

JOSINEY FARIAS DE ARAÚJO

**Ecologia funcional e filogenética da vegetação das Cangas de Carajás:
Fisionomias, quantidade de habitat e heterogeneidade**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ecologia do convênio da Universidade Federal do Pará e Embrapa Amazônia Oriental, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ecologia.

Área de concentração: Ecologia

Linha de pesquisa: Ecologia de Comunidades e Ecossistemas

Orientador: Dr. Markus Gastauer
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Grazielle
Sales Teodoro

Belém
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A658e Araújo, Josiney Farias de.
 Ecologia funcional e filogenética da vegetação das Cangas de
 Carajás: Fisionomias, quantidade de habitat e heterogeneidade /
 Josiney Farias de Araújo. — 2021.
 60 f. : il. color.

 Orientador(a): Prof. Dr. Markus Gastauer
 Coorientação: Prof^a. Dra. Grazielle Sales Teodoro
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
 Instituto de Ciências Biológicas, Programa de Pós-Graduação em
 Ecologia, Belém, 2021.

 1. Ecologia de comunidades. 2. Diversidade. 3. Plantas. 4.
 Composição funcional. 5. Modelagem. I. Título.

CDD 581

JOSINEY FARIAS DE ARAÚJO

**Ecologia funcional e filogenética da vegetação das Cangas de Carajás:
Fisionomias, quantidade de habitat e heterogeneidade**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia do convênio da Universidade Federal do Pará e Embrapa Amazônia Oriental, que será avaliado pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dra. Bárbara Dunck Oliveira
Universidade Federal do Pará (Membro interno)

Prof. Dr. João Augusto Alves Meira-Neto
Universidade Federal de Viçosa (Membro externo)

Dr. Leonardo Carreira Trevelin
Instituto Tecnológico Vale (Membro externo)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, força e coragem para enfrentar todos os obstáculos, além de todas as suas bençãos.

A Universidade Federal do Pará (UFPA) e Instituto Tecnológico Vale (ITV) pela oportunidade na realização do mestrado em Ecologia.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, por todo o apoio financeiro da bolsa de estudo, que foi fundamental para a realização deste curso de mestrado.

Aos meus familiares pelo incentivo e apoio em meus estudos, sem os quais não seria possível a realização deste objetivo.

Aos meus orientadores Markus Gastauer e Grazielle Sales Teodoro pela disponibilidade da orientação e paciência durante esses dois anos de mestrado.

Além de todos os professores das disciplinas cursadas no programa de mestrado em Ecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Ecologia (PPGeco).

Aos meus amigos do Laboratório de Ecologia de Produtores Primários (Ecopro), Laboratório de Ecologia e Conservação (Labeco) e Instituto Tecnológico Vale (ITV).

Sumário

RESUMO.....	5
<i>ABSTRACT</i>.....	6
1. INTRODUÇÃO	9
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
2.1. Área de estudo	11
2.2. Amostragem da vegetação.....	12
2.3. Estrutura e diversidade filogenética	12
2.4. Resolução filogenética.....	14
2.5. Estrutura e diversidade funcional	14
2.6. Sinal filogenético.....	18
3. RESULTADOS	18
4. DISCUSSÃO	24
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

Ecologia funcional e filogenética da vegetação das Cangas de Carajás:

Fisionomias, quantidade de habitat e heterogeneidade

RESUMO

Os estudos em ecologia de comunidades podem proporcionar uma melhor compreensão a respeito dos fatores evolutivos e ecológicos que estão associados a formação de comunidades. A utilização de análises como a estrutura e diversidade filogenética contribuem diretamente para entender os processos de montagem em comunidades a partir dos padrões observados em ocorrências das espécies. Quando os caracteres são conservados em linhagens evolutivas, as análises filogenéticas representam ferramentas poderosas na revelação do agrupamento e superdispersão filogenética na estruturação de comunidades. Enquanto a utilização da estrutura e diversidade funcional oferecem um melhor entendimento em relação às respostas evolutivas das espécies no ambiente. Assim, o objetivo do estudo foi avaliar a estrutura filogenética e funcional das Cangas Ferruginosas na Serra de Carajás, no estado do Pará, visando compreender os processos que organizam esses ecossistemas. As Cangas são ecossistemas que apresentam um conjunto de características ambientais adversas ao desenvolvimento de plantas, mas demonstram uma elevada biodiversidade que está submetida a ameaças (e.g. atividade de mineração, pouca extensão espacial, dentre outros), enquadrando-se em áreas prioritárias de conservação. Esses ecossistemas são marcados por pequenas variações ambientais que criam mosaicos de diferentes fisionomias como o Campo Herbáceo com condições ambientais mais severas, tais como solos mais rasos com inundações periódicas e Capão Florestal com condições mais favoráveis, como solos mais profundos. Foram amostradas 48 parcelas com dimensões de 20×10 m em quatro fisionomias: Campo Herbáceo, Campo Arbustivo, Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* e Capão Florestal. Na análise da estrutura e diversidade filogenética foi utilizado o software Phylocom-4.2 para calcular o índice de parentesco líquido (NRI), índice de táxon mais próximo (NTI) e diversidade filogenética (PD) utilizando o modelo nulo sem restrição que mantém a riqueza de cada parcela. Para a estrutura e diversidade funcional foram escolhidas 8 características, sendo elas, a forma de vida, forma de crescimento, área foliar específica, nitrogênio e fósforo foliar, δN^{15} e δC^{13} foliar. Para tal, foram produzidas matrizes de características e as análises de diversidade funcional como a riqueza funcional (FRic), dispersão funcional (FDis), regularidade funcional (FEve) e divergência funcional (FDiv) foram realizadas no software R versão 3.6. Enquanto a estrutura funcional foi realizada no software Phylocom-4.2. Em relação a filogenia, os resultados diferiram entre as fisionomias, determinando agrupamentos filogenéticos ao Campo Herbáceo, Campo Arbustivo e Capão Florestal, enquanto o Campo Arbustivo de *Vellozia* possui uma superdispersão filogenética. Na parte funcional, o Capão Florestal apresentou o maior agrupamento, diferindo das demais fisionomias. O Campo Herbáceo apresentou agrupamento maior quando comparado às fisionomias de Campo Arbustivo e Campo Arbustivo dominado por *Vellozia*. Assim, neste estudo foram encontradas diferenças significativas entre as fisionomias de Cangas em relação à estrutura filogenética, estrutura funcional, diversidade filogenética e diversidade funcional. Portanto, torna-se indispensável que todo o gradiente ambiental seja preservado para que diferentes processos ecológicos que atuam na formação da comunidade sejam conservados.

Palavras-chave: Ecologia de comunidades, diversidade, plantas.

Functional and phylogenetic ecology of the vegetation of the Cargas: Physiognomies, amount of habitat and heterogeneity

ABSTRACT

Studies in community ecology can provide a better understanding of the evolutionary and ecological factors that are associated with the formation of communities. The use of analyzes such as phylogenetic structure and diversity directly contribute to understand the assembly processes in communities from the patterns observed in species occurrences. When characters are conserved in evolutionary lineages, phylogenetic analyzes represent powerful tools in revealing the phylogenetic grouping and overdispersion in structuring communities. While the use of structure and functional diversity offers a better understanding of the evolutionary responses of species in the environment. Thus, the objective of the study was to evaluate the phylogenetic and functional structure of Ferruginous Cangas in Serra de Carajás, in the state of Pará, in order to understand the processes that organize these ecosystems. Cangas are ecosystems that present a set of environmental characteristics adverse to the development of plants, but demonstrate a high biodiversity that is subject to threats (e.g. mining activity, little spatial extension, among others), falling within priority conservation areas. These ecosystems are marked by small environmental variations that create mosaics of different physiognomies such as Grassland with more severe environmental conditions, such as shallower soils with periodic flooding and Woodland with more favorable conditions, such as deeper soils. 48 plots with dimensions of 20×10 m were sampled in four physiognomies: Grassland, Shrubland, Shrubland dominated by Vellozia and Woodland. Phylocom-4.2 software was used to analyze the structure and phylogenetic diversity to calculate the net relatedness index (NRI), the nearest taxon index (NTI) and phylogenetic diversity (PD) using the null model without constriction that maintains the richness of each installment. For the structure and functional diversity, 8 characteristics were chosen, namely, the life form, growth form, specific leaf area, leaf nitrogen and phosphorus, $\delta N15$ and $\delta C13$ leaf. To this end, matrices of characteristics were produced and analyzes of functional diversity such as functional richness (FRic), functional dispersion (FDis), functional regularity (FEve) and functional divergence (FDiv) were performed using software R version 3.6. While the functional structure was performed using the Phylocom-4.2 software. Regarding phylogeny, the results differed between physiognomies, determining phylogenetic clusters in Grassland, Shrubland and Woodland, while Shrubland dominated by Vellozia has a phylogenetic overdispersion. In the functional part, Woodland presented the largest group, differing from the other physiognomies. Grassland presented a larger group when compared to the physiognomies of Shrubland and Shrubland dominated by Vellozia. Thus, in this study significant differences were found between the physiognomies of Cangas in relation to the phylogenetic structure, functional structure, phylogenetic diversity and functional diversity. Therefore, it is essential that the entire environmental gradient is preserved so that different ecological processes that act in the formation of the community are preserved.

Keywords: Community ecology, diversity, plants.

Lista de ilustrações

- Figura 1** - Mapa de localização do mosaico de conservação da região de Carajás. Em destaque as três Serras: Norte, Bocaina e Sul (em marrom) e locais de coletas das parcelas (pontos verdes)10
- Figura 2** - Diferentes fisionomias das Cangas Ferruginosas em Carajás: A) Campos Herbáceos; B) Campos Arbustivos; C) Campos Arbustivos (*Vellozia*); D) Capão Florestal11
- Figura 3** - Índice de parentesco líquido (NRI), índice do táxon mais próximo (NTI) e diversidade filogenética (PD) nos estratos em conjunto em quatro fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras que são diferentes determinam as diferenças significativas entre as fisionomias18
- Figura 4** - Índice de parentesco líquido (NRI), índice do táxon mais próximo (NTI) e diversidade filogenética (PD) em quatro fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras diferentes determinam as diferenças significativas entre as fisionomias nos estratos arbóreo e herbáceo20
- Figura 5** - Índice de parentesco líquido (NRI) e índice do táxon mais próximo (NTI) em fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras diferentes determinam as diferenças significativas nas fisionomias na comunidade total, estratos arbóreo e herbáceo23
- Figura 6** - Riqueza Funcional (FRic), Dispersão Funcional (FDis), Regularidade Funcional (FEve) e Divergência Funcional em fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras diferentes determinam as diferenças significativas nas fisionomias na comunidade total, estrato arbóreo e herbáceo24

Lista de Tabelas

- Tabela 1.** Características funcionais de angiospermas para análises em Cangas Ferruginosas15
- Tabela 2.** Resultados da inclinação da reta (z), desvio padrão (DP) e regressão (R^2) da estrutura e diversidade filogenética das comunidades filogenia não resolvido e resolvido aleatoriamente20
- Tabela 3.** Resultados do sinal filogenético realizado pela abordagem do teste de λ de Pagel, o qual foi produzido a partir de plantas de Cangas Ferruginosas. Os valores apresentados abaixo são respectivos dos resultados que foi aleatorizado em um total de 999 aleatorizações21
- Tabela 4.** Sinal filogenético no qual os valores de NRI forma de vida, indicam uma característica agrupada na filogenia, ou seja, em situações de espécies com uma forma de vida semelhante e filogeneticamente mais aparentado do que o esperado quando comparado ao acaso. Os valores em N são os números de espécies por forma de vida e p indica a probabilidade de NRI forma de vida ser maior que zero, em comparação de 10.000 randomizações21

1. INTRODUÇÃO

Os estudos em ecologia comunitária podem proporcionar uma melhor compreensão sobre os fatores evolutivos e ecológicos que estão relacionados com a formação de comunidades (QIAN, *et al.*, 2014). A utilização de análise filogenética contribui diretamente para entender a respeito dos processos de montagem em comunidades a partir dos padrões observados em ocorrências das espécies (GERHOLD, *et al.*, 2015). Processos evolutivos, como especiações simpátrica e alopátrica, bem como filtragem ambiental e interações competitivas atuam na montagem de comunidades, podendo resultar em padrões de agrupamento filogenético (i.e. alto parentesco em espécies coexistentes) ou a superdispersão filogenética (i.e. baixo parentesco, GASTAUER, *et al.*, 2017). Além disso, processos neutros (MATOS, 2013), dinâmicas temporais de nicho (LOSOS, 2008), facilitação (CARRION, *et al.*, 2017) e interações flores-polinizadores (MARTINS, 2013) podem influenciar a estrutura e a diversidade filogenética. Embora haja avanços nos estudos e revisões em análises filogenéticas, até recentemente, poucos estudos focaram nas composições de vegetação aberta (ZAPPI, *et al.*, 2017).

Diante do desafio de entender a formação das comunidades e as principais forças que influenciam em sua diversidade, tem sido utilizado uma abordagem conjunta envolvendo filogenia e características funcionais das espécies (YANG, *et al.*, 2014). A utilização de características funcionais das plantas oferece um melhor entendimento sobre as respostas evolutivas das plantas em relação a história de vida, clima, associação hídrica, competição e outros fatores (BARALOTO, *et al.*, 2012). Portanto, as características funcionais são excelentes indicadores dos mecanismos ecológicos e preditores das respostas das comunidades ecológicas às mudanças ambientais. Assim, tornam-se fundamentais na compreensão das interações entre as plantas e o ambiente no qual estão inseridas (SATDICHANH, *et al.*, 2015).

As similaridades evolutivas e ecológicas entre as espécies que co-ocorrem são informações essenciais que devem ser utilizadas nos estudos dos mecanismos que estão relacionados com a montagem de comunidades (SWENSON, 2013). Assim, se espécies aparentadas são mais similares em suas características (conservação de caracteres), os fatores abióticos proporcionam uma seleção que favorecem determinadas características funcionais, ou seja, os indivíduos filtrados estarão funcionalmente mais semelhantes, devido o sinal filogenético. Enquanto a ausência deste sinal pode indicar que as espécies são menos aparentadas (SOBRAL & CIANCIARUSO, *et al.*, 2012). Entretanto, interações ecológicas podem resultar em uma exclusão competitiva das espécies funcionalmente mais semelhantes, causando uma superdispersão funcional das espécies nas comunidades ecológicas (BATALHA, *et al.*, 2011; CAVENDER-BARES, *et al.*, 2009).

Um ambiente que oferece um interessante modelo para investigar os processos dominantes na montagem em comunidades são as Cangas Ferruginosas de Carajás. Esses ambientes são dominados por vegetação aberta e encontram-se ameaçados devido atividades de mineração, pouca extensão espacial e mudanças climáticas, enquadrando-se em áreas prioritárias para conservação (ZAPPI, *et al.*, 2017). Esses ecossistemas são caracterizados por alta taxa de radiação solar, elevadas concentrações de metais, solos ácidos, baixa disponibilidade de nutrientes e deficiência hídrica (MOTA, *et al.*, 2018; CARMO, *et al.*, 2012). Os diversos tipos vegetacionais encontrados nas Cangas são marcados por variações ambientais em composições de solo, desde areia pura até camada orgânica, formando um mosaico de diferentes fisionomias de vegetação que variam de pradarias, matagais rupestres e pequenas florestas (SCHAEFER, *et al.*, 2018). Assim, os Campos Herbáceos apresentam solos mais rasos e inundações periódicas (SCHAEFER, *et al.*, 2016a), os Campos Arbustivos, possuem solos com acúmulo de matéria orgânica, os Campos Arbustivos dominados pelo gênero *Vellozia* (NUNES, *et al.*, 2015) e Capão Florestal que possuem solos mais profundos com acúmulo de nutriente e água, permitindo a presença de matas altas (SCHAEFER, *et al.*, 2016b).

Assim sendo, esse ecossistema possui a presença de diferentes estratos como o herbáceo-arbustivo e arbóreo (SCALON, *et al.*, 2012). Silva, *et al.*, 2012 destacam ser relevante o estudo da vegetação de maneira estratificada e conjunta na comunidade para um melhor entendimento das variadas características, dinâmica e interações entre a composição dos estratos que são organizados a partir de diferenças delimitativas entre a vegetação dos ambientes. Além disso, avaliar a estrutura filogenética e funcional dos gradientes fisionômicos irão possibilitar uma maior compreensão a respeito dos processos relacionados a formação dessas comunidades ao longo dos gradientes. Zappi, *et al.*, (2017) ainda citam que analisar os processos ecológicos atuais nas Cangas são fundamentais para a conservação desses ecossistemas que estão submetidos a impactos de ações antrópicas.

Neste contexto, testamos as hipóteses utilizando a vegetação de modo conjunto e estratificada visando um melhor entendimento em diversas características e dinâmica na composição da vegetação em diferentes maneiras: i) em fisionomia com condições ambientais menos favoráveis ao desenvolvimento de plantas (Campo Herbáceo) há um maior agrupamento na estrutura filogenética e funcional, indicando uma maior atuação dos fatores abióticos; ii) em fisionomias do Campo Arbustivo e Arbustivo dominados por *Vellozia* há menor superdispersão na estrutura filogenética e funcional em comparação ao Capão Florestal, uma vez que o Capão apresenta condições mais favoráveis; iii) fisionomia com condições ambientais mais severas (Campo Herbáceo) apresentam menor diversidade filogenética, enquanto a alta competição e diferenciação de nicho aumentam a diversidade funcional em fisionomias com condições menos severas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na região da Serra dos Carajás, localizado no sudeste do estado do Pará ($05^{\circ}52'S-06^{\circ}33'S$, $49^{\circ}53'W-50^{\circ}45'W$), entre os municípios de Água Azul do Norte, Canaã dos Carajás e Parauapebas. A região é composta por um conjunto de serras recortadas e alinhadas de acordo com a direção W-NW e E-SE. Em relação ao contexto regional na localidade sul do Pará, a região da Serra dos Carajás apresenta cenários com elevações em torno de 500 e 700 metros de altitude (GIANNINI, *et al.*, 2016; MOTA, *et al.*, 2015; VIANA, *et al.*, 2016) (**Figura 1**).

