

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**JOSÉ LEONARDO DOS SANTOS GOMES**

**FILTRAGEM AMBIENTAL E DIVERSIDADE FUNCIONAL EM UMA  
COMUNIDADE DE FLORESTA ÚMIDA**

**AREIA**

**2023**

**JOSÉ LEONARDO DOS SANTOS GOMES**

**FILTRAGEM AMBIENTAL E DIVERSIDADE FUNCIONAL EM UMA  
COMUNIDADE DE FLORESTA ÚMIDA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Agronomia da Universidade Federal da  
Paraíba como requisito parcial para obtenção de  
grau de Doutor em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Bandeira de  
Albuquerque

**AREIA**

**2023**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

G633f Gomes, José Leonardo dos Santos.  
Filtragem ambiental e diversidade funcional em uma comunidade de floresta úmida / José Leonardo dos Santos Gomes. - Areia:UFPB/CCA, 2023.  
68 f. : il.

Orientação: Manoel Bandeira de Albuquerque.  
Tese (Doutorado) - UFPB/CCA.

1. Agronomia. 2. Floresta Ombrófila Aberta. 3. Mata Atlântica. 4. Atributos Funcionais. I. Albuquerque, Manoel Bandeira de. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631/635(043.2)

**JOSÉ LEONARDO DOS SANTOS GOMES**

**FILTRAGEM AMBIENTAL E DIVERSIDADE FUNCIONAL EM UMA  
COMUNIDADE DE FLORESTA ÚMIDA**

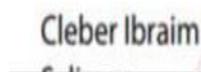
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de Concentração: Agronomia Tropical. Linha de Pesquisa: Ecologia, Manejo e Conservação de Recursos Naturais.

Aprovado em: 31/01/2023

**BANCA EXAMINADORA**  
Documento assinado digitalmente  
 **MANOEL BANDEIRA DE ALBUQUERQUE**  
Data: 27/03/2023 09:42:01-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Dr. Manoel Bandeira de Albuquerque (Orientador)  
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

 **Cleber Ibraim** Assinado de forma digital  
por Cleber Ibraim Salimon  
Data: 2023.01.21 20:51:23

---

Dr. Cleber Ibraim Salimon (Examinador)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

 Documento assinado digitalmente  
**MANOEL MARIANO NETO DA SILVA**  
Data: 27/03/2023 09:01:21-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

---

Dr. Manoel Mariano Neto da Silva (Examinador)  
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)



---

Dr. Leonardo Pessoa Félix (Examinador)  
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Dedico este trabalho aos que acreditam na ciência e lutam pelo fim do obscurantismo.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Manoel Bandeira de Albuquerque por toda dedicação, confiança e credibilidade no nosso trabalho. Pela oportunidade criada para construção de novos conhecimentos.

A Lenyneves Duarte Alvino de Araújo por ter me fornecido todos os recursos que precisei em todas as etapas deste trabalho e também por ter me proporcionado a vivência pelo mundo da ecologia vegetal e biologia floral;

Agradeço profundamente a professora Célia Machado por toda colaboração e aprendizado durante esta caminhada.

À minha esposa Amanda Kaline pelo companheirismo, dedicação e amor durante nossa jornada, também por aceitar que eu tenha mergulhado tão intensamente durante esta formação acadêmica, sem seu apoio e afeto nada disso seria possível;  
Aos meus filhos Anny, Alinne, Arthur e André razões do meu viver;

Aos meus pais Conceição e Barreto, meus exemplos de vida. Sou muito grato por tudo.

Meus profundos agradecimentos aos professores e discentes do PPGAgro pelos momentos de aprendizado.

Aos colegas do LABERV e LEV, em especial à Pedro Gadelha, por terem pacientemente suportado minha espaçosa pesagem de folhas e por terem me auxiliado no preenchimento das planilhas.

