias espaciais (e.g. Kamimura *et al.* 2017, Subedi *et al.* 2020). Embora estas mudanças incidam sobre os padrões de diversidade das comunidades como um todo (Peters *et al.* 2016, Descombes *et al.* 2017, Cirimwami *et al.* 2019), estudos de comunidades que enfoquem diferentes arranjos de espécies foram pouco explorados (Peters *et al.* 2016, Kamimura *et al.* 2017, Subedi *et al.* 2020). É essencial interpretar como os padrões de diversidade da comunidade podem emergir da combinação de diferentes padrões de suas famílias com maior contribuição na riqueza de espécies e abundância de indivíduos.

Contudo, para compreendermos a variação na distribuição e diversidade de espécie ao longo de gradientes abióticos, não basta usarmos as medidas tradicionais de diversidade, baseadas em unidades taxonômicas, mas também os índices de diversidade e abordagens filogenética e funcionais (Webb *et al.* 2002, Petchey *et al.* 2004, Hooper *et al.* 2005). Em linhas gerais, a diversidade filogenética é uma medida baseada nas idades de especiação (Faith 1992, Webb *et al.* 2002), enquanto a diversidade funcional é calculada por meio dos atributos das espécies relacionados ao funcionamento das comunidades (Petchey & Gaston 2006). Estes índices de diversidade melhoram a compreensão das possíveis respostas das comunidades às mudanças ambientais quando somadas as medidas tradicionais (Ricotta 2005, Gerhold *et al.* 2015).

Nas últimas décadas, foram desenvolvidos diferentes métodos de análises, índices e medidas de diversidade, que ponderam as diferenças entre as espécies dentro de um contexto filogenético e funcional (Webb *et al.* 2002, Petchey & Gaston 2006, Cadotte *et al.* 2009, 2012). As análises de diversidade funcional e filogenética, junto a abordagem de riqueza de espécies, possibilitam frentes de estudos inovadoras sobre as relações das espécies com o funcionamento

e manutenção dos ecossistemas, e ajudam a prever respostas das comunidades às variações geofísicas em gradientes ambientais (Petchey *et al.* 2004, Mason *et al.* 2005). Estas abordagens assistem a melhor compreensão da ecologia de comunidades e são essenciais para avaliar os processos ecológico e mecanismos que direcionam as relações de variação da diversidade e o funcionamento ecossistêmico com a variação altitudinal (Srivastava *et al.* 2012, Swenson 2013, Laiolo *et al.* 2018,).

No geral, os estudos da similaridade taxonômica, filogenética e funcional de espécies coocorrentes trazem informações-chaves para testar se processos ecológicos são determinísticos, como partição de nichos e filtragem ambiental, ou processos neutros (Hubbell 2001, Webb *et al.* 2002, Ackerly 2003, Swenson 2013, Laiolo *et al.* 2018). Porém, os processos ecológicos podem ser melhor compreendidos ao analisar a diversidade em dois componentes, a diversidade *alpha*, em escala local, e a diversidade *beta*, em escala regional, comparando a variação da composição de espécies entre comunidades ou ao longo do tempo (Whittaker 1960, 1972, Graham & Fine 2008, Pavoine & Bonsall 2011, Legendre 2019). Estudar cada um dos componentes da diversidade, sob as diferentes perspectivas ecológicas, e compreender como estão conectados, é fundamental para testar hipóteses ecológicas sobre a montagem de comunidades (Pavoine & Bonsall 2011, Elliott & Davies 2019). Estas hipóteses são baseadas, principalmente, nos mecanismos que atuam na: (i) diferenciação na utilização de recursos em combinação com as diferentes interações entre espécies; (ii) restrição de distribuição das espécies relacionadas a condições ambientais mais severas; e (iii) limitação da capacidade dispersão das espécies ou recrutamento de maneira estocástica (Hubbell 2001, Graham & Fine 2008, Fitzpatrick *et al.* 2013, Ibanez *et al.* 2018).