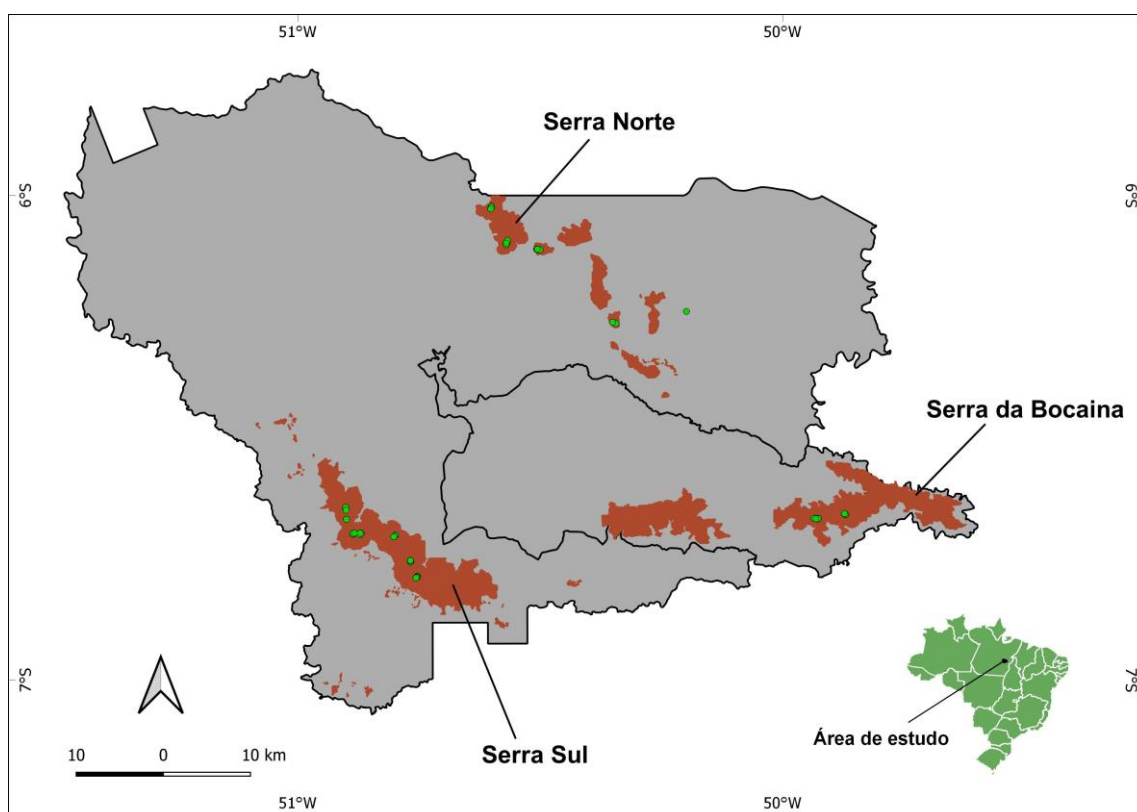


Figura 1 - Mapa de localização do mosaico de conservação da região de Carajás. Em destaque as três Serras: Norte, Bocaina e Sul (em marrom) e locais de coletas das parcelas (pontos verdes).

Baseado na classificação de Köppen, o clima da região é “Aw”, apresentando uma característica acentuadamente tropical (quente e úmido). O período mais seco acontece entre os meses de junho e agosto, enquanto os maiores valores pluviométricos ocorrem de janeiro até março. A média da precipitação acumuladas anual é 2.033 milímetros. A temperatura média mensal varia entre $25,1^{\circ}C$ e $26,3^{\circ}C$, sendo a mínima em torno de $15,6^{\circ}C$ e $18,3^{\circ}C$ e a máxima em torno de $34,3^{\circ}C$ e $38,1^{\circ}C$ (VIANA, *et al.*, 2016; SOUZA-FILHO, *et al.*, 2019; STCP, 2003; BARBOSA, *et al.*, 2020).

2.2. Amostragem da vegetação

A coleta de dados ocorreu em 3 serras que são a Serra Norte, a Serra Sul e a Serra de Bocaina na região de Carajás pertencentes a duas unidades de conservação (Flona de Carajás e Parque Nacional dos Campos Ferruginosos) que está localizado na Amazônia Oriental, Pará, Brasil. Foram dispostos 12 transectos em diferentes partes das Cangas, esses transectos foram previamente definidos com base na frequência das fisionomias em campo e acesso para alcançar a cobertura de maneira mais completa da vegetação, sendo a distância com relação aos transectos de 100 metros (m). As angiospermas foram amostradas em 48 parcelas com dimensões de 20×10 m de maneira estratificada em quatro fisionomias de Cangas, sendo elas, Campo Herbáceo, Campo Arbustivo, Campo Arbustivo (*Vellozia*) e Capão Florestal (**Figura 2**).



Figura 2 - Diferentes fisionomias das Cangas Ferruginosas em Carajás: A) Campos Herbáceos; B) Campos Arbustivos; C) Campos Arbustivos (*Vellozia*); D) Capão Florestal.

Em relação as diferentes fisionomias (**Figura 2**) que apresentam as Cangas, os Campos Herbáceos são considerados o que possuem os solos mais rasos e drenados moderadamente, além da presença de estrato graminoide com predominância de famílias como a *Cyperaceae* e *Poaceae*. Os Campos Arbustivos com solos bem secos nos períodos de seca e acúmulo de matéria orgânica, os Campos Arbustivos de *Vellozia* que apresentam os bolsões de matéria orgânica, além disso, são dominados pela espécie *Vellozia glochidea* Pohl e por último o Capão Florestal que os solos são

considerados mais profundos, portanto, permitindo uma flora mais abundante e indivíduos com maiores tamanhos corporais (SCHAEFER, *et al.*, 2016; VASCONCELOS, *et al.*, 2016).

2.3. Estrutura e diversidade filogenética

Para a análise da estrutura e diversidade filogenética foi utilizado o software Phylocom-4.2, sendo amostradas um total de 216 espécies de angiospermas nas Cangas, que estão distribuídas em 145 gêneros e 60 famílias. Em relação ao estrato arbóreo foram inventariadas 89 espécies, 68 gêneros e 37 famílias e no estrato herbáceo foram 189 espécies, 127 gêneros e 55 famílias. As espécies coletadas e registradas foram inseridas na megatree R20160415.new (GASTAUER & MEIRANETO, 2017) usando a função phylomatic (WEBB & DONOGHUE, 2005), sendo calibrada utilizando as estimativas de idades de nós internos (MAGALLÓN, *et al.*, 2015).

Na parte relacionada a estrutura filogenética, foram utilizadas as seguintes medidas: o índice de parentesco líquido (NRI) e índice do táxon mais próximo (NTI). O $NRI = (MPD_{rand} - MPD_{obs}) / SD(MPD_{rand})$. Desta maneira, o MPD (distância média dos pares) obs é a MPD observada entre as espécies que co-ocorrem na comunidade, MPD_{rand} representa a MPD média das randomizações e $SD(MPD_{rand})$ representa o desvio padrão dos MPDs das randomizações (GASTAUER & MEIRANETO, 2014). O NRI foi utilizado para medir a distância filogenética média em relação aos pares de táxons, sendo uma métrica mais sensível aos padrões de agrupamento filogenético das espécies (COMITA, *et al.*, 2018).

Entretanto, $NTI = (MNND_{rand} - MNND_{obs}) / SD(MNND_{rand})$. Deste modo, a MNND (distância média entre os vizinhos mais próximos) obs é a MNND observada entre as espécies que co-ocorrem na amostra, $MNND_{rand}$ representa a média das MNND de randomizações na amostra e $SD(MNND_{rand})$ representa o desvio padrão de MNND das randomizações (GASTAUER & MEIRANETO, 2014). O NTI foi utilizado para medir a distância média com relação a cada táxon e os vizinho mais próximo, sendo uma métrica mais relacionada aos táxons terminais, ou seja, gêneros ou famílias. Além disso, pode capturar os efeitos das escalas evolutivas mais recentes (COMITA, *et al.*, 2018; COPPI, *et al.*, 2019).

Também foi realizada a análise de diversidade filogenética (PD) que mede a soma total dos comprimentos dos ramos em espécies ocorrentes em cada parcela (FAITH, 2015). Para indicar se a PD é formada por espécies mais próximas filogeneticamente ou espécies mais distantes filogeneticamente em comparação ao acaso foi utilizada as relações filogenéticas entre as espécies co-ocorrentes na comunidade. Depois, os resultados foram comparados ao modelo nulo sem restrição

que mantém a riqueza das espécies constante em cada comunidade, mas produz aleatorizações em suas identidades, tornando-se possível que cada espécie que foi amostrada na filogenia tenha chance igual de ser incluída nas comunidades aleatorizadas (KEMBEL & HUBBELL, 2006), utilizando 999 aleatorizações.

Para testar se os valores das variáveis respostas da estrutura filogenética (NRI e NTI) em diferentes fisionomias (variáveis preditoras) diferem do esperado pelo acaso, foram realizados testes T comparando os valores por fisionomia com o valor zero. Devido esse valor ser esperado em comunidades ecológicas que não possuem estrutura filogenética. Para avaliar se existem diferenças significativas entre as fisionomias de Cangas foi aplicado um teste de Análise de Variância (ANOVA), seguido do teste *post-hoc* de Tukey após a verificação da distribuição normal e homocedasticidade dos dados.

2.4. Resolução filogenética

A existência de mais de duas espécies em um único gênero e a presença de mais de dois gêneros em uma única família origina as politomias por meio da função *phylomatic* no software *Phylocom* 4.1. Dessa maneira, o número de politomias na filogenia é uma medida a partir da ausência de resolução filogenética (SWENSON, 2009). Na verificação se a ausência de resolução filogenética influenciou nos resultados da estrutura e diversidade filogenética da comunidade de Cangas, foram resolvidas todas as politomias existentes na filogenia aleatoriamente em um total de 999 vezes utilizando a função '*multi2di*' que pertence ao pacote “picante” na versão R 3.6 (R CORE TEAM, 2019). Em seguida, cada filogenia totalmente resolvida foi calibrada com o algoritmo BLADJ (*Phylocom*-4.2), antes das análises das métricas: MPD, MNTD, NRI, NTI e PD serem calculados conforme é descrito em (MIAZAKI, *et al.*, 2015).

2.5. Estrutura e diversidade funcional

Foi também investigado a diversidade e estrutura funcional produzida a partir de características das espécies (**Tabela 1**), no qual foram utilizadas 8 características funcionais das plantas, sendo duas características qualitativas e seis quantitativas das angiospermas. Para tal análise, foram produzidas matrizes de características funcionais, sendo nas colunas as características funcionais selecionadas e nas linhas as espécies que foram registradas nas comunidades.

Para obtenção dos dados de altura, forma de vida e forma de crescimento foram realizadas consultas em literatura especializada em bases de dados online e com fácil acesso à informação como:

<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/PrincipalUC/PrincipalUC.do;jsessionid=F263DB5F1D>

Forma de crescimento	-	Categorias de classificação, no qual a prevalência de uma determinada forma de vida pode indicar a respeito das condições climáticas e disponibilidade de nutrientes do ambiente.	Pèrez-Harguindeguy, <i>et al.</i> , (2013)
Área específica da folha (SLA)	mm ² .mg ⁻¹	Indica sobre o padrão de alocação dos recursos para a construção dos tecidos foliares. Possui uma relação positiva com a taxa de crescimento relativo, taxa fotossintética e também a concentração de nitrogênio foliar. Geralmente apresenta relação negativa com a longevidade foliar e conteúdo de matéria seca foliar.	Pèrez-Harguindeguy, <i>et al.</i> , (2013)
Concentração de nitrogênio (N) e fósforo (P) foliar	mg	Associação com a taxa de crescimento relativo, o valor nutricional e a taxa fotossintética da planta.	Pèrez-Harguindeguy, <i>et al.</i> , (2013)
Nitrogênio (δN^{15}) foliar	%	Indicação da fonte de N absorvida e utilizada pelas plantas. Podendo relacionar-se com a produtividade e crescimento das plantas.	Dawson, <i>et al.</i> , (2002) Craine, <i>et al.</i> , (2015)

Carbono (δC^{13}) foliar	%	Relação com a qualidade do habitat e a discriminação bioquímica no processo fotossintético. Relaciona-se também com a eficiência intrínseca no uso da água.	Escudero, <i>et al.</i> , (2008) Mitre, <i>et al.</i> , (2018) Dawson, <i>et al.</i> , (2002)
Altura	m	Está associado com a forma de crescimento, a posição vertical no gradiente de luminosidade e a capacidade competitiva de luminosidade.	Pèrez-Harguindeguy, <i>et al.</i> , (2013)

Para a caracterização da diversidade funcional das Cangas amostradas, foi construído um dendrograma funcional, a partir de uma matriz de características das espécies (PETCHEY & GASTON, 2002; PETCHEY & GASTON, 2006). Na construção da matriz de distância a partir da matriz de características funcionais das espécies, utilizou-se a distância Gower que é recomendada por PODANI & SCHMERA (2006), uma vez que essa medida de distância permite a utilização de variáveis qualitativas e quantitativas, além de tolerar valores ausentes. Posteriormente, foi utilizado a função “hclust” para realizar um agrupamento hierárquico das espécies de plantas.

Finalmente, a estrutura funcional da comunidade ecológica foi calculada como o índice de parentesco líquido (NRI) e índice de táxon mais próximo (NTI, WEBB, *et al.*, 2008) para cada parcela. Desta maneira esta análise da estrutura funcional foi utilizada com a finalidade de verificar se as espécies de angiospermas que coexistem na comunidade são mais ou menos semelhantes funcionalmente uma em relação a outra.

Depois disto, os resultados dos valores médios funcionais das Cangas em cada parcela foram comparados ao modelo nulo sem restrição, que mantém a riqueza das espécies constante em cada comunidade ecológica, mas produz aleatorizações em suas identidades. Isso torna possível que cada espécie que foi amostrada na estrutura funcional tenha chance igual de ser incluída nas comunidades aleatorizadas (KEMBEL & HUBBELL, 2006), sendo que foi realizado a partir de 999 aleatorizações.

Para verificar se existem diferenças significativas na variável resposta (NRI e NTI) em diferentes fisionomias (variáveis preditoras), foi aplicado um teste de Análise de Variância (ANOVA), seguido do teste *post-hoc* de Tukey após verificação da distribuição normal e homocedasticidade dos dados.

2.6. Sinal filogenético

Foi testado o sinal filogenético a partir da árvore filogenética gerada no software Phylocom-4.2 e os dados coletados das características funcionais (**Tabela 1**). Todas essas características funcionais que foram registradas em Cangas estão sendo consideradas para todas as 216 espécies de angiospermas que foram coletadas nesses ecossistemas ferruginosos.

Na medição do sinal filogenético em associação das características funcionais no decorrer de caminhos evolutivos das espécies, foi realizado o teste λ (Lambda), conforme indicado por Chun & Lee, (2019). Esse teste foi produzido a partir do pacote “picante” por meio da função “phylosignal” para análises de características quantitativas (KECK, *et al.*, 2016). Dessa forma, $\lambda = 1$ revela a elevada presença de sinal filogenético, enquanto $\lambda = 0$ demonstra a ausência e λ entre valores 0 e 1 determina um menor sinal filogenético. No teste da significância estatística foram utilizadas 1.000 aleatorizações nos valores das características funcionais (CHUN & LEE, 2019).

Para o teste do sinal filogenético da forma de vida foi seguida a metodologia proposta por GASTAUER, *et al.*, (2017). Assim sendo calculado o NRI entre todas as espécies com a mesma forma de vida que foi denominado de NRI forma de vida. Esse processo foi obtido a partir do embaralhamento em rótulos dos táxons por 10.000 randomizações na filogenia.

Os resultados dos valores de NRI forma de vida foram considerados significativos, quando obtiveram os valores diferente de zero (< -1.96 ou > 1.96), assim indicando a presença do sinal filogenético. A forma de vida foi considerada significativa quando o MPD observado aconteceu em níveis mais baixos de 2,5 %, 1 % ou 0,1 % da distribuição de distâncias em relação aos modelos nulos, correspondendo aos níveis de significância de 0,05, 0,01 ou 0,001 de maneira respectiva.

3. RESULTADOS

Nos resultados da estrutura filogenética da comunidade geral, a maioria das parcelas que foram amostradas, demonstraram valores positivos para o índice de NRI, indicando um agrupamento filogenético das Cangas Ferruginosas como um todo (0.850 ± 1.531 , $p < 0.001$). Em relação ao índice de NTI, a metade das parcelas obtiveram valores menores do que o valor zero e a outra metade das

parcelas apresentaram valores positivos. Dessa maneira, não foi encontrada uma estrutura filogenética que difere da expectativa nula (0.061 ± 1.396 , $p < 0.001$).

Os resultados que foram obtidos de NRI e NTI em conjunto dos estratos diferem entre as fisionomias de Cangas. Os valores de NRI e NTI determinaram um agrupamento filogenético no Campo Herbáceo e Capão Florestal. Em relação ao Campo Arbustivo houve também um agrupamento filogenético, mas somente em NRI. Entretanto, o Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* apresentou uma superdispersão filogenética nos valores de NRI e NTI ($p > 0.001$). Em relação a diversidade filogenética, conforme esperado pelas hipóteses do estudo, os valores demonstraram menor diversidade filogenética ao Campo Herbáceo quando comparada às demais fisionomias. O Capão Florestal apresentou maior diversidade filogenética ($p > 0.001$) (**Figura 3**).

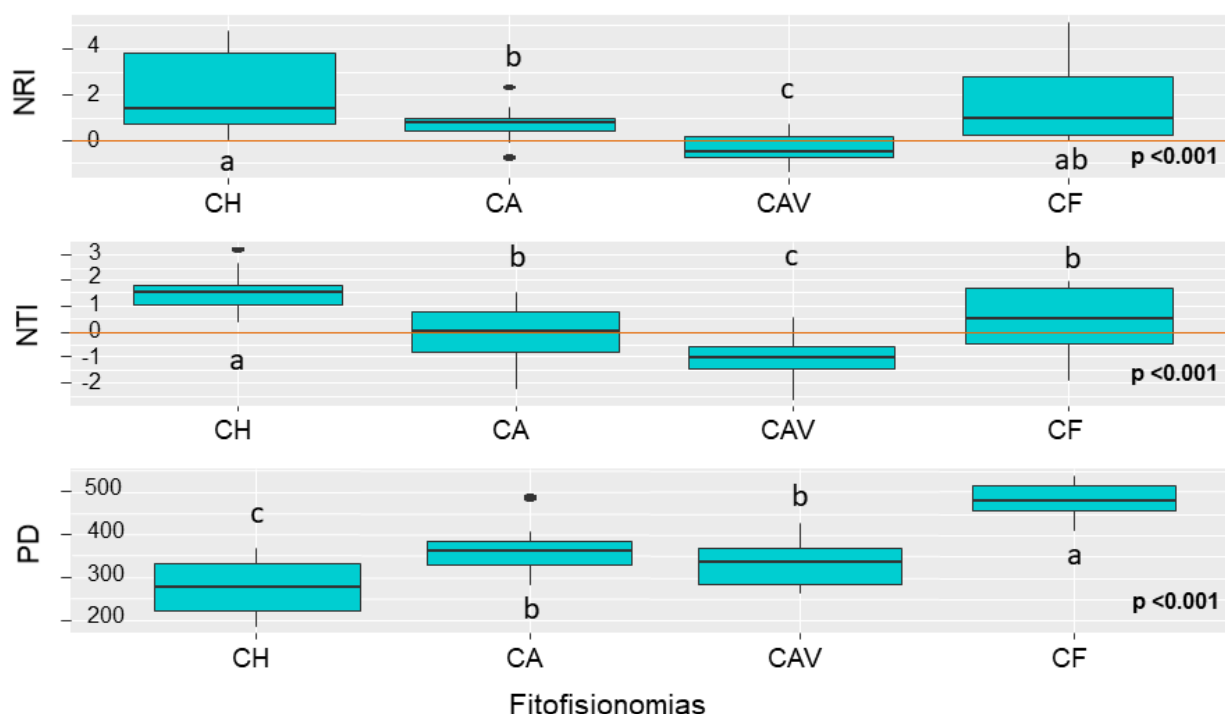


Figura 3 - Índice de parentesco líquido (NRI), índice do táxon mais próximo (NTI) e diversidade filogenética (PD) nos estratos em conjunto em quatro fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras que são diferentes determinam as diferenças significativas entre as fisionomias ($p < 0.001$).

Tanto para o estrato arbóreo como para o estrato herbáceo, a maioria das parcelas, demonstraram valores positivos ao NRI, indicando um agrupamento filogenético das Cangas como um todo (estrato arbóreo: 0.193 ± 1.015 , $p < 0.001$; estrato herbáceo: 2.329 ± 3.141 , $p < 0.001$). Em relação ao NTI, a metade das parcelas obtiveram valores menores do que zero e a outra metade das parcelas apresentaram valores positivos. Desta maneira, também não foi encontrada uma estrutura

filogenética que difere da expectativa nula (estrato arbóreo: 0.085 ± 1.466 $p < 0.001$; estrato herbáceo: 2.305 ± 3.253 , $p < 0.001$).