## RESUMO

Os atributos funcionais das plantas têm contribuído para uma melhor compreensão da funcionalidade dos ecossistemas. Fatores ambientais, por sua vez, atuam como filtros influenciando a forma como as espécies estão distribuídas, consequentemente direcionando a diversidade funcional nas comunidades. Sensores remotos orbitais podem fornecer uma maneira de monitorar as alterações da diversidade funcional de uma forma otimizada e eficiente. Diante destes fatos, foram mensurados os atributos funcionais de uma área de Floresta de Brejo de Altitude. Foi analisado se os fatores ambientais (Altitude, Inclinação do Terreno, Abertura do Dossel, Distância da Paisagem Perturbada, Componentes Químicos e físicos do Solo) estariam atuando como potenciais filtros influenciando a diversidade funcional local de plantas. Também foi testado se a variação da diversidade funcional das plantas na área estudada poderia ser monitorada por satélite. O estudo de campo foi realizado no Parque Estadual Mata do Pau Ferro, Paraíba, Nordeste, Brasil. A diversidade funcional foi calculada utilizando um índice baseado em dendrogramas a partir de oito atributos vegetativos funcionais. Foi testada a diversidade funcional como variável dependente dos seguintes Filtros ambientais preditores: fertilidade, química e física do solo, abertura de dossel, altitude, inclinação e distância da paisagem perturbada. Foram testados os modelos a partir de uma análise Stepwise e foi selecionado o melhor modelo através do Critério de Akaike (AIC). A diversidade funcional variou, significativamente, em função da altitude ( $p < 0,001$ ), do teor de matéria orgânica ( $p < 0,001$ ), da estrutura física do Solo ( $p < 0,001$ ) e da Distância da área perturbada ( $p < 0,001$ ). Também este estudo demonstrou um potencial de integração entre dados de satélite e a variação espacial da diversidade funcional na faixa B12 ( $p = -0,396$ ) do sentinel-2. Foi concluído que na floresta úmida estudada, as variáveis ambientais locais associadas aos componentes do solo e a altitude atuaram como filtros abióticos, direcionando a diversidade funcional de plantas nessa comunidade.

**Palavras-chave:** floresta ombrófila aberta; mata atlântica; atributos funcionais.

## ABSTRACT

The functional attributes of plants have contributed to a better understanding of the functionality of ecosystems. Environmental factors, in turn, act as filters influencing the way species are distributed, consequently directing functional diversity in communities. Orbital remote sensors can provide a way to monitor changes in functional diversity in an optimal and efficient way. Given these facts, the functional attributes of an area of the Altitude Brejo Forest were measured. It was analyzed whether the environmental factors (Altitude, Land Inclination, Openness of the Canopy, Distance from the Disturbed Landscape, Chemical and Physical Soil Components) would be acting as potential filters influencing the local functional diversity of plants. It was also tested whether the variation in the functional diversity of the plants in the studied area could be monitored by satellite. The field study was carried out in the Mata do Pau Ferro State Park, Paraíba, Northeast, Brazil. Functional diversity was calculated using a dendrogram-based index from eight functional vegetative attributes. Functional diversity was tested as a dependent variable for the following predictive environmental filters: fertility, soil chemistry and physics, canopy openness, altitude, slope and distance from the disturbed landscape. The models were tested from a Stepwise analysis and the best model was selected through the Akaike Criterion (AIC). Functional diversity varied significantly as a function of altitude ( $p < 0.001$ ), organic matter content ( $p < 0.001$ ), soil physical structure ( $p < 0.001$ ) and distance from the disturbed area ( $p < 0.001$ ). This study also demonstrated a potential for integration between satellite data and the spatial variation of functional diversity in band and B12 ( $p = -0.396$ ) of sentinel-2. It was concluded that in the rainforest studied, local environmental variables associated with soil components and altitude acted as abiotic filters, directing the functional diversity of plants in this community.

Keywords: altitude open ombrophylous forest; atlantic forest; functional attributes.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> Localização do Parque Estadual Mata do Pau Ferro, Nordeste, Brasil. (A) Distribuição dos remanescentes de floresta Atlântica no estado da Paraíba (cinza escuro), destacando os remanescentes de floresta de Brejo de Altitude na Paraíba. (B) Fragmentos de floresta de Brejo de Altitude, destacando as unidades amostrais (círculos escuros) no Parque Estadual Mata do Pau Ferro (6°58'12'' S & 35°42'15'' W) (C). Mapa em ArcGis Desktop 10.1. ....	26
<b>Figura 2</b> Dendograma Funcional entre espécies arbóreas e atributos funcionais das espécies encontradas no Parque Estadual Mata do Pau Ferro .....	45
<b>Figura 3</b> Localização do Parque Estadual Mata do Pau Ferro no município de Areia Paraíba, Nordeste, Brasil .....	58
<b>Figura 4</b> Correlação entre o índice de diversidade funcional e as faixas de reflectância B12 e NDVI do Sentinel-2.....	61