Dentro destas frentes de estudos, os gradientes de elevação podem ser utilizados como “experimentos naturais” para testar respostas ecológicas e evolutivas das espécies sob a influência de variáveis ambientais (Graham *et al.* 2014, Körner 2018). Estes estudos são especialmente importantes em regiões com elevada diversidade, uma vez que estas regiões

apresentam acelerada perda de habitats (Brooks *et al.* 2002, Mittermeier *et al.* 2011). Contudo, poucos estudos exploraram os efeitos do manejo florestal associado aos efeitos da variação altitudinal em comunidades arbóreas de Florestas Tropicais, sob uma abordagem que incluía a história evolutiva das espécies pesquisadas (Srivastava *et al.* 2012, Feng *et al.* 2014, Monge-González *et al.* 2020).

Além da compreensão dos fatores e mecanismo associados aos padrões de variação dos diferentes componentes da diversidade, novas abordagens e ferramentas estatísticas permitem avançar nos estudos dentro da ecologia funcional (Wiegand *et al.* 2017, Körner 2018, Pistón *et al.* 2019). Em relação a abordagem funcional, a aplicação de técnicas estatísticas inovadoras, como a aprendizagem de máquinas (ver Elith *et al.* 2008, Pistón *et al.* 2019), permitem revisitar questões fundamentais sobre a funcionalidade dos atributos (Yang *et al.* 2018, Worthy & Swenson 2019). A ecologia funcional é baseada no pressuposto de que os atributos das espécies determinam seu sucesso (Violle *et al.* 2007). Contudo, fortes relações entre atributos funcionais e aptidão (ou *fitness*) são pouco encontradas na literatura (Griffith *et al.* 2016, Worthy & Swenson 2019). Isto ocorre, possivelmente, devido a efeitos ambientais nas interações entre aptidão e atributos, nos quais fenótipos alternativos podem levar a aptidões semelhantes (Yang *et al.* 2014, Pistón *et al.* 2019). A funcionalidade dos atributos das espécies pode ser melhor analisada por meio do uso do aprendizado de máquinas, como as *boosted regression trees*, que permitem a análise de grandes conjuntos de dados com diferentes tipos de distribuição entre as variáveis analisadas (De'ath 2007, Elith *et al.* 2008, Pistón *et al.* 2019). Portanto, a utilização de novas técnicas e ferramentas analíticas, e a inclusão dos efeitos ambientais na ecologia funcional se tornou importante para investigar os processos ecológicos que atuam sobre a coexistência de espécies e dinâmica de Florestas Tropicais (Wiegand *et al.* 2017, Martins *et al.* 2018).

A Floresta Atlântica, um *hotspot* de diversidade (Myers *et al.* 2000, Rezende *et al.* 2018), ocorre no leste do Brasil, englobando complexos montanhosos, como a Serra do Mar e

a Serra da Mantiqueira, cobrindo uma ampla variação latitudinal, longitudinal e altitudinal (Fiaschi & Pirani 2009) se apresentando como um sistema ecológico ideal para testar diversas hipóteses dentro da ecologia de comunidades. Assim, utilizando diferentes abordagens e métricas de diversidade, análises em diferentes arranjos de espécies e escalas espaciais, e um novo método de análise sobre a ecologia funcional, este projeto teve três objetivos gerais sobre a ecologia de comunidades arbóreas de Florestas Tropicais: (1) elucidar o efeito da variação altitudinal sobre o padrão de diversidade de espécies e diversidade filogenética, em diferentes arranjos de espécies (e.g. toda a comunidade vs. famílias mais abundantes); (2) analisar como o filtro ambiental de elevação e corte seletivo de madeira afetam a diversidade taxonômica e a estrutura filogenética de comunidades arbóreas, e se esses efeitos são mediados pela abordagem metodológica da escala espacial e taxonômica utilizada nas análises; e (3) associar as interações entre atributos funcionais, contextos de habitat e intervalo de tempo entre amostragens para avaliar como esses fatores moldam a demografia das espécies, separadamente e simultaneamente.