No estrato arbóreo, o NRI e NTI diferiram entre as fisionomias, no qual o Campo Arbustivo e Capão Florestal apresentaram agrupamento filogenético. No entanto, para o Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* foi observado uma superdispersão filogenética. A diversidade filogenética também diferiu entre as fisionomias, no qual apresentou maior diversidade no Capão Florestal (**Figura 4**). Em relação ao estrato herbáceo, os valores de NRI e NTI diferiram nas fisionomias das Cangas. O NRI e NTI indicou agrupamento filogenético ao Campo Herbáceo e Capão Florestal. Em relação ao Campo Arbustivo, houve um agrupamento filogenético ao NRI. Entretanto, os valores de NRI e NTI que foram encontrados no Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* apresentaram superdispersão filogenética. Em relação a diversidade filogenética, foi observada menor diversidade no Campo Herbáceo e maior diversidade no Capão Florestal (**Figura 4**).

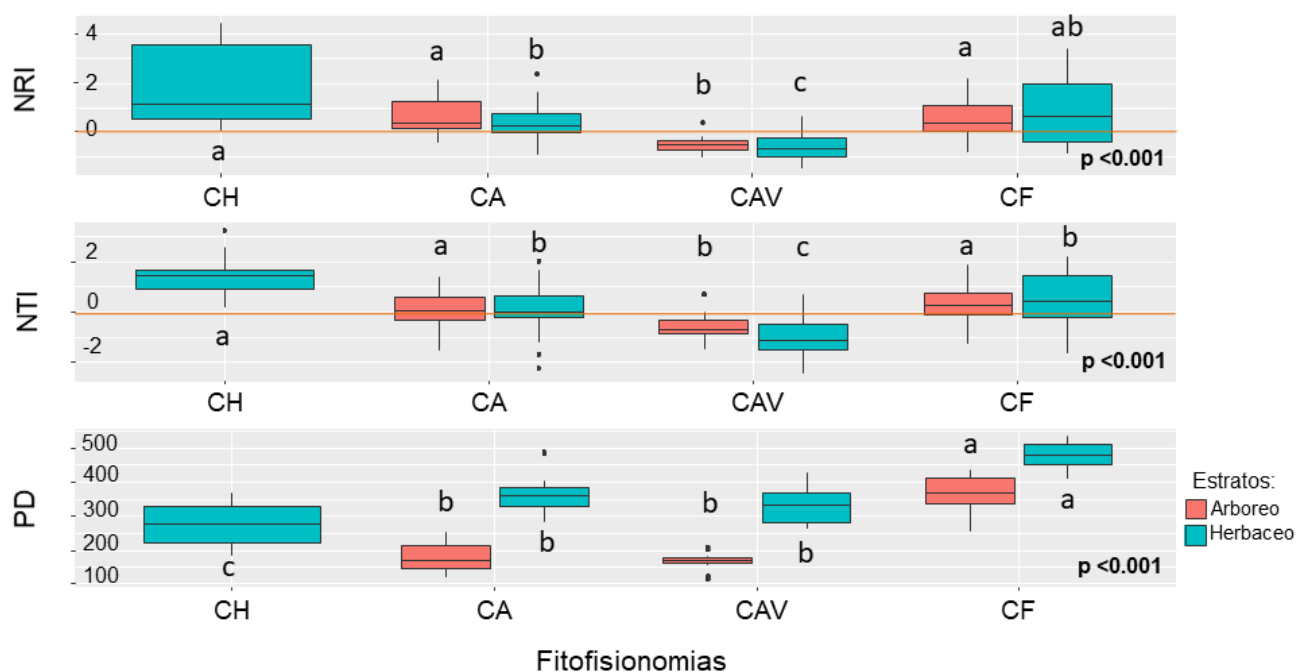


Figura 4 - Índice de parentesco líquido (NRI), índice do táxon mais próximo (NTI) e diversidade filogenética (PD) em quatro fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF) para os estratos arbóreo e herbáceo. As letras diferentes determinam as diferenças significativas entre as fisionomias nos estratos arbóreo e herbáceo ($p < 0.001$).

Com relação ao MPD, MNTD, NRI, NTI e PD decorrente da filogenia não resolvida houve uma elevada correlação com as métricas provenientes das filogenias resolvidas. Desse modo, os resultados encontrados em coeficientes de correlações (R^2) foram valores na média maiores que 0.96 e inclinações da reta (z) menores que 1.05, demonstrando que a falta de resolução filogenética em

alguns ramos da filogenia não influenciou significativamente nos resultados dos índices. Os resultados dos coeficientes de correlação acima de 0.96 indicam que os índices foram previsíveis com a precisão adequada por meio da filogenia não resolvida. Portanto, os resultados obtidos nas análises para as Cangas de Carajás mostraram-se adequados (**Tabela 2**).

Tabela 2. Resultados da inclinação da reta (z), desvio padrão (DP) e regressão (R^2) da estrutura e diversidade filogenética das comunidades filogenia não resolvido e resolvido aleatoriamente.

Índices	z (DP)	R^2 (DP)
MPD	0.994 (0.001)	0.965 (0.001)
MNTD	0.956 (0.002)	0.964 (0.002)
NRI	1.026 (0.020)	0.988 (0.003)
NTI	0.975 (0.009)	0.964 (0.006)
PD	0.954 (0.016)	0.965 (0.027)

Nos resultados do sinal filogenético pelo método λ , das seis características quantitativas que foram analisadas, cinco apresentaram valores significativos, sendo elas, altura, área específica foliar, nitrogênio foliar, fósforo foliar e carbono δ^{13} , apresentando valores maiores que zero e $p < 0.01$. Assim, somente nitrogênio (δ^{15}) não apresentou valor significativo de conservação ao longo da linhagem evolutiva (**Tabela 3**). O sinal filogenético para as formas de vida observado a partir do NRI indicou valores significativos para as formas fanerófita, liana e terófito, com valores > 1.96 e $p < 0.01$ e para geófito, com valores > -1.96 e $p < 0.01$. Somente as formas de vida hemicriptofita e caméfito não apresentaram valores significativos (**Tabela 4**).

Tabela 3. Resultados do sinal filogenético realizado pela abordagem do teste de λ de Pagel, o qual foi produzido a partir de plantas de Cangas Ferruginosas. Os valores apresentados abaixo tratam-se dos resultados que foram aleatorizados (em um total de 999 aleatorizações).

Características funcionais	Valores (λ de Pagel)	Valores de significância
Altura vegetal	0.157	$p < 0.001$
Área específica foliar	0.274	$p < 0.001$

Nitrogênio foliar	0.254	$p < 0.001$
Fósforo foliar	0.153	$p < 0.001$
Carbono (δ^{13})	0.385	$p < 0.001$
Nitrogênio (δ^{15})	0.042	$p = 0.410$

Tabela 4. Sinal filogenético no qual os valores de NRI forma de vida, indicam uma característica agrupada na filogenia, ou seja, em situações de espécies com uma forma de vida semelhante e filogeneticamente mais aparentado do que o esperado quando comparado ao acaso. Os valores em N são os números de espécies por forma de vida e p indica a probabilidade de NRI forma de vida ser maior que zero, em comparação de 10.000 randomizações.

Forma de vida	N	NRI forma de vida	p
Fanerófita	107	9.195	< 0.001
Hemicriptofita	52	0.573	0.443
Liana	24	3.960	< 0.001
Caméfito	18	-1.306	0.621
Terófito	9	2.652	< 0.001
Geófito	6	-10.475	< 0.001

Em relação aos resultados encontrados da estrutura funcional das Cangas, os valores de NRI e NTI determinaram um agrupamento funcional ao Campo Herbáceo. Enquanto, no Capão Florestal foi observado o agrupamento funcional somente para o NRI ($p < 0.001$). Entretanto, o Campo Arbustivo e Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* apresentaram superdispersão funcional ($p < 0.001$). Os resultados evidenciaram que o NRI e NTI diferiram nas fisionomias, no qual, o Campo Herbáceo possui NRI e NTI significativamente maior quando comparados ao Campo Arbustivo e o Campo Arbustivo dominado por *Vellozia*.

Analisando separadamente, o NRI do estrato arbóreo apresentou maior agrupamento funcional no Capão Florestal em comparação ao Campo Arbustivo e Campo Arbustivo dominado por *Vellozia*. Nos resultados do estrato herbáceo, o Campo Herbáceo apresentou agrupamento funcional e NRI revelou um agrupamento no Capão Florestal (estrato arbóreo: $p < 0.001$; estrato herbáceo: $p < 0.001$). Com relação aos resultados de NTI no estrato arbóreo não diferiu significativamente entre as fisionomias de Cangas. Enquanto o Campo Herbáceo apresentou maior agrupamento funcional no estrato herbáceo (estrato arbóreo: $p < 0.144$; estrato herbáceo: $p < 0.001$) (**Figura 5**).

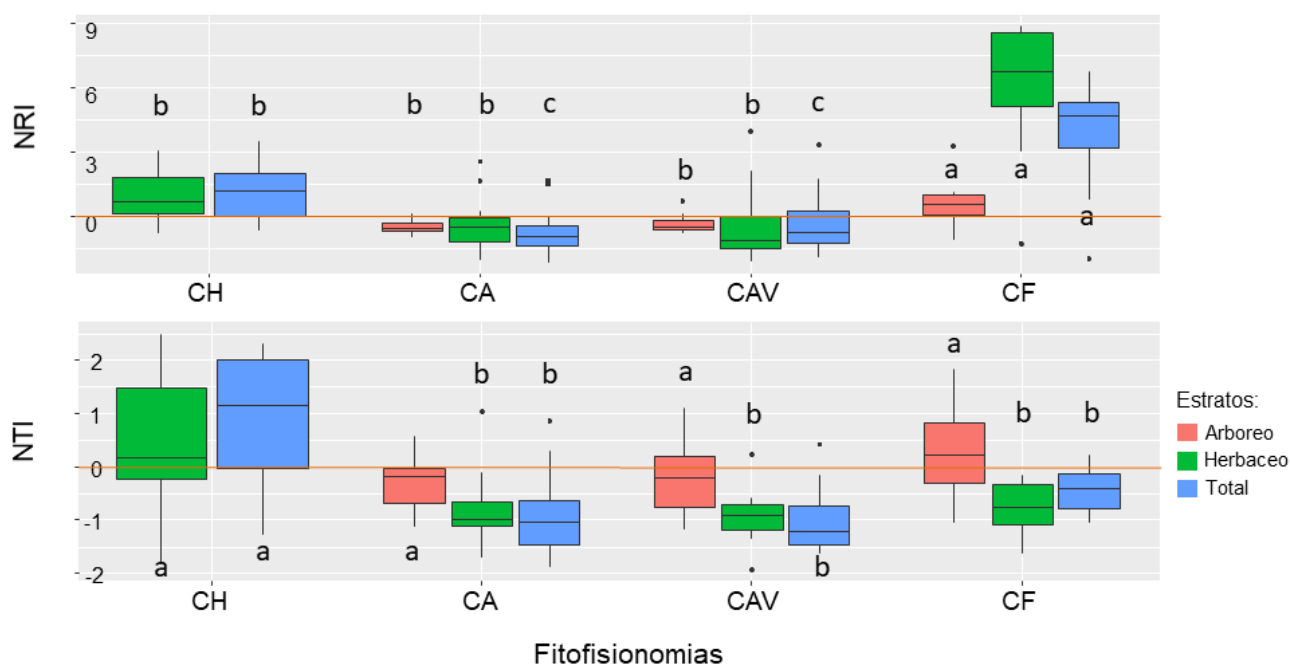


Figura 5 - Índice de parentesco líquido (NRI) e índice do táxon mais próximo (NTI) em fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras diferentes determinam as diferenças significativas nas fisionomias na comunidade total, estratos arbóreo e herbáceo.

Já para os resultados da diversidade funcional considerando o conjunto dos estratos, o Campo Herbáceo apresentou maiores valores de FDis e FEve. No entanto, FDis demonstrou diferença significativa entre o Campo Arbustivo e Campo Arbustivo dominado por *Vellozia*. Nos resultados de FRic, o Capão Florestal apresentou diferença mais significativa nas fisionomias ($p < 0.01$). Entretanto, os valores de FDiv não diferiram entre as fisionomias das Cangas ($p < 0.207$).

No estrato arbóreo, o Capão Florestal apresentou maiores FDis e FRic, diferindo das demais fisionomias ($p < 0.01$). O Campo Arbustivo e Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* foram semelhantes no FRic. Para FDiv, o Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* apresentou valores maiores diferindo das demais, enquanto que o Campo Arbustivo e Capão Florestal não apresentaram

diferenças significativas entre eles. Com relação aos valores de FEve não houve diferenças entre as fisionomias de Cangas.

Enquanto nos resultados do estrato herbáceo, o Campo Herbáceo apresentou os maiores valores de FDis e FEve ($p < 0.01$). Contudo, somente FDis diferiu entre o Campo Arbustivo e Campo Arbustivo dominado por *Vellozia*. O resultado de FRic foi maior no Capão Florestal, diferindo das demais fisionomias ($p > 0.01$). Entretanto, a FDiv não diferiu entre as fisionomias de Cangas ($p < 0.08$) (Figura 6).

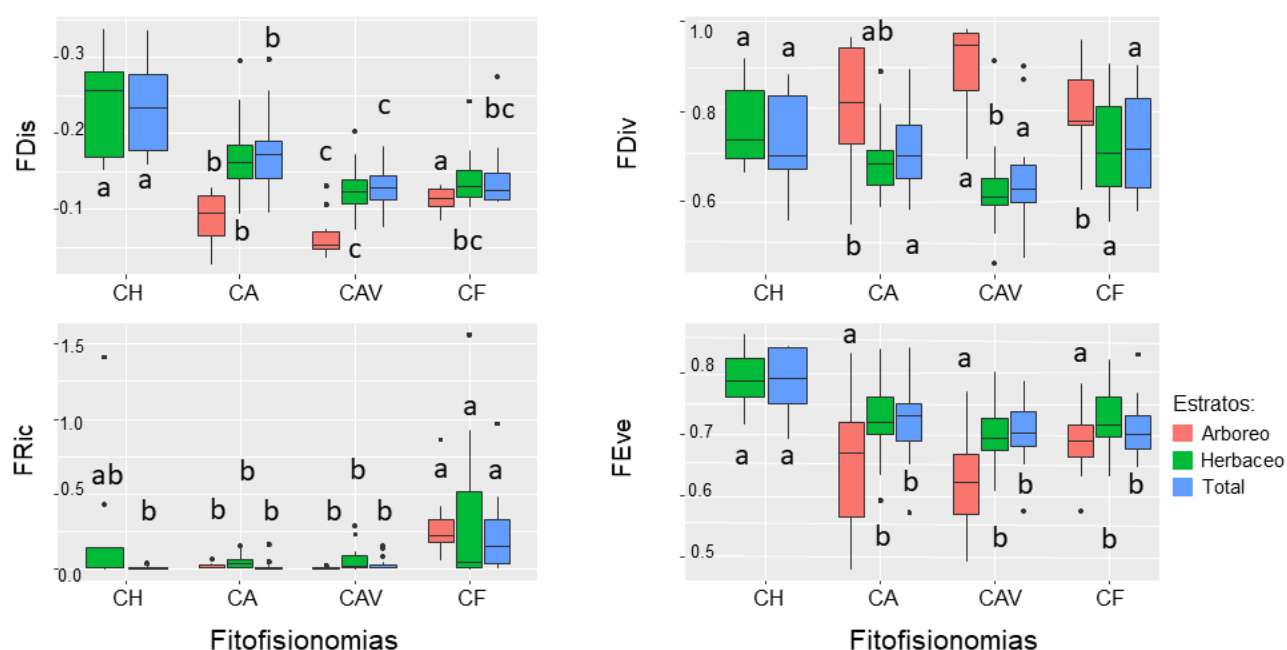


Figura 6 - Riqueza Funcional (FRic), Dispersão Funcional (FDis), Regularidade Funcional (FEve) e Divergência Funcional em fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras diferentes determinam as diferenças significativas entre as fisionomias na comunidade total, estrato arbóreo e herbáceo.

4. DISCUSSÃO

Neste estudo foram encontradas diferenças significativas entre as fisionomias de Cangas Ferruginosas em relação à estrutura filogenética, estrutura funcional, diversidade filogenética e diversidade funcional. Corroborando a primeira hipótese, nos Campos Herbáceos foi observado um maior agrupamento na estrutura filogenética e funcional da comunidade ecológica. Mas, diferentemente do esperado, os maiores valores na superdispersão da estrutura filogenética e

funcional da comunidade ecológica foram observados para os Campos Arbustivos dominado pelo gênero *Vellozia* e não no Capão Florestal.

Os valores obtidos de NRI, NTI e PD da estrutura filogenética que foram encontrados nas fisionomias analisadas de Cangas possuem uma elevada confiança. Fato que está baseado na ausência dos efeitos das politomias que poderiam influenciar os resultados nas métricas das variáveis respostas na estruturação da comunidade ecológica. Além disso, os valores positivos encontrados no sinal filogenético das espécies, indicaram a tendência de espécies funcionalmente mais semelhantes se aparentarem mais do que ao esperado ao acaso. Assim sendo, as respostas ecológicas que foram encontradas são consistentes quando aos índices calculados para a vegetação nas Cangas de maneira conjunta e diferentes estratos (arbóreo e herbáceo).

Os valores de agrupamento das espécies encontrados na estrutura filogenética e funcional dos Campos Herbáceos em Cangas podem indicar a ação do processo de filtragem ambiental (e.g. inundações periódicas, solos rasos e uma disponibilidade reduzida de alguns nutrientes). Mitre, *et al.*, (2018) revelaram que essas condições abióticas levam a diferenças na composição e diversidade entre as fisionomias de Cangas. O agrupamento filogenético nos Campos Herbáceos é coerente ao processo de filtragem ambiental nesta fisionomia por condições como baixa disponibilidade de nutrientes e inundações periódicas, o que seleciona espécies heliófitas, como aquelas pertencentes a famílias Poaceae, Cyperaceae e Xyridaceae (GASTAUER, *et al.*, 2020). Além disso, Zappi, *et al.*, (2017) constataram que o agrupamento filogenético é comum em Cangas, mas o seu nível difere em fisionomias abertas e florestais, sendo o agrupamento filogenético mais evidente em comunidades de vegetações abertas.

Miazaki, *et al.*, (2017) ainda demonstraram que em Cangas as condições de severidade ambiental que estão presente nessas comunidades, diminuem a diversidade filogenética e aumentam o agrupamento filogenético nessa vegetação. Assim, fatores como os solos mais rasos em camadas orgânicas e inundações periódicas nesses ambientes acabam diminuindo o estabelecimento de espécies lenhosas, limitando a presença de árvores (GASTAUER, *et al.*, 2020). Consequentemente, os valores encontrados em relação à diversidade filogenética indicam a coexistência de espécies mais aparentadas nos Campos Herbáceos e em menores extensões de parentescos nos Campos Arbustivos e Capão Florestal. Com a conservação dos nichos das espécies em linhagens evolutivas, ou seja, havendo uma maior tendência na sobreposição de nicho ecológico das espécies.