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Atributos funcionais a serem descritos estatisticamente..... 27
- Tabela 2.** Estatística descritiva dos atributos funcionais contínuos. Parque Estadual Mata do Pau Ferro, Nordeste, Brasil. (ALT) Altura, AB (Área basal), SLA (Área foliar específica), LS (Tamanho foliar), BWD (Densidade básica da madeira) e LDMC (Conteúdo de matéria seca foliar) ..... 31
- Tabela 3.** Lista de espécies amostradas de acordo com a divisão do limbo foliar no Parque Estadual Mata do Pau Ferro, Nordeste, Brasil (6°58'12'' S, 35°42'15'' W) ..... 32
- Tabela 4.** Valores representativos do Índice de Diversidade Funcional (FD) das Variáveis Ambientais: Abertura do Dossel (AD), Textura do Solo (TS), Estrutura do Solo (ES) Altitude (AL), Inclinação do Terreno (IN), Distância da Área Perturbada (DPP) E Teor de Matéria Orgânica (MO), Potencial de Hidrogênio do Solo (pH)..... 44
- Tabela 5.** Modelos da análise stepwise dos valores de diversidade funcional em função das variáveis ambientais. Diversidade funcional (FD), Abertura de dossel (AD), Fertilidade do Solo (FS), Altitude (AL), Inclinação do Terreno (IN), Distância da Paisagem Perturbada (DPP), Estrutura do Solo (ES), Textura (TS), Fósforo (P), Potássio (K), Sódio (Na), Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Capacidade de Troca de Cátions (CTC), Matéria Orgânica (MO)..... 46
- Tabela 6.** Coeficientes parciais de determinação da regressão múltipla final entre o índice de diversidade funcional (FD) e as variáveis ambientais selecionadas no melhor modelo de acordo com AIC. F-statistic: 9.44, R<sup>2</sup>: 0.674, p<0.001..... 46
- Tabela 7.** Valores do índice de diversidade funcional (FD) utilizando atributos contínuos e das faixas de reflectâncias da faixa B12 e do NDVI do Sentinel-2..... 59

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>11</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>13</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>19</b>
<b>3 ARTIGO I - ANÁLISE DESCRITIVA DE ATRIBUTOS FUNCIONAIS DE UMA FLORESTA DE BREJO DE ALTITUDE .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 RESUMO.....</b>	<b>23</b>
<b>3.2 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.1 Área de estudo.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.2 Desenho Amostral.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.3 Coleta de amostras e dados.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3.4 Atributos funcionais .....</b>	<b>27</b>
<b>3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>3.5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>34</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>34</b>
<b>4 ARTIGO II - DIVERSIDADE FUNCIONAL E FILTRAGEM AMBIENTAL EM ESPÉCIES ARBÓREAS DE UM BREJO DE ALTITUDE37</b>	
<b>4.1 RESUMO.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
<b>4.3.1 Área de Estudo.....</b>	<b>39</b>
<b>4.3.2 Coleta de dados .....</b>	<b>40</b>
<b>4.3.3 Atributos funcionais .....</b>	<b>40</b>
<b>4.3.4 Variáveis ambientais .....</b>	<b>41</b>
<b>4.3.5 Cálculo da diversidade funcional .....</b>	<b>42</b>
<b>4.3.6 Análises estatísticas .....</b>	<b>43</b>
<b>4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>

<b>4.5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>49</b>
<b>5 ARTIGO III - CORRELACIONANDO A DIVERSIDADE FUNCIONAL DE PLANTAS DE UMA FLORESTA OMBRÓFILA ABERTA COM A REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DO DOSSEL .....</b>	<b>56</b>
<b>5.1 RESUMO.....</b>	<b>56</b>
<b>5.2 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>57</b>
<b>5.3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>58</b>
<b>5.3.1 Dados Espectrais.....</b>	<b>58</b>
<b>5.3.2 Análises Estatísticas.....</b>	<b>59</b>
<b>5.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>59</b>
<b>5.5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>63</b>
<b>6 CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Um dos maiores desafios da ecologia é buscar compreender os diferentes processos determinantes na composição e dinâmica das comunidades naturais, assim bem como as circunstâncias que permitem que as espécies coexistam (BEGON et al., 1996; SIMOVA et al., 2018). Nas últimas décadas, a abordagem funcional, tem contribuído para uma compreensão mais fidedigna desses processos que determinam e estruturam as comunidades (CIANCIARUSO, 2009). Medir a diversidade funcional significa medir a diversidade de traços funcionais que estão diretamente ligados aos processos na comunidade natural (GUERRA et al., 2022).

Conforme Dreyer et al., (2020), atributos funcionais são as características fisiológicas dos organismos que estão relacionadas com a sua resistência a uma determinada condição ambiental. De forma geral, os atributos funcionais podem ser classificados como natureza aquisitiva, sendo aqueles que representam vantagens competitivas na aquisição de recursos como o tamanho da folha que garante a obtenção de luz solar e as trocas gasosas, por exemplo, ou de natureza conservativa, que funcionam na proteção como a densidade básica da madeira (STERCK et al., 2011).

Clima, fatores edáficos, regimes de perturbação, alguns aspectos da composição atmosférica e interações bióticas são considerados variáveis ambientais que podem atuar como filtros e determinar quais espécies devem permanecer em uma determinada área (DÍAZ et al., 2004; ASSUNÇÃO et al., 2020). Mudanças no ambiente por ações antrópicas também têm sido relatadas como fatores que selecionam as espécies nas comunidades locais e influenciam a riqueza de espécies, os atributos funcionais e a diversidade funcional (GARCIA et al., 2015; GIRÃO et al., 2007; TABARELLI et al., 2010).