REFERÊNCIAS

- Ackerly, D. D. (2003). Community Assembly, Niche Conservatism, and Adaptive Evolution in Changing Environments. *International Journal of Plant Sciences*, 164(S3), S165–S184. doi: 10.1086/368401
- Brooks, T. M., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Fonseca, G. A. B. D. A., Rylands, A. B., Konstant, W. R., ... Hilton-taylor, C. (2002). Habitat Loss and Extinction in the Hotspots of Biodiversity. *Biodiversity Conservation*, 16(4), 909–923. doi: 10.1046/j.1523-1739.2002.00530.x
- Cadotte, M. W., Cavender-Bares, J., Tilman, D., & Oakley, T. H. (2009). Using phylogenetic, functional and trait diversity to understand patterns of plant community productivity. *PLoS ONE*, 4(5), 1–9. doi: 10.1371/journal.pone.0005695
- Cadotte, M. W., Dinnage, R., & Tilman, D. (2012). Phylogenetic diversity promotes ecosystem stability. *Ecology*. doi: 10.1890/11-0426.1
- Cirimwami, L., Doumenge, C., Kahindo, J. M., & Amani, C. (2019). The effect of elevation on species richness in tropical forests depends on the considered lifeform: results from an

- East African mountain forest. *Tropical Ecology*. doi: 10.1007/s42965-019-00050-z
- De'ath, G. (2007). Boosted trees for ecological modeling and prediction. *Ecology*. doi: 10.1890/0012-9658(2007)88[243:BTFEMA]2.0.CO;2
- Descombes, P., Vittoz, P., Guisan, A., & Pellissier, L. (2017). Uneven rate of plant turnover along elevation in grasslands. *Alpine Botany*. doi: 10.1007/s00035-016-0173-7
- Eiten, G. (1972). The cerrado vegetation of Brazil. *The Botanical Review*. doi: 10.1007/BF02859158
- Elith, J., Leathwick, J. R., & Hastie, T. (2008). A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*. doi: 10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x
- Elliott, T. L., & Davies, T. J. (2019). A comparison of phylogenetic and species beta diversity measures describing vegetation assemblages along an elevation gradient. *Journal of Vegetation Science*. doi: 10.1111/jvs.12700
- Faith, D. P. (1992). Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biological Conservation*, 61(1), 1–10. doi: 10.1016/0006-3207(92)91201-3
- Feng, G., Svenning, J. C., Mi, X., Jia, Q., Rao, M., Ren, H., ... Ma, K. (2014). Anthropogenic disturbance shapes phylogenetic and functional tree community structure in a subtropical forest. *Forest Ecology and Management*. doi: 10.1016/j.foreco.2013.10.047
- Fiaschi, P., & Pirani, J. R. (2009). Review of plant biogeographic studies in Brazil. *Journal of Systematics and Evolution*, 47(5), 477–496. doi: 10.1111/j.1759-6831.2009.00046.x
- Fitzpatrick, M. C., Sanders, N. J., Normand, S., Svenning, J. C., Ferrier, S., Gove, A. D., & Dunn, R. R. (2013). Environmental and historical imprints on beta diversity: Insights from variation in rates of species turnover along gradients. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. doi: 10.1098/rspb.2013.1201
- Gentry, A. H. (1988). Changes in Plant Community Diversity and Floristic Composition on Environmental and Geographical Gradients. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 75(1), 1–34.
- Gerhold, P., Cahill, J. F., Winter, M., Bartish, I. V., & Prinzing, A. (2015). Phylogenetic patterns are not proxies of community assembly mechanisms (they are far better). *Functional Ecology*, 29(5), 600–614. doi: 10.1111/1365-2435.12425
- Graham, C. H., Carnaval, A. C., Cadena, C. D., Zamudio, K. R., Roberts, T. E., Parra, J. L., ... Sanders, N. J. (2014). The origin and maintenance of montane diversity: Integrating evolutionary and ecological processes. *Ecography*. doi: 10.1111/ecog.00578
- Graham, C. H., & Fine, P. V. A. (2008). Phylogenetic beta diversity: Linking ecological and evolutionary processes across space in time. *Ecology Letters*. doi: 10.1111/j.1461-