Os maiores valores de superdispersão da estrutura filogenética e funcional foram encontrados para os Campos Arbustivos e Campos Arbustivos dominado pelo gênero *Vellozia* e não para o Capão

Florestal conforme esperado. Nos Capões Florestais, as condições de intensa pedogênese, são situações favoráveis ao desenvolvimento das espécies de plantas com tamanho arbóreo e acabam limitando situações de estabelecimento de vegetação rupestre (MARTINS, *et al.*, 2012). Além do mais, um aumento na cobertura arbórea e por consequência na taxa de sombreamento, determinam uma diminuição na relevância da vegetação herbácea (BATALHA *et al.*, 2001). Dessa maneira, essas condições promovem situações de agrupamento filogenético em espécies de porte arbóreo que são dominantes nesta fisionomia, que foi demonstrado tanto na estrutura filogenética quanto na estrutura funcional dos Capões Florestais.

Enquanto nos resultados que foram obtidos da presença do sinal filogenético entre as espécies, indicaram a tendência de espécies funcionalmente mais similares se aparentarem mais do que ao esperado ao acaso em comunidades. Assim sendo, os resultados obtidos para os Campos Arbustivos tanto na estrutura filogenética quanto na estrutura funcional indicam a presença de outros processos ecológicos, como as interações interespecíficas, incluindo, por exemplo, o processo de facilitação (CARRION, *et al.*, 2017).

A facilitação trata-se de uma interação de plantas enfermeiras que influenciam atenuando determinadas condições ambientais adversas. Essa interação pode levar a benefícios para as espécies que estão sendo “facilitadas”, como maiores condições de sombreamento, aumento de nutrientes, elevação de matéria orgânica, melhores taxas de umidade e maiores teores de oxigênio no solo (CARRION, *et al.*, 2017; JANKJU, *et al.*, 2013). Por consequência, essa interação pode diminuir a intensidade dos processos de filtragem ambiental que atuam nesses ecossistemas ferruginosos, sendo capaz de produzir um padrão de superdispersão filogenética das espécies na comunidade ecológica (GASTAUER, *et al.*, 2017).

Na situação de uniformidade filogenética que é causada por maiores distâncias filogenéticas entre as espécies coexistentes encontradas em áreas florestais, indicam um alívio do processo de filtragem ambiental no Capão Florestal. À vista disso, a presença de solos mais profundos nesta fisionomia de vegetações mais altas, acabam garantindo maiores disponibilidade em recursos hídricos, alguns nutrientes e acúmulo de matéria orgânica que podem proporcionar uma diminuição no agrupamento filogenético das espécies. Assim, os resultados observados indicam que a importância das interações interespecíficas para a montagem da comunidade ecológica aumenta nessa fisionomia em comparação ao Campo Herbáceo, além da diminuição de condições de severidade ambiental (MIAZAKI, *et al.* 2015; GASTAUER, *et al.*, 2020).

Nos resultados da diversidade funcional os Capões Florestais diferiram das demais fisionomias em relação a riqueza funcional. Esses resultados indicam que os Capões Florestais, por possuírem melhores condições, como por exemplo, os solos mais profundos com acúmulos de matéria orgânica, recursos hídricos e alguns nutrientes, permitem uma elevada riqueza de características funcionais específicas das espécies (NUNES, *et al.*, 2015).

Com relação aos resultados do índice de dispersão funcional, os Campos Herbáceos diferiram das demais fisionomias, indicando que a riqueza de espécies vegetais nos Capões Florestais produziu uma situação de maior similaridade funcional em espécies vegetais. Já para o índice de divergência funcional, houve diferenças significativas entre todas as fisionomias. Assim, novamente os resultados demonstraram maiores valores encontrados para os Campos Herbáceos. Indicando que essa fisionomia possui uma melhor situação de diferenciação do nicho ecológico das espécies, apresentando uma maior ocupação e distribuição das características funcionais das espécies, portanto, uma maior distribuição de diferentes estratégias ecológicas para um melhor aproveitamento do ambiente.

Enquanto no índice de equitabilidade funcional os resultados indicaram uma maior distribuição das espécies ao longo dos nichos ecológicos em uma maior variação aos Campos Herbáceos em comparação com as demais fisionomias. Entretanto, os Capões Florestais apresentaram a menor variação de equitabilidade funcional. Por consequência, diferentes abundâncias e características das espécies indicam que os Campos Herbáceos possuem menores dominâncias, possuindo por isso um padrão mais uniforme.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados deste trabalho confirmaram parcialmente as hipóteses dos estudos em relação as diferenças nos processos ecológicos que determinam as comunidades vegetacionais nas fisionomias das Cangas. Deste modo, é indicado por meio dos resultados que é fundamental que todo o gradiente ambiental das comunidades ecológicas em Cangas seja conservado. Visto que há uma elevada heterogeneidade ambiental e variação na diversidade filogenética, diversidade funcional, riqueza e endemismo de espécies que estão presente nessas comunidades ferruginosas.

Portanto, o estudo demonstrou que em comunidades de Cangas existe a conservação de nicho das espécies que estão relacionados com sua história de vida. Podendo indicar a atuação da filtragem ambiental em cima das espécies que compartilham características mais semelhantes. Assim, destaca-se os filtros como inundações periódicas e profundidade do solo que desempenham importantes

funções nas variações na composição e diferentes estratégias ecológicas das espécies. Mas, apesar desses Campos Rupestres apresentarem um conjunto de características ambientais adversas ao desenvolvimento de plantas, demonstram uma elevada biodiversidade e padrões de endemismos de espécies em comunidades.

Em relação aos processos ecológicos de filtragem ambiental uma maior superdispersão filogenética não foi encontrada em ambientes mais favoráveis ao crescimento de plantas (Capões Florestais), mas em Campos Rupestres dominados pelo gênero *Vellozia*. Assim, a ausência desse padrão nos demais Campos Rupestres pode indicar a atuação de espécies enfermeiras como plantas facilitadoras de adversidades ambientais nesses ambientes. Permitindo situações de alívios nesses cenários de condições ambientais mais severas para a vida das plantas nos afloramentos ferruginosos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, L. C.; VIANA, P. L.; TEODORO, G. S.; CALDEIRA, C. F.; RAMOS, S. J.; GASTAEUR, M. A wildfire in an Amazonian *canga* community maintained important ecosystem properties. **International Journal of Wildland Fire**, 2020.
- BARALOTO, C.; HARDY, O. J.; PAINE, C. E. T.; DEXTER, K. G.; CRUAUD, C.; DUNNING, L. T.; GONZALEZ, M. A.; MOLINO, J. F.; SABATIER, D.; SAVOLAINEN, V.; CHAVE, J. Using functional traits and molecular phylogenetic trees to examine the assembly of tropical tree communities. **Journal of Ecology**, v. 100, p. 690-701.
- BATALHA, M. A.; MANTOVANI, W.; MESQUITA JÚNIOR, H. N. Vegetation structure in cerrado physiognomies in southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, V. 61, p. 475-483, 2001.
- BATALHA, M. A.; SILVA, I. A.; CIANCIARUSO, M. V.; FRANÇA H.; CARVALHO, G. H. Phylogeny, traits, environment, and space in cerrado plant communities at Emas National Park (Brazil). **Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology Plants**, v. 206, p. 949-956, 2011.
- BLOMBERG, S. P.; GARLAND JR, T.; IVES, A. R. Testing for phylogenetic signal in comparative data: behavioral traits are more labile. **Evolution**, v. 57, p. 717-745, 2003.
- CARDOSO, E. L.; FERNANDES, A. H. B. M.; FERNANDES, F. A. Análise de solos: finalidade e procedimentos de amostragem. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2009. 5 p. (Embrapa Pantanal. Comunicado Técnico, 79.
- CARMO, F. F.; CARMO, F. F.; CAMPOS, I. C.; JACOBI, C. M. Ilhas de ferro estratégicas para a conservação. **Ciência Hoje**, v. 295, p. 48-53, 2012.
- CARRION, J. F.; GASTAUER, M.; MOTA, N. M.; MEIRA-NETO, J. A. A. Facilitation as a driver of plant assemblages in Caatinga. **Journal of Arid Environments**, v. 142, p. 50-58, 2017.
- CAVENDER-BARES, J.; KOZAK, K. H.; FINE, P. V. A.; KEMBEL, S. W. The merging of community ecology and phylogenetic biology. **Ecology Letters**, v. 12, p. 693-715, 2009.
- CHAVE, J. 2009. Competition, Neutrality, and Community Organization. p. 264-273. In: LEVIN, S. A. (Ed.). **The Princeton Guide to Ecology**. Princeton: Princeton University Press.
- COMITA, L. S.; URIARTE, M.; FORERO-MONTAÑA, J.; KRESS, W. J.; SEWSON, N. G.; THOMPSON, J.; UMAÑA, M. N.; ZIMMERMAN, J. K. Changes in Phylogenetic Community Structure of the Seedling Layer Following Hurricane Disturbance in a Human-Impacted Tropical Forest. **Forests**, v. 9, p. 1-17, 2018.
- COPPI, A.; LAZZARO, L.; AMPOORTER, E.; BAETER, L.; VERHEYEN, K.; SELVI, F. Understorey phylogenetic diversity in thermophilous deciduous forests: overstorey species identity can matter more than species richness. **Forest Ecosystems**, v. 6, p. 1-13, 2019.
- CORNELISSEN J. H. C.; LAVOREL S.; GARNIER E.; DÍAZ S.; BUCHMANN N.; GURVICH D. E.; REICH P.B.; STEEGE H. TER, MORGAN H. D.; HEIJDEN M. G. A. VAN DER, PAUSAS J.

- G.; POORTER H. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany** 51: 335-380, 2003.
- CHUN, J. H.; LEE, C. B. Temporal Changes in Species, Phylogenetic, and Functional Diversity of Temperate Tree Communities: Insights From Assembly Patterns. **Front Plant Sci**, v.10, p.1-16, 2019.
- CRAINE, J. M.; BROOKSHIRE, E. N. J.; CRAMER, M. D. Ecological interpretations of nitrogen isotope ratios of terrestrial plants and soils. **Plant Soil**, v. 396, p. 1-26, 2015.
- CRAINE, J. M.; MORROW, C.; FIERER, N. Microbial nitrogen limitation increases decomposition. **Ecology**, v. 88, p. 2105-2113, 2007.
- DAWSON, E. T.; MAMBELLI, S.; PLAMBOECK, A. H.; TEMPLER, P. H.; TU, K. P. Stable Isotopes in Plant Ecology. **Annual Reviews**, v. 33, p. 507-559, 2002.
- DIAS, A. T. C.; ROSADO, B. H. P.; DE BELLO, F.; PISTÓN, N.; DE MATTOS, E. A. Alternative plant designs: consequences for community assembly and ecosystem functioning. **Annals of Botany**, v. 125, p. 391-398, 2019.
- DIAZ, S; CABIDO, M. Vive la difference: plant functional diversity matters to ecosystem processes. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 16, p. 646-655, 2001.
- ESCUADERO, A.; MEDIAVILLA, S.; HEILMEIER, H. Leaf longevity and drought: avoidance of the costs and risks of early leaf abscission as inferred from the leaf carbon isotopic composition. **Funct Plant Biol**, v. 35, p. 705-713, 2008.
- FAITH, D. P. Phylogenetic diversity, functional trait diversity and extinction: avoiding tipping points and worst-case losses. **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 370, p. 1-10, 2015.
- GASTAUER, M.; SAPORETTI-JUNIOR A. W.; MAGNAGO, L. F. S.; CAVENDER-BARES, J.; MEIRA-NETO, J. A. A. The hypothesis of sympatric speciation as the dominant generator of endemism in a global hotspot of biodiversity. **Ecology and Evolution**, v. 5, p. 5272-5283, 2015.
- GASTAUER, M.; MEIRA-NETO, J. A. A. Estrutura filogenética de comunidades no Cerrado: introdução e estudo de caso. *Fitossociologia do Brasil - Volume II*. 1 ed. Viçosa: Editora UFV, 2015, p. 302-321.
- GASTAUER, M.; SAPORETTI-JUNIOR A. W.; VALLADARES, F.; MEIRA-NETO, J. A. A. Phylogenetic community structure reveals differences in plant community assembly of an oligotrophic white-sand ecosystem from the Brazilian Atlantic Forest. **Acta Botanica Brasilica**, v. 31, p. 531-538, 2017.
- GASTAUER M.; MEIRA-NETO, J. A. A. Updated angiosperm family tree for analyzing phylogenetic diversity and community structure. **Acta Botanica Brasilica**, v. 31, p. 191-198, 2017.
- GASTAUER, M.; MITRE, S. K.; CARVALHO, C. S.; TREVELIN, L. C.; SARMENTO, P. S. M.; MEIRA NETO, J. A. A.; C. F.; CALDEIRA, S. J.; RAMOS.; JAFFÉ, R. Landscape heterogeneity and habitat amount drive plant diversity in Amazonian canga ecosystems. **Landscape Ecol**, v. 36, p. 1-15, 2021.

- GERHOLD, P.; CAHILL JÚNIOR, J. F.; WINTER, M.; BARTISH, I. V.; PRINZING, A. Phylogenetic patterns are not proxies of community assembly mechanisms (they are far better). **Functional Ecology**, v. 29, p. 600-614, 2015.
- GIANNINI, T. C.; GIULIETTI, A. M.; HARLEY, R. M.; VIANA, P. L.; RIBBI, R. J.; ALVES, R.; PINTO, C. E.; MOTA, N. F. O.; CALDEIRA, C. F.; FONSECA, V. L. I.; FURTINI, A. E.; SIQUEIRA, J. O. Selecting plant species for practical restoration of degraded lands using a multiple-trait approach. **Austral Ecology**, v. 42, p. 510-521, 2016.
- JANKJU, M.; Role of nurse shrubs in restoration of an arid rangeland: effects of microclimate on grass establishment. **Journal Arid Environmant**, v. 89, 103-109, 2013.
- KECK, F.; RIMET, F.; BOUCHEZ, A.; FRANC, A. Phylosignal: an R package to measure, test, and explore the phylogenetic signal. **Ecology and Evoloty**, v. 6, p. 2774-2780, 2016.
- KEMBEL, S. W.; HUBBELL, S. P. THE PHYLOGENETIC STRUCTURE OF A NEOTROPICAL FOREST TREE COMMUNITY. **Ecology**, v. 87, p. 86-99, 2006.
- KUHLMANN, M.; RIBEIRO, J. Evolution of seed dispersal in the Cerrado biome: ecological and phylogenetic consideration. **Acta Botanica Brasil**, v. 30, p. 271-282, 2016.
- LALIBERTÉ, E.; LEGENDRE, P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. **Ecology**, v. 91, p. 299-305, 2010.
- LOSOS, J. B. Phylogenetic niche conservatism, phylogenetic signal and the relationship between phylogenetic relatedness and ecological similarity among species. **Ecology Letters**, v. 11, p. 995-1003, 2008.
- MAGALLÓN, S.; GÓMEZ-ACEVEDO, S.; SÁNCHEZ-REYES L. L.; HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, T. A metacalibrated time-tree documents the early rise of flowering plant phylogenetic diversity. **New Phytologist**, v. 207, p. 437-453, 2015.
- MARC, T. J. J.; STINCHCOMBE, J. R. An emerging synthesis between community ecology and evolutionary biology. **Trends Ecology and Evolution**, v. 22, p. 250-257, 2007.
- MARTINS, A. C. Abordagens históricas no estudo das interações planta-polinizador. **Oecologia Australis**, v. 17, p. 39-52, 2013.
- MARTINS, F. D.; CASTILHO, A. F.; CAMPOS J.; HATANO, F. M.; ROLIM, S. G. Fauna da Floresta Nacional de Carajás. São Paulo: Nitro Editorial. p. 30-61, 2012. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/Carajas.pdf>. Acesso em: 23 de agosto de 2020.
- MARTINS, F. D.; KAMINO, L. H. Y.; Ribeiro, K. T. (Org.). Projeto Cenários: conservação de campos ferruginosos diante da mineração em Carajás. 1. ed. Tubarão: **Copiart**, v. 1. 465 p, 2018.
- MASON, N. W. H.; MOUILLOT, D.; LEE, W. G.; WILSON, J. B. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity. **Oikos**, v. 111, p. 112-118, 2005.

MATOS, D. C. L.; FERREIRA, L. V.; SALOMÃO, R. P. Influência da distância geográfica na riqueza e composição de espécies arbóreas em uma Floresta Ombrófila Densa na Amazônia Oriental. **Rodriguésia**, v. 64, p. 357-367, 2013.

MITRE, S. K.; MARDEGAN, S. F.; CALDEIRA, C. F.; RAMOS, S. J.; FURTINI NETO, A. E.; SIQUEIRA, J. O., M. Nutrient and water dynamics of Amazonian canga vegetation differ among physiognomies and from those of other neotropical ecosystems. **Springer**, v. 219, p. 1341-1353, 2018.

MIAZAKI, A. S.; GASTAUER, M.; MEIRA-NETO, J. A. A. Environmental severity promotes phylogenetic clustering in campo rupestre vegetation. **Acta Botanica Brasilica**, v. 29, p. 561-566, 2015.

MOTA, N. F. O.; SILVA, L. V. C.; MARTINS, F. D.; VIANA, P. L. Vegetação sobre Sistemas Ferruginosos da Serra dos Carajás. In: CARMO, F. F. & KAMINO, L. H. Y. (orgs.). Geossistemas Ferruginosos no Brasil. Instituto Prístino, Belo Horizonte, 3 ed., p. 289-315, 2015.

MOTA, N. F. O.; WATANABE, M. T. C.; ZAPPI, D. C.; HIURA, A. L.; PALLOS, J.; VIVEROS, R. S.; GIULIETTI, A. M.; VIANA, L. P. Cangas da Amazônia: a vegetação única de Carajás evidenciada pela lista de fanerógamas. **Rodriguésia**, v. 69, p. 1435-1488, 2018.

NUNES, J. A. *Florística, estrutura e relações solo-vegetação em gradiente fitofisionômico sobre Canga, na Serra Sul, Flona de Carajás-Pará* (Mestrado em Botânica) - Programa de pós-graduação em Botânica, Universidade Federal de Viçosa.

NUNES, J. A.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERREIRA, W. G.; NERI, A. V.; CORRÊA, G. R.; ENRIGHT, N. J. Soil-vegetation relationships on a banded ironstone 'island', Carajás plateau, Brazilian eastern Amazônia. **An Acad Bras Cienc**, v. 87, p. 2097-2110, 2015.

OLIVEIRA, T. C. S.; SILVA, V. F.; SOUSA, V. F. S.; FARIAS, R. R. S.; CASTRO, A. A. J. F. Diversidade taxonômica e funcional em áreas de cerrado rupestre de baixa altitude no complexo vegetacional de Campo Maior, Nordeste do Brasil. **Biotaamazonia**, v. 9, p. 1-5, 2019.

PAGEL, M. Inferring the historical patterns of biological evolution. **Nature**, v. 401, p. 877-884, 1999.

PAVOINE, S.; VALLET, J.; DUFOUR, A. B.; GACHET, S.; DANIEL H. On the challenge of treating various types of variables: application for improving the measurement of functional diversity. **Oikos**, v. 118, p. 391-402, 2009.