Assim, apenas as espécies que possuem atributos que lhes conferem capacidade de suportar tais condições ambientais estarão aptas a sobreviver em uma determinada região ou localidade. Essas adaptações às características do meio devem levar a uma convergência de determinados atributos funcionais dentro da comunidade. Por outro lado, espécies que utilizam um recurso de forma similar não devem coexistir com muita frequência, já que aquela que for competitivamente superior irá excluir a inferior quando os recursos estiverem limitados no ambiente (WEIHER 1998).

Embora a literatura afirme que os filtros ambientais estruturam as assembleias em escalas regionais e a exclusão competitiva estrutura as comunidades em escalas locais (WEIHER, 1998; SAADI et al., 2022), é crescente o consenso de que as comunidades são resultado de ambos os processos. Por exemplo, já foi observado que padrões de diversidade funcional foram determinados por variáveis ambientais locais como abertura de dossel, topografia, fertilidade e composição do solo (KRAFT 2008).

Na Mata Atlântica brasileira, estudos recentemente contribuíram para a análise dos mecanismos que são considerados forças estruturantes para os padrões de composição da comunidade vegetal (TABARELLI et al., 2010; OLIVEIRA-FILHO et al., 2013; GARCIA et al., 2015).

É preciso entender como e por que a diversidade funcional varia dentro dos ecossistemas, ao longo dos gradientes de disponibilidade de recursos. Normalmente, a esta diversidade é avaliada por meio de medições in situ de forma intensiva, enquanto a mensuração da variação da diversidade funcional por sensores remotos orbitais fornece uma monitoração de uma forma otimizada e eficiente. Vários sensores multiespectrais (por exemplo, Sentinel-2, Landsat 8) estão em órbita e podem colaborar com esse processo de análise da diversidade funcional (HELFENSTEIN et al., 2022). Diante disto, este trabalho teve como objetivo conhecer a variação da diversidade funcional, mensurando seus atributos funcionais, monitorando os mesmos por sensores orbitais e testando se variáveis ambientais estariam atuando como potenciais filtros em uma área de floresta úmida montana, reconhecida como Brejo de Altitude, uma das fitofisionomias da Floresta Atlântica do Nordeste do Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ACKERLY, D. D.; CORNWELL, W. K. A trait-based approach to community assembly: partitioning of species trait values in to within- and among-community components. **Ecology Letters**, v. 10, 135–145, 2007.
- ANDRADE-LIMA, D. Present-day forest refuges in Northeastern Brazil. Pp. 245-251, in: Prance, G.T. (ed.). *Biological diversification in the tropics*. Columbia University Press, New York, 1982.
- ASSUNÇÃO, V. A.; SILVA, D. M.; DALPONTI, G.; SARTORI, Â. L. B.; CASAGRANDE, J. C.; MANSANO, V. Environmental filters structure plant communities in the Brazilian Chaco. **Acta Botanica Brasilica**, v. 34. 2020
- BARBOSA, M. R. V.; AGRA, M. F.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CUNHA J. P.; ANDRADE, L. A. neste volume. **Diversidade florística na Mata do Pau-Ferro**, Areia, Paraíba, 2004.
- BEGON, M., J. L. HARPER, and C. R. TOWNSEND. *Populations and Communities*. 3rd ed. Blackwell Science Ecology: Individuals, Oxford, UK, 1996.
- CIANCIARUSO, M. *et al.*, Including Intraspecific Variability in Functional Diversity. **Ecology**, v. 90, 81–89, 2009.
- CORNWELL, W. K.; SCHWILK, D. W.; ACKERLY, D. D. A trait-based test for habitat filtering: convex hull volume. **Ecology**, v. 87, p. 1465-1471, 2006.
- DE LA RIVA, E. G., VIOLLE, C., PEREZ-RAMOS, I. M., MARAÑÓN, T., NAVARRO-FERNÁNDEZ, C. M., OLMO, M., ET AL. A multidimensional functional trait approach reveals the imprint of environmental stress in Mediterranean woody Communities. **Ecosystems** v. 21, 248–262. 2018
- DE BELLO, F.; PRICE, J. N.; MUNKMULLER, T.; LIIRA, J.; ZOBEL, M.; THUILLER, W.; GERHOLD, P.; GOTZENBERGUER, L.; LAVERGNE, S.; LEPS, J.; ZOEBEL, K.; PARTEL, M. Functional species pool framework to test for biotic effects on community assembly. **Ecology**, v. 93, 2263–2273, 2012.
- DIAZ, S.; LAVOREL, S.; DE BELLO, F.; QUÉTIER, F.; GRIGULIS, K.; ROBSON, T. M. **Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments**. *Proceedings of the National Academy of Science*, v.104, n. 52, p. 20684-20689, 2007.
- DREYER, et al., Estruturação espacial de traços funcionais de espécies arbóreas em função da distância da borda em Floresta Alto-Montana no sul do Brasil. **Ciência Florestal [online]** v. 30, n. 3 2020.