0248.2008.01256.x

- Griffith, A. B., Salguero-Gómez, R., Merow, C., & McMahon, S. (2016). Demography beyond the population. *Journal of Ecology*. doi: 10.1111/1365-2745.12547
- Hooper, D. U., Chapin III, F. S., & Ewel, J. J. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75(1), 3–35. doi: 10.1890/04-0922
- Hubbell, S. P. (2001). Monographs in Population Biology. The unified neutral theory of biodiversity and biogeography. In *Monographs in Population Biology. The unified neutral theory of biodiversity and biogeography*.
- Ibanez, T., Keppel, G., Baider, C., Birkinshaw, C., Culmsee, H., Cordell, S., ... Birnbaum, P. (2018). Regional forcing explains local species diversity and turnover on tropical islands. *Global Ecology and Biogeography*. doi: 10.1111/geb.12712
- Kamimura, V. de A., Moraes, P. L. R. de, Ribeiro, H. L., Joly, C. A., & Assis, M. A. (2017). Tree diversity and elevational gradient: The case of Lauraceae in the Atlantic Rainforest. *Flora*, 234, 84–91. doi: 10.1016/j.flora.2017.05.013
- Khine, P. K., Kluge, J., Kessler, M., Miehe, G., & Karger, D. N. (2019). Latitude-independent, continent-wide consistency in climate–richness relationships in Asian ferns and lycophytes. *Journal of Biogeography*. doi: 10.1111/jbi.13558
- Kluge, J., Kessler, M., & Dunn, R. R. (2006). What drives elevational patterns of diversity? A test of geometric constraints, climate and species pool effects for pteridophytes on an elevational gradient in Costa Rica. 358–371. doi: 10.1111/j.1466-822x.2006.00223.x
- Körner, C. (2018). Concepts in empirical plant ecology. *Plant Ecology and Diversity*, 11(4), 405–428. doi: 10.1080/17550874.2018.1540021
- Laiolo, P., Pato, J., & Obeso, J. R. (2018). Ecological and evolutionary drivers of the elevational gradient of diversity. *Ecology Letters*. doi: 10.1111/ele.12967
- Legendre, P. (2019). A temporal beta-diversity index to identify sites that have changed in exceptional ways in space–time surveys. *Ecology and Evolution*. doi: 10.1002/ece3.4984
- Lieberman, D., Lieberman, M., Peralta, R., & Hartshorn, G. S. (2013). Tropical Forest Structure and Composition on a Large-Scale Altitudinal Gradient in Costa Rica. 84(2), 137–152. doi: 10.2307/2261350
- Martins, V. F., Seger, G. D. dos S., Wiegand, T., & Santos, F. A. M. dos. (2018). Phylogeny contributes more than site characteristics and traits to the spatial distribution pattern of tropical tree populations. *Oikos*. doi: 10.1111/oik.05142
- Mason, N. W. H., Mouillot, D., Lee, W. G., & Wilson, J. B. (2005). Functional richness,

- functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity. *Oikos*, 111(1), 112–118. doi: 10.1111/j.0030-1299.2005.13886.x
- McCain, C. M., & Grytnes, J.-A. (2010). Elevational Gradients in Species Richness. *Encyclopedia of Life Sciences*, 1-10. doi: 10.1002/9780470015902.a0022548
- Mittermeier, R. A., Turner, W. R., Larsen, F. W., Brooks, T. M., & Gascon, C. (2011). Global Biodiversity Conservation: The Critical Role of Hotspots. In *Biodiversity Hotspots* (pp. 3–22). doi: 10.1007/978-3-642-20992-5_1
- Monge-González, M. L., Craven, D., Krömer, T., Castillo-Campos, G., Hernández-Sánchez, A., Guzmán-Jacob, V., ... Kreft, H. (2020). Response of tree diversity and community composition to forest use intensity along a tropical elevational gradient. *Applied Vegetation Science*. doi: 10.1111/avsc.12465
- Myers, N., Myers, N., Mittermeier, R. a, Mittermeier, R. a, Fonseca, G. a B., Fonseca, G. a B., ... Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853–858. doi: 10.1038/35002501
- Nogués-Bravo, D., Araújo, M. B., Romdal, T., & Rahbek, C. (2008). Scale effects and human impact on the elevational species richness gradients. *Nature*. doi: 10.1038/nature06812
- Pavoine, S., & Bonsall, M. B. (2011). Measuring biodiversity to explain community assembly: A unified approach. *Biological Reviews*. doi: 10.1111/j.1469-185X.2010.00171.x
- Petchey, O. L., & Gaston, K. J. (2006). Functional diversity: Back to basics and looking forward. *Ecology Letters*. doi: 10.1111/j.1461-0248.2006.00924.x
- Petchey, O. L., Gaston, K. J., Downing, A. L., Mittelbach, G. G., Persson, L., Steiner, C. F., ... Woodward, G. (2004). Species loss and the structure and functioning of multitrophic aquatic systems. *Oikos*, 104(September 2003), 467–478. doi: 10.1111/j.0030-1299.2004.13257.x
- Petchey, O. L., Hector, A., & Gaston, K. J. (2004). How do different measures of functional diversity perform? *Ecology*. doi: 10.1890/03-0226
- Peters, M. K., Hemp, A., Appelhans, T., Behler, C., Classen, A., Detsch, F., ... Steffan-Dewenter, I. (2016). Predictors of elevational biodiversity gradients change from single taxa to the multi-taxa community level. *Nature Communications*. doi: 10.1038/ncomms13736
- Pistón, N., de Bello, F., Dias, A. T. C., Götzenberger, L., Rosado, B. H. P., de Mattos, E. A., ... Carmona, C. P. (2019). Multidimensional ecological analyses demonstrate how interactions between functional traits shape fitness and life history strategies. *Journal of Ecology*. doi: 10.1111/1365-2745.13190

- Preston, F. W. (1948). The Commonness, And Rarity, of Species. *Ecology*. doi: 10.2307/1930989
- Rahbek, C. (2005). The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns. *Ecology Letters*. doi: 10.1111/j.1461-0248.2004.00701.x
- Rahbek, C., & Museum, Z. (1995). The elevational gradient of species richness: a uniform pattern? *Ecography*, 2, 200–205. doi: 10.1111/j.1600-0587.1995.tb00341.x/pdf
- Rezende, C. L., Scarano, F. R., Assad, E. D., Joly, C. A., Metzger, J. P., Strassburg, B. B. N., ... Mittermeier, R. A. (2018). From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation*. doi: 10.1016/j.pecon.2018.10.002
- Ricotta, C. (2005). A note on functional diversity measures. *Basic and Applied Ecology*, 6(5), 479–486. doi: 10.1016/j.baae.2005.02.008
- Sanders, N. J., & Rahbek, C. (2012). The patterns and causes of elevational diversity gradients. *Ecography*. doi: 10.1111/j.1600-0587.2011.07338.x
- Srivastava, D. S., Cadotte, M. W., Macdonald, A. A. M., Marushia, R. G., & Mirotchnick, N. (2012). Phylogenetic diversity and the functioning of ecosystems. *Ecology Letters*, 15(7), 637–648. doi: 10.1111/j.1461-0248.2012.01795.x
- Subedi, S. C., Bhattarai, K. R., Perez, T. M., & Sah, J. P. (2020). Gymnosperm species richness patterns along the elevational gradient and its comparison with other plant taxonomic groups in the himalayas. *Frontiers of Biogeography*. doi: 10.21425/F5FBG44232
- Swenson, N. G. (2013a). The assembly of tropical tree communities - the advances and shortcomings of phylogenetic and functional trait analyses. *Ecography*, 36(3), 264–276. doi: 10.1111/j.1600-0587.2012.00121.x
- Swenson, N. G. (2013b). The assembly of tropical tree communities – the advances and shortcomings of phylogenetic and functional trait analyses. (November 2012), 264–276. doi: 10.1111/j.1600-0587.2012.00121.x
- Swenson, N. G., Enquist, B. J., Pither, J., Thompson, J., & Zimmerman, J. K. (2006). The problem and promise of scale dependency in community phylogenetics. *Ecology*. doi: 10.1890/0012-9658(2006)87[2418:TPAPOS]2.0.CO;2
- Violle, C., Navas, M., Vile, D., Kazakou, E., & Fortunel, C. (2007). Let the concept of trait be functional ! (January), 882–892. doi: 10.1111/j.2007.0030-1299.15559.x
- Webb, C. O., Ackerly, D. D., McPeck, M. a., & Donoghue, M. J. (2002). Phylogenies and Community Ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33(1), 475–505. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150448