PEREZ-HARGUINDEGUY, N.; DÍAZ, S.; GARNIER, E.; LAVOREL, H.; POORTER, P.; JAUREGUIBERRY, P.; BRET-HARTE, M. S.; CORNWELL, W. K.; CRAINE, J. M.; GURVICH, D. E.; URCELAY, C.; VENEKLAAS, E. J.; REICH, P. B.; POORTER, L.; WRIGHT, I. J.; RAY, P.; ENRICO, L.; PAUSAS, J. G.; DE VOS, A. C.; BUCHAMNN, N.; FUNES, G.; QUÉTIER, F.; HODGSON, J. G.; THOMPSON, K.; MORGAN, H. D.; TER STEEGE, H.; HEIJDEN, M. G. A. VAN DER; SACK, L.; BLONDER, B.; POSCHLOD, P.; VAIERETTI, M. V.; CONTI, G.; STAYER, A. C.; AQUINO, S.; CORNELISSEN, J. H. C. New handbook for standardised

measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 61, p. 167-234, 2013.

PETCHEY, O. L.; GASTON, K. J. Functional diversity (FD), species richness, and community composition. **Ecology Letters**, v. 5, p. 402-411, 2002.

PETCHEY, O. L.; GASTON, K. J. Functional diversity: back to basics and looking forward. **Ecology Letters**, v. 9, p. 741-758, 2006.

PODANI, J.; SCHMERA, D. On dendrogram-based measures of functional diversity. **Oikos**, v. 115, p. 179-185, 2006.

QIAN H.; ZHANG, J. Using an updated time-calibrated family-level phylogeny of seed plants to test for non-random patterns of life forms across the phylogeny. **Journal of Systematics Evolution**, v. 52, p. 423-430, 2014.

R CORE TEAM, 2019. R: Uma linguagem e ambiente para computação estatística. Viena, Fundação R para Computação Estatística. <http://www.R-project.org/>.

SATDICHANH, M.; MILLET, J.; HEINIMANN, A.; NANTHAVONG, K.; HARRISON, R. D. Using plant functional traits and phylogenies to understand patterns of plant community assembly in a seasonal tropical forest in Lao PDR. **PLoS One**, v. 10, p.1-15, 2015.

SCALON, V. R.; MARTINS, C.; CÂNDIDO, E. S. Florística dos remanescentes de campo rupestre sobre canga no Campus Morro do Cruzeiro/ UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. **MG.BIOTA**, v.5, p. 19-47, 2012.

SCHAEFER, C. E.; CANDIDO, HUGO G.; CORRÊA, G. R.; SIMAS, FELIPE N. B.; CAMPOS, CAMPOS, J. C. F. Ecossistemas e Geoambientes de Canga Ferruginosa em Carajás: Paisagens Singulares em Risco de Extinção. In: Frederico Drumond Martins; Luciana Hiromi Yoshino Kamino; Katia Torres Ribeiro. (Org.). Projeto Cenários: Conservação de Campos Ferruginosos diante da mineração em Carajás. 1 ed. Tubarão (SC): Copiart, 2018, v. 1, p. 1-463.

SCHAEFER, C. E. G. R.; LIMA NETO, E.; CORRÊA, G. R.; SIMAS, F. N. B.; CAMPOS, J. F.; MENDONÇA, B. A. F.; NUNES, J. A. Geoambientes, solos e estoques de carbono na Serra Sul de Carajás, Pará, Brasil. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciênc. Nat.**, v. 11, p. 85-101, 2016.

SCHAEFER, C. E. G. R.; RIBEIRO, A. S. S.; CORRÊA, G. R.; LIMA NETO, E.; SIMAS, F. N. B.; KER, J. C. Características químicas e mineralogia de solos perférricos da Serra Sul de Carajás. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciênc. Nat.**, v. 11, p. 57-69, 2016.

SILVA, L. C. L.; AGUILAR, B. F.; DIAS, J. B.; CARMO, V. A.; COSTA, A. M.; JARDIM, C. H. ANÁLISE DA PAISAGEM A PARTIR DA ESTRATIFICAÇÃO AMBIENTAL: ESTUDO DA BACIA DO CÓRREGO MARIA CASIMIRA - ANDRÉ DO MATO DENTRO/MG. **REVISTA GEONORTE**, v.3, p. 518-529, 2012.

SOBRAL, F. L.; CIANCIARUSO, M. V. Estrutura filogenética e funcional de assembleias (re)montando a ecologia de comunidades em diferentes escalas espaciais. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 617-631, 2012.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; GIANNINI, T. C.; RIBBI, R. J; GIULIETTI, A. M.; SANTOS, DIOGO C.; NASCIMENTO, W. R.; GUIMARÃES, J. T. F.; COSTA, M. F.; FONSECA, V. L. I.; SIQUEIRA, J. O. Mapping and quantification of ferruginous outcrop savannas in the Brazilian Amazon: A challenge for biodiversity conservation. **PLoS One**, v. 14, p. 1-20, 2019.

STCP, Engenharia de Projetos Ltda. Sumário Executivo do Plano de Manejo para Uso Múltiplo da Floresta Nacional de Carajás. 2003. 71 p.

SWENSON, N. G. Phylogenetic resolution and quantifying the phylogenetic diversity and dispersion of communities. **PloS One**, v. 4, p. 1-8, 2009.

SWENSON, N. G. The assembly of tropical tree communities - the advances and shortcomings of phylogenetic and functional trait analyses. *Ecography*, v. 36, p. 264-276, 2013.

VIANA, P. L.; MOTA, N. F. O.; GIL, A. S. B.; SALINO, A.; ZAPPI, D. C.; HARLEY, R. M.; ILKIU-BORGES, A. L.; SECCO, R. S.; ALMEIDA, T. E.; WATANABE, M. T. C. W.; SANTOS, J. U. M.; TROVÓ, M.; MAURITY, C.; GIULIETTI, A. M. Flora das cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: história, área de estudos e metodologia. **Rodriguésia**, v. 67, p. 1107-1124, 2016.

VILLÉGER, S.; MASON, N. W. H.; MOUILLOT, D. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. **Ecology**, v. 89, p. 2290-2301, 2008.

ZAPPI, D. C. Paisagens e plantas de Carajás/Landscapes and plants of Carajás. Instituto Tecnológico Vale, 2017, Belém.

ZAPPI, D. C.; GASTAUER, M.; RAMOS, S.; NUNES, S.; CALDEIRA, C. F.; SOUZA-FILHO, P. W.; GUIMARÃES, T.; GIANNINI, T. C.; VIANA, P. L.; LOVO, J.; MOTA, N. F. O.; SIQUEIRA, J. O. Plantas nativas para recuperação de áreas de mineração em Carajás. Instituto Tecnológico Vale, 2018, Belém.

ZAPPI, D. C.; MORO, M. F.; MEAGHER, T. R.; NIC LUGHADHA, E. Plant Biodiversity Drivers in Brazilian Campos Rupestres: Insights from Phylogenetic Structure. **Front Plant Sci**, v. 8, p.1-15, 2017.

VASCONCELOS, J. M.; SILVA-JÚNIOR.; M. L.; RUIVO, M. L. P.; SCHAEFER, C. E. G. R.; RODRIGUES, P. G.; SOUZA, G. T.; NASCIMENTO, D. N. O.; BEZERRA, K. C. A.; DIAS, Y. N. Solos metalíferos: atributos químicos nas diferentes fitofisionomias da Serra Sul, Serra dos Carajás, Pará, Brasil. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.**, v. 11, p. 49-55, 2016.

WARRING, B.; CARDOSO, F. C. G.; MARQUES, M. C. M.; VARASSIN, I. G. Functional diversity of reproductive traits increases across succession in the Atlantic forest. **Rodriguésia**, v. 67, p. 321-333, 2016.

WEBB, C. O.; DONOGHUE, M. J. Phylomatic: tree assembly for applied phylogenetics. **Molecular Ecology Notes**, v. 5, p. 181-183, 2005.

WEBB, C. O.; ACKERLY, D. D.; KEMBEL, S. W. Phylocom: software for the analysis of phylogenetic community structure and trait evolution. **Bioinformatics**, v. 24, p. 2098-2100, 2008.

YANG, J.; CI, X.; LU, M.; ZHANG, G.; CAO, M.; LIE, J.; LIN, L. Functional traits of tree species with phylogenetic signal co-vary with environmental niches in two large forest dynamics plots. **Journal of Plant Ecology**, v. 7, p. 115-125, 2014.

JOSINEY FARIAS DE ARAÚJO

A heterogeneidade da paisagem, a quantidade de habitat e a configuração da paisagem interferem na média ponderada da comunidade de Cangas Ferruginosas

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ecologia do convênio da Universidade Federal do Pará e Embrapa Amazônia Oriental, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ecologia.

Área de concentração: Ecologia

Linha de pesquisa: Ecologia de Comunidades e Ecossistemas

Orientador: Dr. Markus Gastauer
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Grazielle Sales Teodoro

Belém
2021

JOSINEY FARIAS DE ARAÚJO

A heterogeneidade da paisagem, a quantidade de habitat e a configuração da paisagem interferem na média ponderada da comunidade de Cangas Ferruginosas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia do convênio da Universidade Federal do Pará e Embrapa Amazônia Oriental, que será avaliado pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dra. Bárbara Dunck Oliveira
Universidade Federal do Pará (Membro interno)

Prof. Dr. João Augusto Alves Meira-Neto
Universidade Federal de Viçosa (Membro externo)

Dr. Leonardo Carreira Trevelin
Instituto Tecnológico Vale (Membro externo)

Sumário

RESUMO.....	38
<i>ABSTRACT</i>.....	39
1. INTRODUÇÃO.....	42
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
2.1. Área de estudo	44
2.2. Média Ponderada pela Abundância (CWM)	46
2.3. Avaliação da quantidade de habitat, isolamento e heterogeneidade ambiental.....	46
2.4. Análise estatística	47
3. RESULTADOS	48
4. DISCUSSÃO	53
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

A heterogeneidade da paisagem, a quantidade de habitat e a configuração da paisagem interferem na média ponderada da comunidade de Cangas Ferruginosas

RESUMO

As Cangas Ferruginosas são ecossistemas caracterizados por elevada radiação solar, solos ácidos com altas concentrações de metais, baixa disponibilidade de alguns nutrientes e deficiência hídrica. Apesar de apresentarem um conjunto de características ambientais adversas ao desenvolvimento de plantas, demonstram uma elevada biodiversidade e endemismo. Esses ecossistemas são marcados por variações ambientais em composições de solo, que variam desde solos muito rasos sobre a rocha, manchas de areia pura até solos profundos com elevada camada orgânica. Com frequência, as Cangas estão distribuídas insularmente em porções mais elevadas de relevo. Essa condição de insularidade, com manchas de solo com variações na concentração de metais e disponibilidade de nutrientes, influencia a composição florística destas comunidades. Assim, devido a apresentação desta alta irregularidade paisagística, essa comunidade disponibiliza um interessante padrão para revelações de determinadas situações em contribuições relativas da quantidade de habitats, isolamento e heterogeneidade ambiental de uma maneira independente em relação à média ponderada da comunidade (CWM). Assim, o objetivo do trabalho foi entender a contribuição relativa da quantidade de habitats, isolamento e heterogeneidade ambiental de forma independente em CWM na vegetação. Foram amostradas a vegetação em 48 parcelas de 20×10 m em quatro fisionomias: Campo Herbáceo, Campo Arbustivo, Campo Arbustivo de *Vellozia* e Capão Florestal. Na parte dos atributos funcionais foram escolhidas as 8 características como a forma de vida, forma de crescimento, características foliares de área específica da folha, nitrogênio, fósforo, δN^{15} e δC^{13} . Na análise de modelagem foram modelados os valores de CWM como variáveis respostas em modelos lineares mistos e utilizado como variáveis preditoras a quantidade de habitat, isolamento e heterogeneidade ambiental. Neste estudo, foram encontradas diferenças significativas em alguns atributos funcionais como a altura, área específica da folha, concentração foliar de nitrogênio, proporções de isótopos nas folhas de nitrogênio (δ^{15}) e carbono (δ^{13}) entre as fisionomias de Cangas. Deste modo, as condições ambientais que estão presentes nesses ecossistemas como por exemplo: solos rasos, inundações periódicas, deficiência de alguns nutrientes e outros são os principais fatores abióticos de separação entre as fisionomias. Além disso, os diferentes valores de CWM que foram encontrados indicam que a composição e a configuração da paisagem estão influenciando as respostas funcionais das espécies nas comunidades. Os resultados demonstram que abordagens de características funcionais utilizando as métricas ponderadas de abundância na comunidade são bastante importantes. Logo, torna-se possível o fornecimento de mais oportunidades no entendimento de como as situações de composição funcional das comunidades de Cangas são afetados por fatores como a quantidade de habitats, isolamento e heterogeneidade ambiental de maneira independente. Assim, podendo ser utilizado estas abordagens para um melhor entendimento de como a paisagem pode influenciar as respostas funcionais das plantas. Além disso, os fatores de fragmentações das Cangas fornecem uma relevante situação na influência da composição funcional. Sendo que também a quantidade de habitat e isolamento de manchas podem influenciar as diferentes composições funcionais dessas comunidades.

Palavras-chaves: Composição funcional, características funcionais e modelagem.

The heterogeneity of the landscape, the amount of habitat and the configuration of the landscape interfere in the community-weighted mean of Ferruginoses Cangas

ABSTRACT

Ferruginous Cangas are ecosystems characterized by high solar radiation, acidic soils with high concentrations of metals, low availability of some nutrients and water deficiency. Despite having a set of environmental characteristics adverse to the development of plants, they demonstrate a high biodiversity and endemism. These ecosystems are marked by environmental variations in soil compositions, ranging from very shallow soils on the rock, patches of pure sand to deep soils with a high organic layer. Often, Cangas are distributed islandwide in higher relief. This condition of insularity, with soil stains with variations in the concentration of metals and availability of nutrients, influences the floristic composition of these communities. Thus, due to the presentation of this high landscape irregularity, this community provides an interesting pattern for disclosing certain situations in relative contributions of the amount of habitats, isolation and environmental heterogeneity in an independent manner in relation to the community-weighted mean (CWM). Thus, the objective of the work was to understand the relative contribution of the number of habitats, isolation and environmental heterogeneity independently in CWM in vegetation. The vegetation was sampled in 48 plots of 20×10 m in four physiognomies: Grassland, Shrubland, Shrubland of *Vellozia* and Woodland. In terms of functional attributes, 8 characteristics were chosen, such as life form, growth form, leaf characteristics of specific leaf area, nitrogen, phosphorus, $\delta N15$ and $\delta C13$. In the modeling analysis, the CWM values were modeled as response variables in mixed linear models and the quantity of habitat, isolation and environmental heterogeneity were used as predictive variables. In this study, significant differences were found in some functional attributes such as height, specific leaf area, leaf nitrogen concentration, isotope proportions in nitrogen ($\delta 15$) and carbon ($\delta 13$) leaves between Cangas physiognomies. Thus, the environmental conditions that are present in these ecosystems such as: shallow soils, periodic flooding, deficiency of some nutrients and others are the main abiotic factors of separation between physiognomies. In addition, the different CWM values that were found indicate that the composition and configuration of the landscape are influencing the functional responses of species in communities. The results demonstrate that approaches to functional characteristics using weighted metrics of abundance in the community are very important. Therefore, it becomes possible to provide more opportunities to understand how the situations of functional composition of the communities of Cangas are affected by factors such as the number of habitats, isolation and environmental heterogeneity in an independent manner. Thus, these approaches can be used to better understand how the landscape can influence the functional responses of plants. In addition, Cangas fragmentation factors provide a relevant situation in the influence of functional composition. Also, the amount of habitat and isolation of stains can influence the different functional compositions of these communities.

Keywords: Functional composition, functional characteristics and modeling.

Lista de ilustrações

- Figura 1** - Classificação das fisionomias em Cangas Ferruginosas: A) Campos Herbáceos; B) Campos Arbustivos; C) Campos Arbustivos de *Vellozia*; D) Capão Florestal.....10
- Figura 2** - Localização da região amostral das comunidades ecológicas de Cangas Ferruginosas em Carajás.....11
- Figura 3** - Média ponderada pela abundância (CWM) nas características funcionais da altura e área específica da folha em quatro fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo de *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras que são diferentes determinam as diferenças significativas entre as fisionomias15
- Figura 4** - Média ponderada pela abundância (CWM) nas características funcionais de fósforo e nitrogênio foliar em quatro fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo de *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras que são diferentes determinam as diferenças significativas entre as fisionomias16
- Figura 5** - Média ponderada pela abundância (CWM) nas características funcionais dos isótopos de C13 e N15 em quatro fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo de *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras que são diferentes determinam as diferenças significativas entre as fisionomias16

Lista de Tabelas

Tabela 1. Os modelos que foram selecionados para a previsão da média ponderada pela abundância (CWM) na comunidade ecológica de Cangas Ferruginosas.....17

Tabela 2. Valores dos parâmetros de média na seleção de modelo (erros padrão) para a previsão dos atributos funcionais como a altura, área específica da folha, concentração foliar de nitrogênio, concentração foliar de fósforo, proporções de isótopos nas folhas de nitrogênio (δ^{15}) e carbono (δ^{13}) na vegetação das comunidades de Cangas Ferruginosas. As métricas significativas estão destacadas em negrito, * é $p < 0.05$, ** é $p < 0.01$ e *** é $p < 0.001$19

1. INTRODUÇÃO

As Cangas Ferruginosas são ecossistemas caracterizados por elevada radiação solar, solos ácidos com altas concentrações de metais, baixa disponibilidade de alguns nutrientes e deficiência hídrica. Apesar de apresentarem um conjunto de características ambientais adversas ao desenvolvimento de plantas, demonstram uma elevada biodiversidade e endemismo (MOTA, *et al.*, 2018; CHAVES & FERREIRA, 2016). Esses ecossistemas são marcados por variações ambientais em composições de solo, que variam desde solos muito rasos sobre a rocha, manchas de areia pura até solos profundos com elevada camada orgânica (NUNES, *et al.*, 2015). Com frequência, as Cangas estão distribuídas insularmente em porções mais elevadas de relevo (CARMO & JACOBI, 2013). Essa condição de insularidade, com manchas de solo com variações na concentração de metais e disponibilidade de nutrientes, influencia a composição florística destas comunidades (TAKAHASI & MEIRELLES). Assim, este ecossistema naturalmente fragmentado, torna-se um excelente modelo para avaliar os efeitos da paisagem e fragmentação na composição funcional das comunidades.

A vegetação das Cangas é marcada por grande heterogeneidade, variando desde fisionomias campestres que sofrem inundações sazonais, vegetação rupestre arbustiva até pequenos capões florestais. Essas fisionomias são classificadas como Campo Herbáceo; Campo Arbustivo; Campo Arbustivo de *Vellozia glochidea* Pohl e o Capão Florestal (BARBOSA, *et al.*, 2020). Deste modo, devido a apresentação desta alta variação paisagística (SKIRYCZ *et al.*, 2014), as Cangas disponibilizam um interessante cenário para avaliar as contribuições relativas da quantidade de habitats, isolamento e heterogeneidade ambiental de uma maneira independente em relação à média ponderada da comunidade (CWM). Alterações na paisagem devido a quantidade de habitat, isolamento e heterogeneidade afetam diretamente o funcionamento e composição das comunidades por meio de diferentes mecanismos ecológicos (ZAMBRANO, *et al.*, 2019).

Na teoria do nicho é destacado o papel da heterogeneidade do habitat na disponibilidade de recursos e condições no ambiente para a ocorrência das espécies, desta maneira, sendo permitido a convivência e persistência de maiores números de espécies no mesmo espaço funcional da comunidade ecológica (YANG, *et al.*, 2015; STEIN, *et al.*, 2014). Essa heterogeneidade ambiental é formada por dois componentes diferentes: heterogeneidade composicional (magnitude da variação nas condições ambientais) quanto a heterogeneidade configuracional (estrutura espacial da variação nas condições ambientais). No entanto, ainda não está evidente como esses fatores de heterogeneidade ambiental na paisagem podem influenciar em respostas funcionais das espécies nas comunidades ecológicas (BEN-HUR, *et al.*, 2020).