GARCIA, L. C.; CIANCIARUSO, M. V.; RIBEIRO, D. B.; DOS SANTOS, F. A.; RODRIGUES, R. R. Flower Functional Trait Responses to Restoration Time. **Applied Vegetation Science**. V.18, 402–412. 2015.

GIRÃO, L. C.; LOPES, A. V.; TABARELLI, M.; BRUNA E. M. Changes in tree reproductive traits reduce functional diversity in a fragmented Atlantic forest landscape. **PloSOne**, v. 2, 1–12. 2007

GUERRA, J. G.; CABELLO, F.; FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C.; PEÑA, J. M.; DORADO, J. Plant functional diversity is affected by weed management through processes of trait convergence and divergence. **Frontiers in Plant Science**, v.13, 2022.

HELFENSTEIN, S. I.; SCHNEIDER, F. D.; SCHAEPMAN M.E.; FELIX, F. Assessing biodiversity from space: Impact of spatial and spectral resolution on trait-based functional diversity, **Remote Sensing of Environment**, v. 275, 2022.

KRAFT, N. J. B.; VALENCIA, R.; ACKERLY, D. D. Functional Traits and Niche-Based Tree Community Assembly In An Amazonian Forest. **Science**, v. 322, p. 580-582, 2008.

KEDDY, P. Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology. **Journal of Vegetation Science**, v. 3, n. 2, p. 157–164. 1992

MAYO, S. J.; FEVEREIRO, V. P. B. **Mata do Pau-Ferro: a pilot study of the brejo forest**. Royal Botanic Gardens, Kew, London, 1982.

MOREIRA, E. R. **Mesorregiões e microrregiões da Paraíba: delimitação e caracterização**. Governo da Paraíba, João Pessoa, 1989.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; BUDKE, J. C.; JARENKOW, J. A.; EISENLOHR, P. V.; NEVES, D. R. Delving in to the variations in tree species composition and richness across South American subtropical Atlantic and Pampean Forests. **Journal of Plant Ecology**. 2013

PAUSAS, J. G.; VERDÚ, M. Fire reduce smorphospace occupation in plant communities. **Ecology** 89: 2181-2186, 2008.

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

SAADI, C. B.; CAYUELA, L.; BAÑARES, D. G.; DE ALEDO, J. G.; MATAS-GRANADOS, L.; SALINAS, N.; LA TORRE, C. M. A.; MACIA, M. J. Latitudinal patterns and environmental drivers of taxonomic, functional, and phylogenetic diversity of woody plants in western Amazonian mainland forests. **Frontiers in Plant Science**. V. 13, 2022

ŠÍMOVÁ, I.; VIOLLE, C.; SVENNING, J.-C.; KATTGE, J.; ENGEMANN, K.; SANDEL, B.; ET AL. Spatial patterns and climate relationships of major plant traits in the New World differ between woody and herbaceous species. **Journal Biogeographic**. 45, 895–916. 2018

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

STERCK, F. et al., **Functional traits determine trade-offs and niches in a tropical forest community**. Proceedings of the National Academy of Science, Washington, v. 108, n. 51, p. 20627-20632, 2011.

TABARELLI, M. et al., Prospects for biodiversity conservation in the Atlantic Forest: lessons from aging human-modified landscapes. **Biological Conservation**, v. 143, p. 2328-2340, 2010.

TABARELLI, M. Integridade e ameaças aos brejos da Paraíba e Pernambuco. In: Tabarelli, M. (Ed.) Plano de Conservação dos Brejos de Paraíba e Pernambuco. **Relatório Técnico do Subprojeto Recuperação e Manejo dos Ecossistemas Naturais de Brejos de Altitude de Pernambuco e Paraíba**. Projeto *PROBIO*, Ministério do Meio Ambiente. Recife. p. 82-91, 2001.

VAMOSI, S. M.; HEARD, S. B.; VAMOSI, J. C.; WEBB, C. O. Emerging Patterns In The Comparative Analysis of Phylogenetic Community Structure. **Mol Ecol**, p. 572-592. 2009

WEIHER, E.; CLARKE, P.; KEDDY, P. Community Assembly Rules, Morphological Dispersion of Plant Species the Coexistence. **Oikos**, v. 81, n. 2, p. 309–322. 1998.