- Whittaker, R. H. (1960). Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. Ecological Monographs. doi: 10.2307/1948435
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *taxon*. doi: 10.2307/1218190
- Wiegand, T., Uriarte, M., Kraft, N. J. B., Shen, G., Wang, X., & He, F. (2017). Spatially Explicit Metrics of Species Diversity, Functional Diversity, and Phylogenetic Diversity: Insights into Plant Community Assembly Processes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-110316-022936
- Worthy, S. J., & Swenson, N. G. (2019). Functional perspectives on tropical tree demography and forest dynamics. *Ecological Processes*. doi: 10.1186/s13717-018-0154-4
- Wright, E. P. (1878). Tropical Nature and other Essays. *Nature*. doi: 10.1038/018140a0
- Yang, J., Cao, M., & Swenson, N. G. (2018). Why Functional Traits Do Not Predict Tree Demographic Rates. *Trends in Ecology and Evolution*. doi: 10.1016/j.tree.2018.03.003
- Yang, J., Zhang, G., Ci, X., Swenson, N. G., Cao, M., Sha, L., ... Lin, L. (2014). Functional and phylogenetic assembly in a Chinese tropical tree community across size classes , spatial scales and habitats. (*Hubbell 2001*), 520–529. doi: 10.1111/1365-2435.12176

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, realizamos três estudos sobre temas centrais na ecologia de comunidades, usando um grande conjunto de dados de indivíduos arbóreos em um sistema montanhoso da Floresta Atlântica. Apesar de independentes, os estudos seguem uma ampliação de complexidade em suas abordagens, que refletem um breve alvorecer do meu conhecimento ecológico e as mudanças no meu pensamento científico.

Nossos resultados revelam a importância de que estudos em ecologia de comunidades usem uma abordagem taxonômica, evolutiva e funcional integrada para compreender, não apenas as relações de variação da diversidade ao longo de gradientes ambientais, mas também os processos e mecanismos ecológicos que conduzem ao padrão e funcionamento ecossistêmico. Salientamos haver melhor compreensão dos padrões de diversidade das comunidades vegetais ao longo de gradientes ambientais que foi observada por meio de análises em diferentes arranjos de espécies, ou seja, confrontando o padrão da comunidade com os padrões apresentados por suas famílias com maior abundância e das espécies raras.

Integramos análises de diversidade local (*alpha*) e regional (*beta*) sob ambas as abordagens, diversidade de espécies e filogenética, e apuramos os múltiplos processos ecológicos que conduzem os mecanismos de montagem de comunidades. Ao longo do gradiente de elevação na Floresta Atlântica, verificamos um padrão de variação monotônica e um decréscimo da diversidade de espécies e filogenética, respectivamente. A diferença nos resultados nos levou a compreender o papel da elevação na diversidade local, promovendo maior número de espécies em áreas de média elevação, apesar de conter maior diversidade de espécies da mesma família. Os resultados da diversidade regional abriram caminho para compreender que a limitação de dispersão não é um processo determinante na distribuição de espécies nesse ambiente, mas condições abióticas locais mais restritivas, como o solo sazonalmente alagadiço e temperaturas baixas em maiores elevações, são filtros ambientais que

levam a uma composição distinta. A partição de nicho parece ser um processo fundamental para manutenção da mega-diversidade de áreas intermediárias.