A heterogeneidade ambiental tem sido destacada como uma condição chave em relação a biodiversidade. Entretanto, pode ter efeitos negativos em processos de fragmentação das paisagens (KATAYAMA, *et al.*, 2014). Assim, a situação de determinação das relações negativas em relação a heterogeneidade ambiental e densidade das espécies com eventual linearidade entre os fatores de quantidade de habitat, configuração de habitat e heterogeneidade paisagística desafiam a análise da contribuição referente de cada condição. Desta forma estes preditores influenciam a diversidade da comunidade por diferentes mecanismos ecológicos, inclusive a diversidade funcional conforme demonstrada em (GASTAUER, *et al.*, 2021), tornando-se relevante também testar se afeta as respostas ecológicas das espécies.

Além do mais, as paisagens heterogêneas que são produzidas a partir da fragmentação do ambiente, são relevantes na compreensão dos padrões de composição funcional das espécies (ALARCÓN, *et al.*, 2018). A fragmentação causa mudanças abruptas no formato, configuração e tamanho das manchas resultantes, o que afeta tanto a composição das espécies (ANDRONACHE, *et al.*, 2019; ALARCÓN, *et al.*, 2018), como as respostas funcionais das comunidades ecológicas que são indispensáveis no fornecimento dos serviços ecossistêmicos (ZAMBRANO, *et al.*, 2020; ALARCÓN, *et al.*, 2018).

Portanto, avaliar a diversidade das características funcionais no contexto paisagístico podem ajudar a integrar os conceitos relacionados a heterogeneidade ambiental (GASTAUER, *et al.*, 2021). A média ponderada pela comunidade (CWM) é uma expressão de características funcionais em comunidade ecológica (ZHU, *et al.*, 2016). Logo é definido como a média dos valores que estão presentes na comunidade, ponderada pela abundância relativa de táxons com cada valor. Deste modo, o CWM apresenta utilidades na compreensão da composição funcional que pode indicar a atuação de mecanismos ecológicos em gradientes ambientais (LAVOREL, *et al.*, 2008). Diversos estudos já demonstraram padrões de variação sistemática dos valores na CWM, ou seja, os valores das características funcionais em nível de parcela ponderados pela abundância de espécies ao longo dos gradientes ambientais (MUSCARELLA & URIARTE, 2016).

Neste contexto de avaliar como a paisagem pode influenciar nas respostas funcionais, o objetivo deste trabalho foi compreender a contribuição relativa da quantidade de habitats, isolamento e heterogeneidade ambiental na CWM da vegetação em Cangas Ferruginosas. Nesta situação, as hipóteses do estudo são que a CWM demonstre diferentes respostas funcionais a partir das influências sofridas pela configuração da paisagem. Devido a irregularidade paisagísticas (quantidade de habitat, isolamento e heterogeneidade ambiental) que estão presentes nesta comunidade ecológica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em Cangas Ferruginosas da Serra dos Carajás, localizado no sudeste do estado do Pará na Amazônia Oriental, Brasil. A região deste estudo apresenta manchas nas quais ocorrem as formações de ferro agrupadas, que afloram em altitude mais elevadas na paisagem (700-900 m) e encontram-se imersas na floresta amazônica. De acordo com a classificação de Köppen o clima é “Aw”, que demonstra um clima tropical, com temperaturas elevadas, possui uma estação seca (maio a outubro) e chuvosa (novembro a abril). A precipitação anual é de aproximadamente 2.033 milímetros (VIANA, *et al.*, 2016; MITRE, *et al.*, 2018; SOUZA-FILHO, *et al.*, 2019; BARBOSA, *et al.*, 2020).

Vasconcelos, *et al.*, (2016), citam que as Cangas apresentam diversas fisionomias (**Figura 1**). Assim, foram amostradas (a) Campos Herbáceos que são periodicamente inundados e possuem os solos mais rasos (SCHAEFER, *et al.*, 2016); (b) Campos Arbustivos com solos bem secos e acúmulo de matéria orgânica (NUNES, *et al.*, 2015); (c) Campos Arbustivos de *Vellozia* que possuem bolsões de matéria orgânica e são dominados pela espécie *Vellozia glochidea* Pohl (SCHAEFER, *et al.*, 2015) e (d) Capão Florestal que apresentam solos mais profundos, maior disponibilidade hídrica e alguns nutrientes, permitindo o desenvolvimento de matas altas (SCHAEFER, *et al.*, 2018).

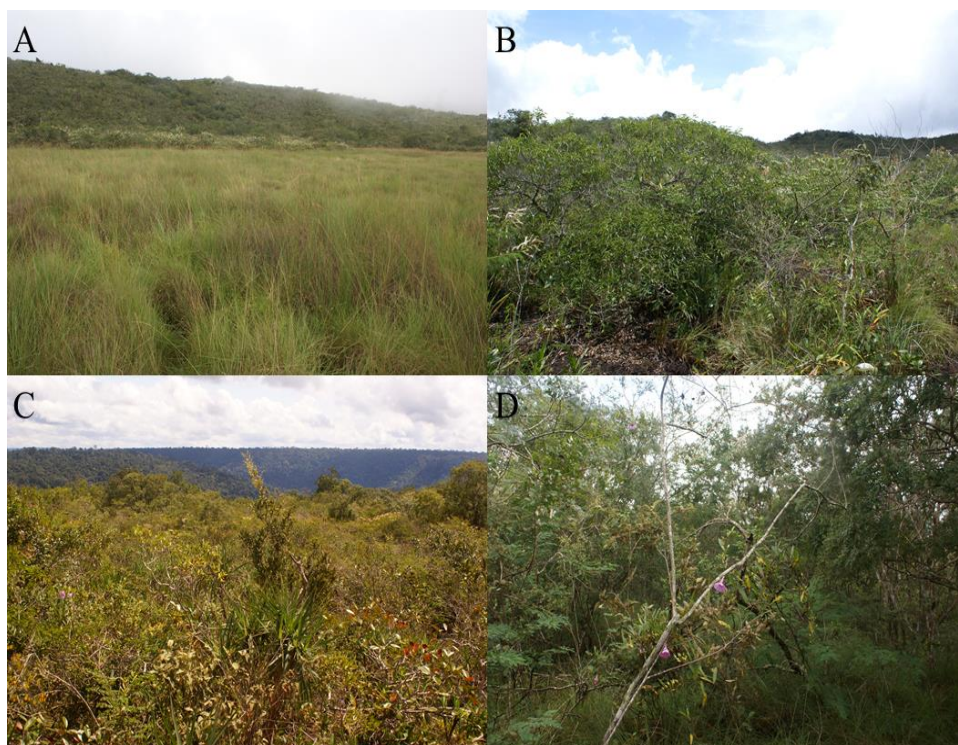


Figura 1 - Classificação das fisionomias em Cangas Ferruginosas: A) Campos Herbáceos; B) Campos Arbustivos; C) Campos Arbustivos de *Vellozia*; D) Capão Florestal.

2.2. Amostragem da vegetação

A coleta de dados aconteceu em 5 áreas de Cangas, sendo que estas áreas estão localizadas em três Serras, sendo elas, Serras Norte (3), Bocaina (1) e Sul (1) da província de Carajás. Foram amostradas nestas áreas a vegetação em 48 parcelas, os quais foram dispostas em 12 transectos em diferentes partes das Cangas (**Figura 2**). O número e a localização dos transectos foram previamente definidos com base no tamanho e frequências das fisionomias de Cangas e no acesso para alcançar a cobertura o mais completa possível em toda a comunidade. Ao todo, foram instalados pontos de amostragem no Campo Herbáceo (10 parcelas), Campo Arbustivo (15), Campo Arbustivo de *Vellozia* (15) e Capão Florestal (8).

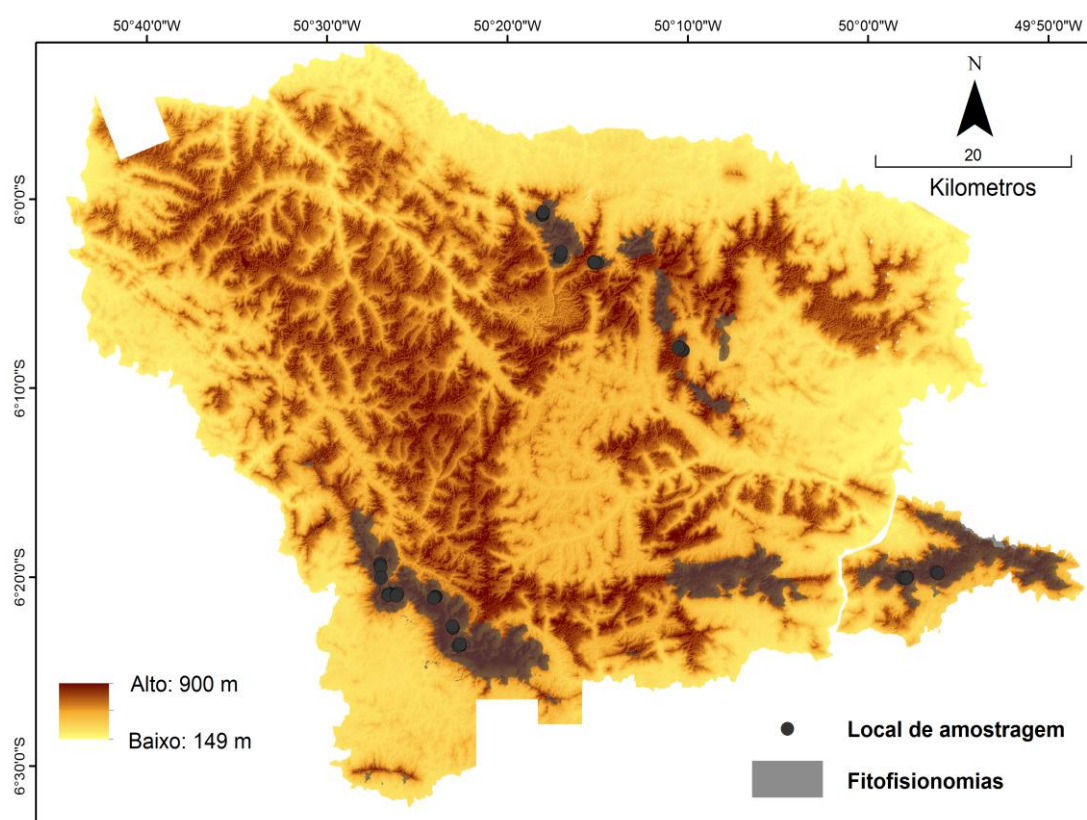


Figura 1 - Localização da região amostral das comunidades ecológicas de Cangas Ferruginosas em Carajás. Fonte: Adaptado de Gastauer, *et al.*, (2021).

Em cada parcela de 10x20m, foram distribuídas aleatoriamente cinco subparcelas de 1x1m, no qual foram inventariadas todas as espécies de angiospermas superiores a 5 cm. As espécies de plantas que não foram reconhecidas durante o período na campanha de campo foram coletadas e identificadas por consulta ao herbário (Museu Paraense Emílio Goeldi, localizado no município de Belém/Brasil - MPEG) e também foram realizadas consultas aos especialistas. Ao todo foram amostradas um total de 216 espécies de angiospermas, nos quais estão distribuídas em 145 gêneros e 60 famílias.

2.3. Média Ponderada pela Abundância (CWM)

Foram selecionadas seis características, sendo elas, área foliar específica (SLA), concentração foliar de nitrogênio (N) e fósforo (P), altura, proporções de isótopos nas folhas de nitrogênio (δ^{15}) e carbono (δ^{13}). Foram priorizadas características que estão relacionadas diretamente em situações de tolerância a severidade ambiental, utilização dos recursos, interação de como as espécies respondem em ecossistema naturalmente fragmentado e dominância funcional na comunidade (MITRE, *et al.*, 2018; GASTAUER, *et al.*, 2021). Além disso, essas características correspondem aos fatores chaves das estratégias ecológicas das plantas no contexto das variáveis paisagistas como a quantidade de habitats, isolamento e heterogeneidade ambiental.

No levantamento da altura, foram realizadas consultas em literatura de sites em Botânica: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/PrincipalUC/PrincipalUC.do;jsessionid=F263DB5F1DFBB391F234CBC2DB2C263> e <https://rodriguesia.jbrj.gov.br/>. Além disso, foram usados os livros Paisagens e Plantas de Carajás (ZAPPI, 2017) e Plantas nativas para recuperação de áreas de mineração em Carajás (ZAPPI, *et al.*, 2018). Para as demais características (SLA, N, P e isótopos), foram coletadas cinco folhas inteiramente expandida de cada espécie em cada parcela e analisado os parâmetros baseados em protocolos padronizados de Pérez-Harguindeguy *et al.*, (2013).

Deste modo, foram produzidas matrizes de características funcionais das espécies, sendo em colunas as características funcionais escolhidas e linhas as espécies que foram registradas na comunidade (PETCHEY & GASTON, 2002). Assim, o CWM foi calculado através do pacote FD (LALIBERTÉ, *et al.*, 2014) no software R versão 3.6 (R CORE TEAM, 2019).

2.4. Avaliação da quantidade de habitat, isolamento e heterogeneidade ambiental

Para avaliar o efeito da quantidade de habitat, isolamento e heterogeneidade ambiental na CWM, foi utilizada uma abordagem de ecologia da paisagem, quantificando estrutura dentro de amostras (tampões) da paisagem. Nesta situação um mapa com cobertura terrestre foi produzido utilizando a ferramenta de digitalização visual e a classificação manual em escala de valores 1:5000. Sendo utilizado as imagens de elevada resolução de 1x1 m² no qual estão disponíveis (Google Earth). Neste mapa, as diferenças entre as fisionomias foram detalhadas (e.g. áreas gramíneas, vegetação aberta, rochas, arbustiva, florestas e outros). Baseada nessa classificação, foi possível determinar as 4 principais fisionomias: Campo Herbáceo, Campo Arbustivo, Campo Arbustivo de *Vellozia* e Capão Florestal. Foram construídos os buffers de 50, 100 e 500 m de raio em torno de cada ponto da amostra, sendo calculado métricas paisagísticas utilizando o fragstats 4.2 (GASTAUER, *et al.*, 2021).

Enquanto a estrutura paisagística foi quantificada para cada um desses tampões utilizando as variáveis independentes: quantidade de habitat, isolamento das manchas em fisionomias, heterogeneidade fisionômica e a variável resposta CWM em cada parcela amostral. A quantidade de fisionomia foi considerada uma medida em relação a quantidade de habitat, representando a quantidade de habitat da fisionomia em um determinado tampão (por exemplo, a quantidade de Campo Arbustivo *Vellozia* em tampão em torno de um ponto de amostragem de Campo Arbustivo *Vellozia*), capturando dessa maneira a disponibilidade de micro-habitats presentes nas Cangas.

2.5. Análise estatística

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o software R versão 3.6 ([R CORE TEAM, 2019](#)). Foi verificado a normalidade e homogeneidade dos dados, para verificar se existem diferenças na variável resposta (CWM) em diferentes fisionomias (variáveis preditoras). Posteriormente, realizou-se uma Análise de Variância (ANOVA), seguido do teste *post-hoc* de Tukey. Em relação aos dados que não seguiram os padrões de normalidade e homogeneidade foram realizados uma análise de Kruskal-Wallis, seguido do teste *post-hoc* de Dunn.

Na parte da modelagem foi realizado um processo de seleção de modelos em etapas, como: a identificação da melhor estrutura aleatória, continuação da melhor estrutura aleatória para verificar se há autocorrelação espacial, identificação da escala espacial mais importante, utilizando a estrutura aleatório e o tipo de autocorrelação espacial em cima do detectado e, por último, o modelo global formado pelas variáveis paisagísticos na sua mais relevante escala espacial, com as melhores estrutura aleatória e o tipo de autocorrelação espacial.

Desta maneira, os valores de CWM foram modelados como variáveis respostas em modelos lineares mistos, utilizando como variáveis preditoras a quantidade de habitat, isolamento e heterogeneidade ambiental da comunidade ecológica. Essas variáveis preditoras ainda foram todas escalonadas antes da análise. Todos esses processos de modelagem foram realizados usando-se da função Lmer do pacote “lme4” (HARRISON, *et al.*, 2018). Assim sendo, primeiramente foram testadas as diferentes estruturas aleatórias, incluindo amostragem em transecto, formação e corpos de Cangas como efeitos aleatórios, e comparado aos modelos montados utilizando REML (LIN, *et al.*, 2013), baseado no Critério de Informação Akaike (AIC). Em seguida, foi avaliada a escala espacial mais relevante em cada métrica paisagística, comparando aos modelos equipados com métricas calculadas em diferentes escalas de buffers 50, 100 e 500 m de raio (GASTAUER, *et al.*, 2021). Logo, a melhor estrutura aleatória identificada foi a formação devido a apresentação do melhor modelo ajustado na análise de modelagem.

Na última etapa, foram realizados os modelos globais (efeitos mistos) contendo as métricas na escala espacial mais relevante que foram identificadas, e usado a função “draga” pertencente ao pacote “MuMIn” (BARTÓN, 2014). Para a seleção de modelo em todas as combinações possíveis de menos variáveis preditoras não relacionadas ($r < 0.6$). O AIC foi utilizado para selecionar os melhores modelos, e todos os modelos com ΔAIC menos de 2 foram considerados igualmente parcimoniosos. Assim, quando mais de um modelo foi selecionado, calculou-se os parâmetros medianos de modelos e os erros padrões incondicionais usando a função `model.avg` do pacote “MuMIn”, e os testes de razão de probabilidade avaliaram a significância de cada parâmetro neste modelo mediado. Portanto, o modelo final foi validado por plotagem de valores residuais versus instalados, residuais versus preditores e observando a distribuição dos resíduos (GASTAUER, *et al.*, 2021).

3. RESULTADOS

A média dos resultados de CWM diferiram entre as fisionomias das comunidades de Cangas. Logo, os Campos Herbáceos apresentaram os maiores valores da CWM para as características de composição isotópica de nitrogênio (δ^{15}) e carbono (δ^{13}) foliar. Enquanto os Capões Florestais apresentaram os maiores valores nas demais características funcionais como a concentração de nitrogênio e fósforo foliar, altura e SLA. Os Campos Arbustivos e Campos Arbustivos de *Vellozia* apresentaram valores intermediários para a maioria das características funcionais. A exceção foi o Campo arbustivo de *Vellozia* que apresentou a menor área foliar específica (**Figuras 3, 4 e 5**).