WILLIG, M. R.; KAUFMAN, D. M.; STEVENS, R. D. Latitudinal Gradients of Biodiversity: Pattern, Process, Scale, And Synthesis. / **Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.** v. 34: 273-309. 2003.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Um dos maiores desafios da ecologia é buscar entender os diferentes processos que determinam estrutura, composição e dinâmica das comunidades naturais (PROSSER et al., 2020). Os fatores que permitem a coexistência entre espécies vegetais podem ser explicados por diferentes processos, baseados na teoria do nicho ou na teoria neutra (CHALONER et al., 2020; HUBBELL, 2001).

O entendimento desses processos permeia o conhecimento da funcionalidade das comunidades naturais. A respeito das características funcionais existe uma vasta literatura, notadamente para as plantas, bem como linhas de pesquisa dedicadas a testar o poder preditivo dessas características em relação a respostas ou efeitos no funcionamento das comunidades e a processos biológicos de difícil mensuração (CORNELISSEN et al., 2003; VIOLLE et al., 2007).

Espécies de plantas, classificadas de acordo com a sua taxonomia, tem fortes limitações quando se trata de responder a questões ecológicas importantes na escala de ecossistemas, paisagens ou biomas (KEDDY 1992). Um rápido avanço nos debates da comunidade científica fez chegar à conclusão de que um caminho promissor que irá encaminhar para responder a essas perguntas, bem como várias outras questões ecológicas, é por classificar espécies de plantas sobre atributos funcionais (por exemplo, DIAZ et al., 2002). Grupos funcionais de plantas podem ser definidos como grupos de espécies que compartilham de um funcionamento semelhante ao nível de organismo com respostas semelhantes aos fatores ambientais e / ou semelhante papéis em (ou efeitos sobre) ecossistemas ou biomas (CORNELLISSSEM et al., 2003).

Devido a potencial relação entre a diversidade funcional, o funcionamento e a manutenção dos processos das comunidades (PETCHEY e GASTON 2006), são necessários definir precisamente o conceito de diversidade funcional. Uma definição para diversidade funcional é ‘o potencial e a diversidade das espécies e de suas características que influenciam o funcionamento das comunidades’ (TILMAN 2001).

O constante interesse em classificar as espécies em grupos relativos à função em vez da taxonomia (KEDDY 1992; LAVOREL et al., 1997; WEIHER et al., 1998) provocou a busca de traços que expressam diferenças significativas no comportamento ecológico entre as espécies de plantas. Quando construímos classificações funcionais, podemos estimar a diversidade funcional sem a necessidade de dividir os organismos em grupos taxonômicos, pois espécies diferentes podem exercer a mesma função dentro do ecossistema.

Para Cianciaruso et al., (2009), com o crescente interesse por essa abordagem, várias medidas de diversidade funcional estão aparecendo na literatura. Essas medidas diferem na informação que contêm e na maneira com que quantificam a diversidade (PETCHEY e GASTON 2006), podendo ser divididas em medidas categóricas ou contínuas.

A medida de diversidade funcional mais comum, e também a mais antiga, é dada pelo número de grupos funcionais (ou tipos funcionais) presentes em uma comunidade (DÍAZ e CABIDO 2001), ou seja, a riqueza de grupos funcionais (FGR, do inglês functional group richness). Nessa abordagem, as espécies são agrupadas de acordo com algum método de classificação, de maneira que espécies dentro de um mesmo grupo sejam mais similares entre si do que com espécies de grupos diferentes, a exemplo o grupo das plantas perenifólias ou decíduas, arbóreas ou arbustivas.

Essencialmente, essa abordagem consiste em medir a dispersão de espécies em um espaço n-dimensional de características funcionais de modo que as expectativas teóricas de como as medidas de diversidade devem se comportar sejam atendidas (PETCHEY e GASTON 2006). Por exemplo, é intuitivo esperar que a adição de uma espécie funcionalmente similar a uma outra já existente não altere significativamente a diversidade funcional e que a adição de uma espécie funcionalmente diferente resulte no seu aumento (PETCHEY e GASTON 2006).

A diversidade Funcional plantas é controlada por seus atributos funcionais que são características fisiológicas, presentes nas espécies, que desempenham papel central na interação dos organismos com o ambiente no qual atuam. Os atributos funcionais influenciam as taxas vitais de sobrevivência, crescimento e reprodução, tendo assim implicações diretas na aptidão dos indivíduos (ROSELL et al., 2022). Dessa forma, avaliar como os atributos variam entre as espécies e qual a extensão dessa variação tem se revelado um dos grandes objetivos da ecologia funcional.