Diferentemente do que esperávamos, o corte seletivo de madeira e o filtro ambiental de elevação promoveram um aumento na diversidade filogenética. Além disso, esse padrão foi modificado? pelos clados usados na análise. A inclusão ou exclusão de um clado basal, as samambaias arbóreas (Cyatheaceae), nas análises filogenéticas, alterou os resultados encontrados. Com isso, pudemos compreender os efeitos de perda de diversidade em locais antropizados e como este distúrbio pode gerar diferentes consequências em comunidades sob diferentes condições climáticas. O filtro ambiental de elevação levou a uma estrutura filogenética agrupada de comunidades e ofuscou os efeitos da extração seletiva de madeira. Porém, quando o filtro de elevação foi excluído, encontramos que a abertura de nichos criados por perturbações na exploração madeireira, levando a maior co-ocorrência de espécies distantemente aparentadas, porém com menor diversidade de espécies. Além disso, os efeitos da elevação e da exploração madeireira foram melhor elucidados em larga escala nestas comunidades arbóreas tropicais. Assim, destacamos a relevância do desenho experimental para compreender o papel dos filtros ambientais e distúrbios nos processos que atuam na estruturação de comunidades.

Após explorar os padrões de diversidade sob uma perspectiva taxonômica e evolutiva, integramos a ecologia funcional com novas técnicas de análise de dados para compreender como os atributos das espécies moldam as suas taxas demográficas. Por meio da utilização do aprendizado de máquinas, muito aplicado em estudos com conjuntos de dados gigantescos e manipulações eleitorais, como a ocorrida em 2016 nos Estados Unidos da América e 2018 no Brasil, conseguimos melhorar os modelos de predição das relações entre atributos e taxas demográficas, utilizando o conceito de fenótipos multifuncionais com respostas demográficas semelhantes e os efeitos do contexto ambiental. As possibilidades de distintos fenótipos multifuncionais apresentarem taxas demográficas próximas foram considerados a partir das

interações entre os atributos das espécies, ou seja, verificamos a possibilidade de duas espécies diferentes em suas características, apresentarem taxas demográficas semelhantes por combinarem de forma diferente estes atributos. Essa premissa foi testada considerando, também, diferentes contextos ambientais, em que consideramos os tipos florestais e o período de amostragem dos dados (incluindo ou não um evento de seca) como fatores de influência na relação atributo-demografia. Concluímos que os estudos baseados em características devem considerar o contexto ambiental (espaço e tempo) e as interações de características para entender as mudanças na demografia das comunidades de árvores tropicais. Para avaliar quais, onde e quando os traços são funcionais, é necessário incorporar o conceito de fenótipos multifuncionais, resultante das interações dos atributos em diferentes habitats e período de avaliação.

No meu entendimento, esta tese demonstra a importância de considerar os estudos em ecologia de comunidade com uma grande visão integrada, principalmente, em sistemas ecológicos complexos e mega-diversos, como a Floresta Atlântica, para trazer novas formas de análises e auxiliar na compreensão questões ainda sem respostas, como os processos ecológicos e mecanismos que atuam na manutenção da co-ocorrência de um enorme número de espécies e indivíduos em floresta tropicais e o funcionamento de suas comunidades. Além disso, mostramos como técnicas de análises utilizadas em outras áreas, como o ‘aprendizado de máquina’ nos subcampos da Engenharia e da Ciência da Computação, podem ser uma grande contribuição para as nossas pesquisas em ecologia.