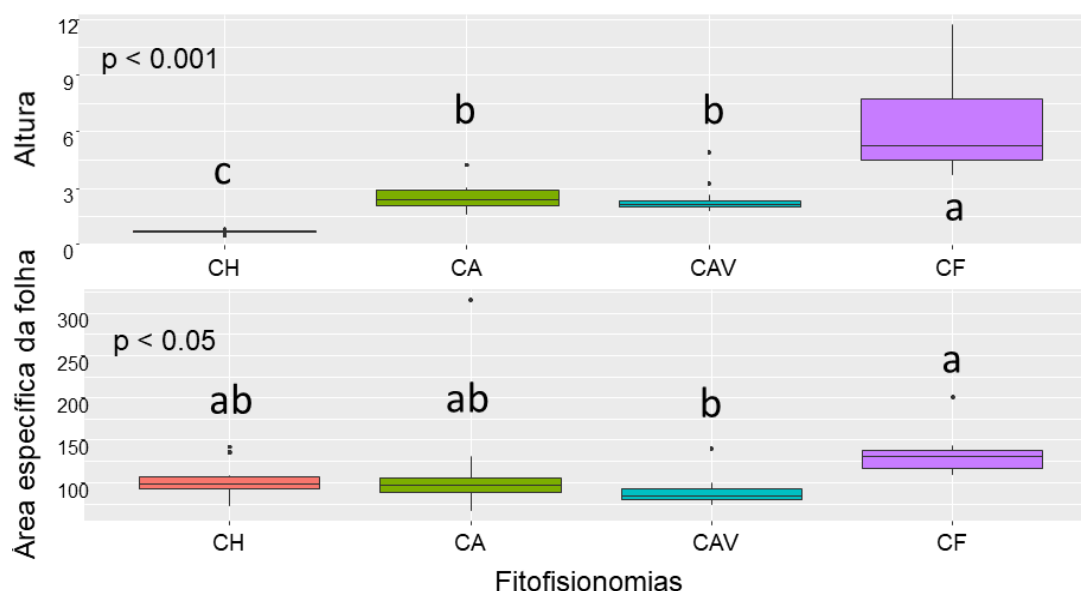


Figura 3 - Média ponderada pela abundância (CWM) para as características funcionais da altura e área foliar específica em quatro fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo de *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras que são diferentes determinam as diferenças significativas entre as fisionomias ($p < 0.001$).

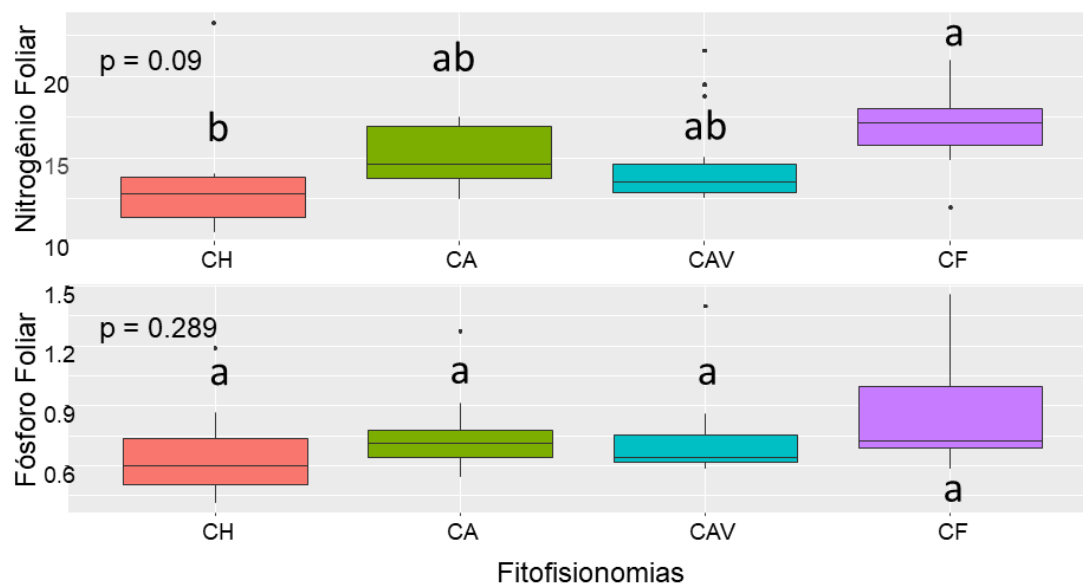


Figura 4 - Média ponderada pela abundância (CWM) para as características funcionais de nitrogênio e fósforo foliar em quatro fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras que são diferentes determinam as diferenças significativas entre as fisionomias ($p < 0.001$).

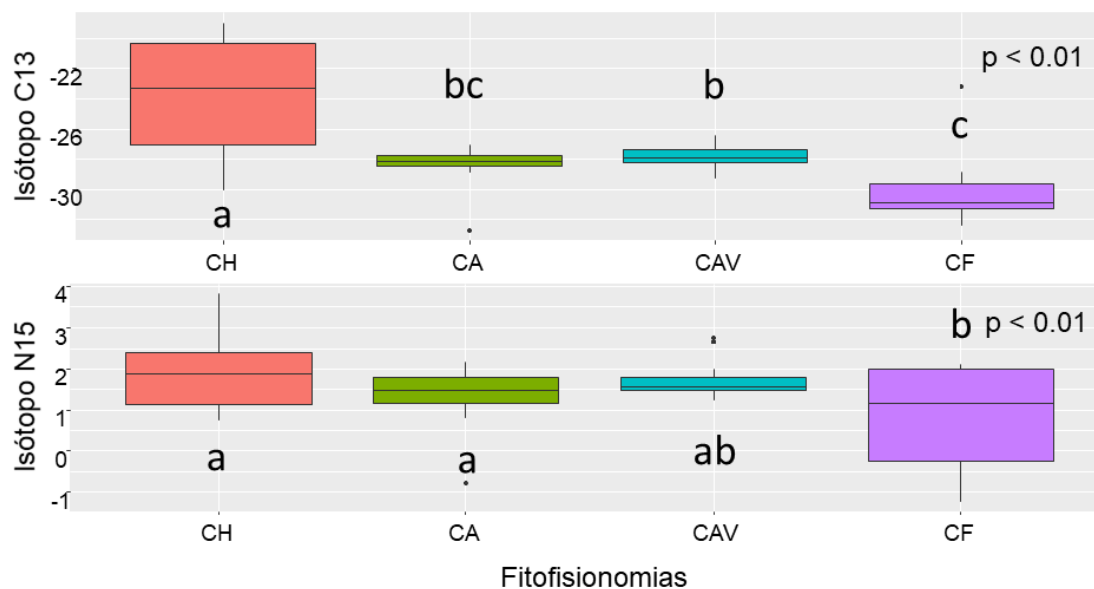


Figura 5 - Média ponderada pela abundância (CWM) nas características funcionais da composição isotópica do carbono (δ^{13}) e nitrogênio (δ^{15}) foliar em quatro fisionomias de Cangas Ferruginosas: Campo Herbáceo (CH), Campo Arbustivo (CA), Campo Arbustivo dominado por *Vellozia* (CAV) e Capão Florestal (CF). As letras que são diferentes determinam as diferenças significativas entre as fisionomias ($p < 0.001$).

Quantidade de habitat, isolamento e heterogeneidade ambiental como variáveis preditoras da CWM

As medidas de quantidade das de habitat das fisionomias estudadas foram computadas utilizando diferentes tampões (50, 100 e 500 m). As respostas das variáveis paisagísticas diferiram entre as dimensões da diversidade nas Cangas Ferruginosas. Em relação ao atributo funcional altura, foram quatro os modelos nos quais se encaixaram, onde contém as variáveis da heterogeneidade ambiental, quantidade de habitat em todos os 4 modelos, riqueza fisionômica (1 modelo), isolamento de manchas (1 modelo) e rugosidade da paisagem fisionômica (1 modelo). No atributo funcional da área específica da folha foram selecionados quatro modelos diferentes, contendo rugosidade paisagística e quantidade de habitat (4 modelos), riqueza fisionômica, heterogeneidade e isolamento de mancha (1 modelo cada) (Tabela 1).

Para a concentração foliar de nitrogênio foram selecionados cinco modelos diferentes, contendo isolamento de manchas (5 modelos), riqueza fisionômica (3 modelos), rugosidade paisagística (2 modelos) e quantidade de habitat (1 modelo cada). Na concentração foliar de fósforo também foram cinco modelos diferentes, contendo isolamento de manchas (5 modelos), riqueza fisionômica, quantidade de habitat, heterogeneidade e rugosidade paisagística (1 modelo cada). Com relação a proporção de isótopos nas folhas (δ^{15}) foram dois modelos diferentes, contendo riqueza fisionômica e rugosidade paisagística (2 modelos), heterogeneidade e isolamento de manchas (1 modelo cada). Por último, os isótopos nas folhas (δ^{13}) foram cinco modelos diferentes, contendo rugosidade paisagística, quantidade de habitat, riqueza fisionômica, heterogeneidade e isolamento de mancha (1 modelo cada). Ver (Tabela 1).

Tabela 1. Os modelos que foram selecionados para a previsão da média ponderada pela abundância (CWM) na comunidade ecológica de Cangas Ferruginosas.

Variável resposta	Parâmetros dos modelos que foram selecionados	Df	logLik	Aic	Delta	Peso
Altura	Heterogeneidade (500m) + Quantidade de habitat (500m)	5	-78.666	167.3	0	0.210
	Riqueza fisionômica (50m) + Heterogeneidade (500m) + Quantidade de habitat (500m)	6	-78.509	169.0	1.68	0.091
	Heterogeneidade (500m) + Rugosidade paisagística + Quantidade de habitat (500m)	6	-78.530	169.1	1.73	0.089

	Isolamento de manchas + Heterogeneidade (500m) + Quantidade de habitat (500m)	6	-133.86	279.7	1.33	0.092
Sla	Rugosidade paisagística + Quantidade de habitat (50m)	5	-238.484	487.0	0	0.335
	Heterogeneidade (50m) + Rugosidade paisagística + Quantidade de habitat (50m)	6	-238.120	488.2	1.27	0.188
	Isolamento de manchas + Rugosidade paisagística + Quantidade de habitat (50m)	6	-238.475	489.0	1.98	0.132
	Riqueza fisionômica (50m) + Rugosidade paisagística + Quantidade de habitat (50m)	6	-238.483	489.0	2	0.131
Nitrogênio foliar	Riqueza fisionômica (50m) + Isolamento de manchas + Heterogeneidade (500m)	6	-111.230	234.5	0	0.191
	Isolamento de manchas	4	-113.816	235.6	1.17	0.106
	Isolamento de manchas + Rugosidade paisagística	5	-112.964	235.9	1.47	0.091
	Riqueza fisionômica (50m) + Isolamento de manchas + Quantidade de habitat (100m)	6	-112.147	236.3	1.83	0.076
	Riqueza fisionômica (50m) + Isolamento de manchas + Rugosidade paisagística	6	-112.187	236.4	1.91	0.073
	Riqueza fisionômica (50m) + Isolamento de manchas	5	-113.195	236.4	1.93	0.073
Fósforo foliar	Isolamento de manchas	4	8.227	-8.5	0	0.186
	Isolamento de manchas + Heterogeneidade (50m)	5	8.584	-7.2	1.28	0.098
	Isolamento de manchas + Quantidade de habitat (50m)	5	8.395	-6.8	1.66	0.081

	Riqueza fisionômica (50m) + Isolamento de manchas	5	0.081	-6.7	1.74	0.078
	Isolamento de manchas + Rugosidade paisagística	5	8.231	-6.5	1.99	0.069
δ^{13}	Riqueza fisionômica (50m) + Heterogeneidade (500m) + Rugosidade paisagística	6	-109.014	230.0	0	0.228
	Riqueza fisionômica (50m) + Isolamento de manchas + Rugosidade paisagística	6	-109.649	231.3	1.27	0.121
δ^{15}	Riqueza fisionômica (50m)	4	-59.429	126.9	0	0.099
	Quantidade de habitat (50m)	4	-59.788	127.6	1.30	0.070
	Heterogeneidade (50m)	4	-59.831	127.7	1.41	0.066
	Isolamento de manchas	4	-59.965	127.9	1.68	0.058
	Rugosidade paisagística	4	-60.010	128.0	1.77	0.056

Com relação aos resultados obtidos da média na seleção de modelos, o atributo funcional da área específica da folha se associou de uma forma significativa as variáveis paisagísticas da quantidade de habitat e rugosidade da paisagem, enquanto os atributos funcionais foliares de nitrogênio e fósforo se associaram significativamente ao isolamento de manchas (**Tabela 2**). Em relação as outras variáveis paisagísticas não apresentaram respostas de efeitos significativos nos parâmetros dos atributos funcionais que foram analisados.

Tabela 2. Valores dos parâmetros de média na seleção de modelo (erros padrão) para a previsão dos atributos funcionais como a altura, área específica da folha, concentração foliar de nitrogênio, concentração foliar de fósforo, proporções de isótopos nas folhas de nitrogênio (δ^{15}) e carbono (δ^{13}) na vegetação das comunidades de Cangas Ferruginosas. As métricas significativas estão destacadas em negrito, * é $p < 0.05$, ** é $p < 0.01$ e *** é $p < 0.001$.

	Altura	Área específica da folha	Foliar de nitrogênio	Foliar de fósforo	Isótopos de nitrogênio δ^{15}	Isótopos de carbono δ^{13}
Intercepto	3.350 (1.346)	106.339 (5.013)	14.988 (1.147)	0.754 (0.080)	-27.433 (1.402)	1.480 (0.218)
Riqueza fisionômica	0.129 (0.215)	-0.018 (2.077)	-0.460 (0.485)	-0.002 (0.012)	0.859 (0.512)	-0.047 (0.098)
Quantidade de habitat	0.726 (0.591)	-19.032 (5.844) **	-0.110 (0.360)	-0.003 (0.015)	0.141 (0.330)	0.033 (0.093)
Heterogeneidade fisionômica	0.328 (0.234)	1.050 (3.173)	0.254 (0.489)	0.005 (0.017)	-0.699 (0.545)	-0.099 (0.126)
CLASS_EN N_MN	-0.298 (0.228)	0.124 (2.430)	1.133 (0.411) **	0.072 (0.032) *	-0.134 (0.338)	-0.072 (0.147)
Rugosidade da paisagem	0.040 (0.202)	15.185 (5.677) **	-0.143 (0.309)	0.0003 (0.011)	-0.329 (0.449)	-0.022 (0.131)

4. DISCUSSÃO

Neste estudo, foram encontradas diferenças significativas nos atributos funcionais (altura, área foliar específica, concentração foliar de nitrogênio, proporções de isótopos nas folhas de nitrogênio (δ^{15}) e carbono (δ^{13})) entre as fisionomias das comunidades de Cangas. As condições ambientais que estão presentes nesses ecossistemas ferruginosos como, por exemplo, solos rasos, inundações periódicas, deficiência de alguns nutrientes e outras são os principais fatores abióticos que levam a diferenciação entre as fisionomias (SCHAEFER, *et al.*, 2016a; SCHAEFER, *et al.*, 2016b). Além disso, foi mostrado que a composição e a configuração da paisagem estão influenciando as respostas funcionais das espécies nas comunidades.

Com relação a média dos atributos ponderado pela comunidade, conforme esperado, os Campos Herbáceos apresentaram uma menor altura, bem como a quantidade de plantas lenhosas em comparação ao Capão Florestal. Desta maneira, as situações de elevada pedogênese que estão

presente nas fisionomias nos Capões Florestais são responsáveis pelo desenvolvimento das espécies com tamanho arbóreo, que acabam limitando os processos de estabelecimento de vegetação rupestre (MARTINS, *et al.*, 2012; GASTAUER, *et al.*, 2021).

Além disso, no Capão Florestal também foi observado as maiores concentrações de nitrogênio e fósforo foliar. Mitre, *et al.*, (2018) destacam que as concentrações foliares elevadas de N e P no Capão Florestal podem indicar uma maior disponibilidade desses macronutrientes nesta fisionomia, onde os solos são mais profundos e há elevada quantidade de matéria orgânica quando comparados as demais fisionomias. Essa profundidade de solo também pode ter influenciado na menor assinatura isotópica encontrada para o C no Capão Florestal. Uma menor δ^{13} pode ser um indicativo de uma menor eficiência do uso da água (DAWSON, *et al.*, 2002) e, nessa fisionomia, há déficits hídricos menores com uma maior capacidade de retenção de água no solo nessa fisionomia.

Enquanto os resultados dos maiores valores de SLA também foram encontrados na fisionomia do Capão Florestal, diferindo do Campo Arbustivo de *Vellozia* que apresentou os menores valores neste atributo funcional. Um menor SLA geralmente está relacionado a maior longevidade foliar e taxas mais lentas de crescimento (PÉREZ-HARGUINDEGUY, *et al.*, 2013).

As variações nos valores de SLA podem ser associados com as diferenças entre as condições ambientais como a disponibilidade de nutrientes e fertilidade do solo (LIU, *et al.*, 2017), nos quais em ambientes mais limitantes as espécies tendem a apresentar maior investimento para construção dos tecidos foliares, ou seja, menor SLA (PÉREZ-HARGUINDEGUY, *et al.*, 2013). Portanto, o substrato rochoso e as situações de menor acúmulo de solo nas fisionomias dos Campos Herbáceos, Campos Arbustivos e Campos Arbustivos de *Vellozia* estariam favorecendo o estabelecimento de plantas com maior eficiência na utilização dos recursos, ou seja, com menores valores de SLA.

Os maiores valores na composição isotópica do ^{15}N foram encontrados nos Campos Herbáceos, divergindo dos Capões Florestais. Além disso, estes valores foram parcialmente semelhantes aos resultados encontrados e mencionados em Mitre, *et al.*, (2018). Ainda de acordo com Coletta, *et al.*, (2009) são diversos os fatores ambientais que devem ser levados em consideração nos padrões de variação do d^{15}N nas comunidades ecológicas, como por exemplo: as associações dos fungos micorrízios, a variação do teor de d^{15}N na matéria orgânica do solo, processos de imobilização e mineralização do nitrogênio na comunidade.

Mitre, *et al.*, (2018) ainda destacam que a variação dos valores de d^{15}N acontece em ecossistemas que possuem uma baixa disponibilidade de nutrientes. Desta maneira, esses resultados

podem estar associados com a baixa disponibilidade de nutrientes que estão presentes nas Cangas. Assim é indicado condições ou fatores de ciclagem com características mais abertas, além da presença dos diferentes processos ecológicos, nos quais estão incluídas diversas formas de estratégias na exploração de nitrogênio disponível.

Em relação aos resultados encontrados a respeito da influência das variáveis paisagísticas nos atributos funcionais das plantas das comunidades ecológicas das Cangas, os modelos demonstraram que diferentes fatores paisagísticos como a heterogeneidade ambiental e isolamento de manchas influenciam nos atributos funcionais ponderados pela comunidade. Desta forma, esses resultados demonstram que as diferentes respostas funcionais das plantas são influenciadas pela paisagem. Devido aos fatores de irregularidade paisagísticas como a quantidade de habitat, isolamento e heterogeneidade ambiental que estão presentes nestas comunidades ecológicas.

Os resultados encontrados ainda sugerem que a configuração da paisagem pode ter efeitos em relação aos atributos funcionais dominantes das espécies de plantas da comunidade de Cangas. Deste modo, por exemplo um aumento na heterogeneidade ambiental pode melhorar o funcionamento das comunidades ecológicas, devido a oportunidade da complementaridade funcional.

Willians & Houseman (2014) citam que a heterogeneidade ambiental, no qual está incluído tanto as variações temporais, como espaciais são os principais fatores para explicar as diferenças na diversidade das espécies entre as comunidades. Logo, essa condição de heterogeneidade nas comunidades permitem a partição dos recursos e a coexistência entre as espécies. Além do mais, Perovic, *et al.*, (2015) destacam que a heterogeneidade ambiental (configuracional) pode ter efeitos elevados em atributos funcionais dominantes (média ponderada pela comunidade - CWM) das espécies na comunidade.

Ainda com relação aos resultados que foram encontrados de maneira significativa a SLA foi associada as variáveis de quantidade de habitat e rugosidade das paisagens. Assim sendo, um elevado valor de CWM no atributo funcional da SLA pode demonstrar o domínio de espécies com características funcionais de elevada produtividade (ALARCÓN, *et al.*, 2018). Desta maneira, também pode indicar um processo de competição mais forte por condições de luminosidade, sendo mais difícil a persistência da vegetação rasteira (BREITSCHWERDT, 2018).