Em plantas, atributos funcionais são apontados como bons parâmetros para responder questões ecológicas em grande escala, como respostas da vegetação às mudanças ambientais, clima, uso de terra e regimes de distúrbios naturais. Alguns atributos como a área foliar específica (SLA), Conteúdo de massa seca foliar (LDMC), densidade da madeira, altura máxima da planta e arquitetura radicular são considerados bons preditores ecológicos (ROSELL et al., 2022).

A floresta Atlântica é uma das prioridades mundiais para a conservação e pouco se conhece sobre sua funcionalidade ecológica. Calcula-se que essa floresta abriga 20.000 espécies de plantas vasculares, sendo 8.000 endêmicas (MARQUES; GRELE 2021). Além

do elevado grau de endemismo observado (VILELA e DE CARVALHO LOPES, 2022), a floresta Atlântica apresenta elevada riqueza e diversidade de espécies (BEGON et al., 1996) que, em alguns locais, são superiores às observadas em trechos de floresta Amazônica (SILVA; LEITÃO FILHO 1982, BROWN e LUGO 1992).

Parte da floresta atlântica é composta pelos Brejos de Altitude Nordestinos que são encaves da Mata Atlântica formando ilhas de floresta úmida em plena região semiárida (CORDEIRO et al., 2020), cercadas por vegetação de caatinga, tendo uma condição ambientais bastante atípica com relação à altitude, umidade, temperatura e vegetação. O conhecimento sobre a diversidade das suas funcionalidades e como variáveis ambientais atuam nesse processo se faz necessário.

Padrões de diversidade funcional em mata ombrófila aberta podem variar de acordo com gradientes ambientais específicos e com características fisiológicas ao organismo (LOPES et al., 2012). Variáveis ambientais podem atuar como filtros, influenciando o estabelecimento de comunidades de plantas como, por exemplo, a quantidade da incidência de luz que limita o desenvolvimento de algumas espécies. Logo, para a coexistência estável, em ambientes com filtragem ambiental intensa deve haver homogeneidade de ambientes, sem a qual, mesmo pequenas diferenças nessas características levariam à exclusão das espécies menos adaptadas.

Os filtros ambientais podem selecionar as espécies que irão surgir com maior frequência em um determinado local devido a condições ambientais limitantes como fertilidade do solo, luminosidade, temperatura e umidade (ASSUNÇÃO et al., 2020).

O conceito de filtro ambiental prediz que espécies presentes em escala regional estarão representadas em uma escala local e tenderiam a apresentar características semelhantes, necessárias para superar o filtro ambiental (CORNWELL et al., 2006). Desse modo, indivíduos que não apresentem características morfológicas necessárias para superar as restrições impostas pelo meio não conseguirão se estabelecer naquele local. Caso uma espécie passe por esse filtro ambiental, ela pode competir com as outras espécies que também passaram pelo mesmo filtro. A coexistência entre as competidoras é facilitada caso uma delas apresente características e estratégias diferentes de seus potenciais competidores na disputa por um recurso (MORIN 2005).

Recentemente, vários esforços foram feitos para inferir a diversidade funcional sobre escalas locais e regionais usando medições de sensoriamento remoto hiperespectrais terrestres ou aéreas (SCHWEIGER et al., 2018; ASNER et al., 2014; SCHNEIDER et al., 2017; ASNER et al., 2017).

Ser capaz de caracterizar a variação espacial da diversidade funcional é não só crucial para alcançar o monitoramento local da biodiversidade (DÍAZ et al., 2007; JETZ et al., 2016), mas também para melhorar as previsões sobre como as mudanças microclimáticas futuras afetarão o funcionamento do ecossistema e os serviços ecossistêmicos (SCHEITER et al., 2013; FISHER et al., 2018). No entanto, medições de atributos de plantas baseadas no solo são trabalhosas e logisticamente desafiadoras, especialmente em uma área extensa (HELFENSTEIN et al. 2022).

Os dados disponíveis sobre a diversidade funcional são relativamente escassos e, devido à falta de medições contínuas, não são adequadas para lidar com tendências de longo prazo para padrões de larga escala (SCHOLES et al., 2008). Assim, é urgente a necessidade de um sistema que possa efetivamente monitorar a diversidade funcional de plantas (TURNER, 2014; PETTORELLI et al., 2016; JETZ et al., 2016; ANDERSON-TEIXEIRA et al., 2015).