Entretanto, os processos de filtragem ambiental tornam-se mais intensos em fragmentos que apresentam condições de tamanhos menores, isolados e irregulares com contrastes de borda elevados, reduzindo os fatores ou condições de variabilidade da folha na comunidade ecológica ao filtrar

espécies com características foliares resistentes ao estresse abiótico e, aumentando a taxa de mortalidade de árvores com portes mais elevados dentro dos fragmentos. Deste jeito, essa condição acaba proporcionando um lugar ao crescimento de espécies com menor densidade de madeira e elevada demanda de luz, o que reduz a biomassa acima do solo e o carbono armazenado na comunidade (ALARCÓN, *et al.*, 2018).

Enquanto Sitzia, *et al.*, (2017), também relatam que no geral, os estudos em diversas maneiras concordam que os fatores, nos quais estão presentes as configurações da paisagem podem exercer ou determinar uma forte condição de filtragem ambiental nos processos da comunidade em relação as características funcionais das espécies.

A concentração de nitrogênio e fósforo foliar foram associados com o isolamento de manchas. Rivas, *et al.*, (2018), relatam que a proporção espacial do processo de fragmentação e o seu nível de isolamento são preditores que podem afetar diretamente a biodiversidade das espécies. Entretanto, Spiesman, *et al.*, (2018), destacam que a qualidade do habitat pode ter efeitos sobre as comunidades ecológicas. Assim sendo, alguns processos como a decomposição da serapilheira, podem ter efeitos positivos como a conexão das condições abióticas e fatores bióticos que estão presentes nas manchas, sendo possível a reciclagem dos nutrientes como o nitrogênio e fósforo.

Ainda com relação ao nitrogênio foliar para Cho, *et al.*, (2013), é uma excelente ferramenta para avaliar as questões de produtividade do ecossistema. Sendo que as situações de degradação florestal produzidas a partir de atividades antrópicas, ou na maioria dos casos quando a paisagem é fragmentada por diversas manchas que apresentam diferentes formas e tamanho que são cercados por diferentes tipos de vegetações. As condições das adversidades ambientais que podem ser geradas caso esta fragmentação seja elevada são os fatores das perdas das concentrações de nutrientes, diminuição da diversidade de espécies, perda da fertilidade do solo, alterações nos estoques de nutrientes da serapilheira e produtividade da vegetação e outros.

Esses fatores de alterações espaciais na estruturação da paisagem, que estão associados ou relacionados com propriedades de tamanho e conexão das manchas, podem ser também responsáveis pela alteração da comunidade ecológica a partir dos estoques vegetais do carbono (ZITER, *et al.*, 2013). Portanto, de acordo com o aumento das áreas de manchas, os fragmentos podem possuir condições de maiores heterogeneidade ambiental, podendo estar disponível maiores oportunidades de nichos ecológicos com uma elevada forma de exploração dos recursos que estão disponíveis (GASTAUER, *et al.*, 2021; RIVAS, *et al.*, 2016).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste trabalho demonstram que abordagens de características funcionais utilizando as métricas ponderadas de abundância na comunidade ecológica são bastante importantes. Logo, torna-se possível o fornecimento de mais oportunidades no entendimento de como as situações de composição funcional das comunidades de Cangas Ferruginosas são afetados por fatores como a quantidade de habitats, isolamento e heterogeneidade ambiental de maneira independente. Desta forma, podendo ser utilizado estas abordagens para um melhor entendimento de como a paisagem pode influenciar as respostas funcionais das plantas na comunidade.

Ainda é possível destacar que o processo da filtragem ambiental nas paisagens, pode está selecionando algumas características funcionais na comunidade ecológica. Sendo que a filtragem ambiental pode ter resultados mais intenso em manchas mais isoladas, afetando assim a diversidade funcional das plantas. Assim sendo, os fatores de fragmentações das Cangas fornecem uma relevante situação na influência da composição funcional das plantas. Sendo que também a quantidade de habitat e isolamento de manchas podem influenciar as diferentes composições funcionais nas comunidades ecológicas de Cangas.

Portanto é indicado através desses resultados de estudo ser necessário que todo o gradiente ambiental das comunidades ecológicas em Cangas seja preservado. Buscando uma maior manutenção em sua elevada heterogeneidade ambiental entre as fisionomias, proporcionando que as populações viáveis de diferentes espécies de plantas sejam mantidas nestas localidades. Esses diferentes mecanismos subjacentes precisam ser levados em consideração em projetos ou planos de conservação para as comunidades ecológicas de Cangas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALARCÓN, S. R.; ERASO, N. R.; RINCÓN, I. P.; CAMACHO, R. L. Effects of fragmentation on functional diversity associated with aboveground biomass in a high Andean forest in Colombia. **Landscape Ecol**, v. 33, p. 1851-1864, 2018.
- ANDRONACHE, I.; MARIN, M.; FISCHER, R.; AHAMMER, H.; RADULOVIC, M.; CIOBOTARU, A. M.; JELINEK, H. F.; LEVA, A. D.; PINTILII, R. D.; DRAGHICI, C. C.; HERMAN, G. V.; NICULA, A. S.; SIMION, A. G.; LOGHIN, L. V.; DIACONU, D. C.; PEPTENATU, D. Dynamics of Forest Fragmentation and Connectivity Using Particle and Fractal Analysis. **Scientific Reports**, v. 9, p. 1-9, 2019.
- BARBOSA, L. C.; VIANA, P. L.; TEODORO, G. S.; CALDEIRA, C. F.; RAMOS, S. J.; GASTAEUR, M. A wildfire in an Amazonian *canga* community maintained important ecosystem properties. **International Journal of Wildland Fire**, p. 1-7, 2020.
- BARTON, K. Pacote 'MuMIn' Versão 1.13.4. <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>, 2015.
- BEN-HUR, E.; KADMON, R. Heterogeneity-diversity relationships in sessile organisms: a unified framework. **Ecology Letters**, v. 23, p. 193-207, 2020.
- CARMO, F. F.; JACOBI, C. M. A vegetação de canga no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: caracterização e contexto fitogeográfico. *Rodriguésia*, v. 64, p. 527-541, 2013.
- CHO, M. A.; RAMOELO, A.; DEBBA, P.; MUTANGA, O.; MATHIEU, R.; DEVENTER, H. V.; NDLOVU, N. Assessing the effects of subtropical forest fragmentation on leaf nitrogen distribution using remote sensing data. **Landscape Ecology**, v. 28, p. 1479-1491, 2013.
- CHAVES, P. P.; FERREIRA, L. V. O efeito da sazonalidade da precipitação na florística e estrutura da regeneração natural dos campos rupestres da Serra Norte de Carajás, Pará, Brasil. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.**, v. 11, p. 103-116, 2016.
- COLETTA, L. D.; NARDOTO, G. B.; LATANSIO-AIDAR, S. R.; ROCHA, H. R.; AIDAR, M. P. M.; OMETTO, J. P. H. B. Isotopic view of vegetation and carbon and nitrogen cycles in a cerrado ecosystem, southeastern Brazil. **Sci. Agric**, v. 66, p. 467-475, 2009.
- CRAINE, J. M.; BROOKSHIRE, E. N. J.; CRAMER, M. D.; HASSELQUIST, N. J.; KOBAYASHI, K.; SPIOTTA, E. M.; WANG, L. Ecological interpretations of nitrogen isotope ratios of terrestrial plants and soils. **Plant Soil**, v. 396, p. 1-26, 2015.
- GASTAUER, M.; MITRE, S. K.; CARVALHO, C. S.; TREVELIN, L. C.; SARMENTO, P. S. M.; MEIRA NETO, J. A. A.; C. F.; CALDEIRA, S. J.; RAMOS, S. J.; JAFFÉ, R. Landscape heterogeneity and habitat amount drive plant diversity in Amazonian canga ecosystems. **Landscape Ecol**, v. 36, p. 1-15, 2021.

HARRISON, X. A.; DONALDSON, L.; CORREA-CANO, M. E.; EVANS, J.; FISHER, D. N.; GOODWIN, C. E. D.; ROBINSON, B. S.; HODGSON, D. J.; INGER, R. A brief introduction to mixed effects modelling and multi-model inference in ecology. **PeerJ**, v. 6, p. 1-32, 2018.

KATAYAMA, N.; AMANO, T.; NAOE, S.; YAMAKITA, T.; KOMATSU, I.; TAKAGAWA, S. C.; SATO, N.; UETA, M.; MIYASHITA, T. Landscape Heterogeneity–Biodiversity Relationship: Effect of Range Size. **PLoS ONE**, v. 9, p. 1-8, 2014.

LALIBERTÉ, E.; LEGENDRE, P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. **Ecology**, v. 91, p. 299-305, 2010.

LAVOREL, S.; GRIGULIUS, K.; MCLNTYRE, S.; WILLIAMS, N. S. G.; GARDEN, D.; DORROUGH, J.; BERMAN, S.; QUÉTIER, F.; THÉLBAULT, A.; BONIS, A. Assessing functional diversity in the field - methodology matters! **Functional Ecology**, v. 22, p. 134-147, 2008.

LIN, B.; PANG, Z.; JIANG, J. Fixed and Random Effects Selection by REML and Pathwise Coordinate Optimization. **J Comput Graph Stat**, v. 22, p. 341-355, 2013.

LIU, M.; WANG, Z.; LI, S.; LU, X.; WANG, X.; HAN, X.; Changes in specific leaf area of dominant plants in temperate grasslands along a 2500-km transect in northern China. **SCIENTIFIC REPORTS**, v. 7, p.1-9, 2017.

MARTINS, F. D.; CASTILHO, A. F.; CAMPOS J.; HATANO, F. M.; ROLIM, S. G. Fauna da Floresta Nacional de Carajás. São Paulo: Nitro Editorial. p. 30-61, 2012. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/Carajas.pdf>. Acesso em: 23 de agosto de 2020.

MITRE, S. K.; MARDEGAN, S. F.; CALDEIRA, C. F.; RAMOS, S. J.; FURTINI NETO, A. E.; SIQUEIRA, J. O., M. Nutrient and water dynamics of Amazonian canga vegetation differ among physiognomies and from those of other neotropical ecosystems. **Springer**, v. 219, p. 1341-1353, 2018.

MOTA, N. F. O.; WATANABE, M. T. C.; ZAPPI, D. C.; HIURA, A. L.; PALLOS, J.; VIVEROS, R. S.; GIULIETTI, A. M.; VIANA, L. P. Cangas da Amazônia: a vegetação única de Carajás evidenciada pela lista de fanerógamas. **Rodriguésia**, v. 69, p. 1435-1488, 2018.

MUSCARELLA, R.; URIARTE, M. Do community-weighted mean functional traits reflect optimal strategies? **Proc. R. Soc**, v. 283, p. 1-9, 2016.

NUNES, J. A. *Florística, estrutura e relações solo-vegetação em gradiente fitofisionômico sobre Canga, na Serra Sul, Flona de Carajás-Pará* (Mestrado em Botânica) - Programa de pós-graduação em Botânica, Universidade Federal de Viçosa.

NUNES, J. A.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERREIRA, W. G.; NERI, A. V.; CORRÊA, G. R.; ENRIGHT, N. J. Soil-vegetation relationships on a banded ironstone 'island', Carajás plateau, Brazilian eastern Amazônia. **An Acad Bras Cienc**, v. 87, p. 2097-2110, 2015.

PEREZ-HARGUINDEGUY, N.; DÍAZ, S.; GARNIER, E.; LAVOREL, H.; POORTER, P.; JAUREGUIBERRY, P.; BRET-HARTE, M. S.; CORNWELL, W. K.; CRAINE, J. M.; GURVICH, D. E.; URCELAY, C.; VENEKLAAS, E. J.; REICH, P. B.; POORTER, L.; WRIGHT, I. J.; RAY, P.; ENRICO, L.; PAUSAS, J. G.; DE VOS, A. C.; BUCHAMNN, N.; FUNES, G.; QUÉTIER, F.; HODGSON, J. G.; THOMPSON, K.; MORGAN, H. D.; TER STEEGE, H.; HEIJDEN, M. G. A. VAN DER; SACK, L.; BLONDER, B.; POSCHLOD, P.; VAIERETTI, M. V.; CONTI, G.; STAYER, A. C.; AQUINO, S.; CORNELISSEN, J. H. C. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 61, p. 167-234, 2013.

PEROVIC, D.; GAMEZ-VIRUES, S.; BORSCHIG, C.; KLEIN, A. M.; KRAUSS, J.; STECKEL, J.; ROTHENWOHRER, C.; ERASMI, S.; TSCHARNTKE, T.; WESTPHAL, C. Configurational landscape heterogeneity shapes functional community composition of grassland butterflies. *Journal of Applied Ecology*, v. 52, p. 505-513, 2015.

PETCHEY, O. L.; GASTON, K. J. Functional diversity (FD), species richness, and community composition. **Ecology Letters**, v. 5, p. 402-411, 2002.

R CORE TEAM, 2019. R: Uma linguagem e ambiente para computação estatística. Viena, Fundação R para Computação Estatística. <http://www.R-project.org/>.

RIVAS, A. A.; NOVA, J. A. D.; ROSAS, M. A. M. Patch isolation and shape predict plant functional diversity in a naturally fragmented forest. **Journal of Plant Ecology**, v. 11, p. 136-146, 2018.

SCHAEFER, C. E.; CANDIDO, HUGO G.; CORRÊA, G. R.; SIMAS, FELIPE N. B.; CAMPOS, CAMPOS, J. C. F. Ecossistemas e Geoambientes de Canga Ferruginosa em Carajás: Paisagens Singulares em Risco de Extinção. In: Frederico Drumond Martins; Luciana Hiromi Yoshino Kamino; Katia Torres Ribeiro. (Org.). Projeto Cenários: Conservação de Campos Ferruginosos diante da mineração em Carajás. 1 ed. Tubarão (SC): Copiart, 2018, v. 1, p. 1-463.

SCHAEFER, C. E. G. R.; LIMA NETO, E.; CORRÊA, G. R.; SIMAS, F. N. B.; CAMPOS, J. F.; MENDONÇA, B. A. F.; NUNES, J. A. Geoambientes, solos e estoques de carbono na Serra Sul de Carajás, Pará, Brasil. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.**, v. 11, p. 85-101, 2016.

SCHAEFER, C. E. G. R.; RIBEIRO, A. S. S.; CORRÊA, G. R.; LIMA NETO, E.; SIMAS, F. N. B.; KER, J. C. Características químicas e mineralogia de solos perférricos da Serra Sul de Carajás. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciênc. Nat.**, v. 11, p. 57-69, 2016.

SITZIA, T.; DAINESE, M.; KRÜSI, B. O.; MCCOLLIN, D. Landscape metrics as functional traits in plants: perspectives from a glacier foreland. **PeerJ**, p. 1-22, 2017.

SKIRYCH, A.; CASTILHO, A.; CHAPARRO, C.; CARVALHO, N.; TZOTZOS, G.; SIQUEIRA, J. O. Biodiversity Canga, a matter of mining. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 653-663, 2014.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; GIANNINI, T. C.; RIBBI, R. J.; GIULIETTI, A. M.; SANTOS, DIOGO C.; NASCIMENTO, W. R.; GUIMARÃES, J. T. F.; COSTA, M. F.; FONSECA, V. L. I.; SIQUEIRA, J. O. Mapping and quantification of ferruginous outcrop savannas in the Brazilian Amazon: A challenge for biodiversity conservation. **PLoS One**, v. 14, p. 1-20, 2019.

STEIN, A.; GERSTNER, K.; KREFT, H. Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. **Ecology Letters**, v. 17, p. 866-880, 2014.

TAKAHASI, A.; MEIRELLES, S. T. Ecologia da vegetação herbácea de bancadas lateríticas (cangas) em Corumbá, MS, Brasil. **Hoehnea**, v. 41, p. 515-528, 2014.

VASCONCELOS, J. M.; SILVA-JÚNIOR, M. L.; RUIVO, M. L. P.; SCHAEFER, C. E. G. R.; RODRIGUES, P. G.; SOUZA, G. T.; NASCIMENTO, D. N. O.; BEZERRA, K. C. A.; DIAS, Y. N. Solos metalíferos: atributos químicos nas diferentes fitofisionomias da Serra Sul, Serra dos Carajás, Pará, Brasil. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.**, v. 11, p. 49-55, 2016.

VIANA, P. L.; MOTA, N. F. O.; GIL, A. S. B.; SALINO, A.; ZAPPI, D. C.; HARLEY, R. M.; ILKIU-BORGES, A. L.; SECCO, R. S.; ALMEIDA, T. E.; WATANABE, M. T. C. W.; SANTOS, J. U. M.; TROVÓ, M.; MAURITY, C.; GIULIETTI, A. M. Flora das cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: história, área de estudos e metodologia. **Rodriguésia**, v. 67, p. 1107-1124, 2016.

ZAMBRANO, J.; CORDEIRO, N. J.; GARZON-LOPES, C.; YEARGER, L.; FORTUNEL, C.; NDANGALASI, H. J.; BECKMAN, N. G. Investigating the direct and indirect effects of forest fragmentation on plant functional diversity. **PLoS ONE**, v. 15, p. 1-16, 2020.

ZAMBRANO, J.; GARZON-LOPES, C. X.; YEARGER, L.; FORTUNEL, C.; CORDEIRO, N. J.; BECKMAN, N. G. The effects of habitat loss and fragmentation on plant functional traits and functional diversity: what do we know so far? **Oecologia**, p. 505-518, 2019.

ZAPPI, D. C.; GASTAUER, M.; RAMOS, S.; NUNES, S.; CALDEIRA, C. F.; SOUZA-FILHO, P. W.; GUIMARÃES, T.; GIANNINI, T. C.; VIANA, P. L.; LOVO, J.; MOTA, N. F. O.; SIQUEIRA, J. O. Plantas nativas para recuperação de áreas de mineração em Carajás. Instituto Tecnológico Vale, 2018, Belém.

ZAPPI, D. C.; MORO, M. F.; WALKER, B.; MEAGHER, T.; VIANA, P. L.; MOTA, N. F. O.; WATANABE, M. T. C.; LUGHADHA, E. N. Plotting a future for Amazonian *canga* vegetation in a *campo rupestre* context. **PLoS ONE**, v. 14, p. 1-19, 2019.

ZAPPI, D. C.; MORO, M. F.; MEAGHER, T. R.; NIC LUGHADHA, E. Plant Biodiversity Drivers in Brazilian Campos Rupestres: Insights from Phylogenetic Structure. **Front Plant Sci**, v. 8, p.1-15, 2017.

ZITER, C.; BENNETT, E. M.; GONZALEZ, A. Functional diversity and management mediate aboveground carbon stocks in small forest fragments. **Ecosphere**, v. 4, p. 1-21, 2013.

ZHUL, J.; LIN, J.; ZHANG, Y. Relationships between functional diversity and aboveground biomass production in the Northern Tibetan alpine grasslands. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1-8, 2016.

WILLIAMS, B. M.; HOUSEMAN, G. R. Experimental evidence that soil heterogeneity enhances plant diversity during community assembly. **Journal of Plant Ecology**, v. 7, p. 461-469, 2014.

YANG, Z.; LIU, X.; ZHOU, M.; AI, DEXIECUO.; WANG, G.; WANG, Y.; CHU, C.; LUNDHOLM, T. J. The effect of environmental heterogeneity on species richness depends on community position along the environmental gradient. **Scientific Reports**, v. 5, p. 1-7, 2015.