## REFERÊNCIAS

- ACKERLY, D. D.; CORNWELL, W. K. A trait-based approach to community assembly: partitioning of species trait values into within- and among-community components. **Ecology Letters**, v.10, 135–145, 2007.
- ANDERSON-TEIXEIRA, K.; DAVIES, S.; BENNETT, A.; GONZALEZ-AKRE E.; MULLER-LANDAU, H.; WRIGHT, S. ET AL., CTFS-Forest GEO: a worldwide network monitoring forests in an era of global change. **Glob. Chang. Biol**, v. 21, p. 528-549. 2015
- ASNER, G.; MARTIN, R.; KNAPP, D.; ANDERSON, C.; SINCA, F.; VAUGHN V. ET AL. Airborne laser-guided imaging spectroscopy to map forest trait diversity and guide conservation. **Science**, v.355 p. 385-389. 2017
- ASSUNÇÃO, V. A.; DA SILVA, D. M.; DALPONTI, G.; SARTORI, Â. L. B.; CASAGRANDE, J. C.; MANSANO, V. F. Environmental filters structure plant communities in the Brazilian Chaco. **Acta Botanica Brasilica**, v. 34. 2020
- BEGON, M.; HARPER, J. L; TOWNSEND, C. R. **Ecology: Individuals, Populations and Communities**. Blackwell Scientific Publishers, Cambridge. 1996
- BROWN, S; LUGO, A. E. Above Ground Biomass Estimates for Tropical Moist Forests of the Brazilian Amazon. **Interciencia**, v.17, 8-18. 1992

CHALONER, T. M.; GURR, S. J.; BEBBER, D.P. Geometry and evolution of the ecological niche in plant-associated microbes. **Nat Commun.** v. 11, p. 2955. 2020

CIANCIARUSO, M. V.; BATALHA, M. A.; GASTON, K. J.; PETCHEY, O. L. Including intraspecific variability in functional diversity. **Ecology.** v. 90(1), p. 81-89. 2009

CORDEIRO, J; FLORES, I; DE SOUZA, B. **Mastofauna da Reserva Ecológica Mata do Pau Ferro (Paraíba, Brasil): Avaliação de Impactos Ambientais e Considerações sobre a Biogeografia dos Brejos de Altitude.**, [S.l.], n. 17, 2020.

CORNELISSEN, J. H. C.; LAVOREL, S.; GARNIER, E.; DÍAZ, S.; BUCHMANN, N.; GURVICH, D. E.; REICH, P. B.; TERSTEEGE, H.; MORGAN, H. D.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; PAUSAS J. G.; POORTER, H. Handbook of Protocols for Standardised and Easy Measurement of Plant Functional Traits Worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 51, p. 335-380. 2003.

CORNWELL, W. K.; SCHWILK, D. W.; ACKERLY, D. D. A trait-based test for habitat filtering: convexhull volume. **Ecology**, v. 87, p. 1465-1471, 2006.

DIAZ, S.; CABIDO M. Vive La Différence: Plant Functional Diversity Matters to Ecosystem Processes. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 16, p. 646-655. 2001

FISHER, R.; KOVEN, C.; ANDEREGG, W.; CHRISTOFFERSEN, B.; DIETZE, M.; FARRIOR, C, ET AL. Vegetation demographics in earth system models: a review of progress and priorities. **Glob. Chang. Biol.** p. 35-54. 2018

GODOY O. BARTOMEUS I, ROHR R, SAAVEDRA S, Towards the Integration of Niche and Network Theories, **Trends in Ecology & Evolution**, v. 33, Issue 4, Pages 287-300. 2018

HELFENSTEIN, S. I.; SCHNEIDER, F. D.; SCHAEPMAN M.E.; FELIX, F. Assessing biodiversity from space: Impact of spatial and spectral resolution on trait-based functional diversity, **Remote Sensing of Environment**, v.275, 2022.

HUBBELL, S. P. The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography. Princeton University Press, Princeton, NJ. 2001.

HUBBELL, S. P. **Neutral theory and the evolution of functional equivalence.** Ecology, in press, v.19, p. 166-172 2005.

JENSEN, J. D.; PAYSEUR, B. A.; STEPHAN, W.; AQUADRO, C. F.; LYNCH, M.; CHARLESWORTH, D.; CHARLESWORTH, B. The importance of the Neutral Theory in 1968 and 50 year son: A response to Kern and Hahn 2018. **Evolution**, 73: 111-114. 2019.

JETZ, W. J.; CAVENDER-BARES, J. R.; PAVLICK, R. D.; SCHIMEL, D. F.; DAVIS F. G. ASNER, G. ET AL., Monitoring plant functional diversity from space. **Nature Plants**, v.2, p. 16024. 2016

LAVOREL, S.; MCINTYRE, S.; LANDSBERG, J.; FORBES T. Plant Functional Classifications: From General Groups to Specific Groups Based on Response to Disturbance. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 12, n. 12, p. 474-478. 1997

LOPES, S. F.; SCHIAVINI, I. S.; VALE, V.; PRADO, J. A.; ARANTES C. S. Historical review of studies in seasonal semideciduous forests in Brazil: a perspective for conservation. **Braz. Geogr. J. Geosci. Humanit. Res.** Medium Volume 2, p. 21-40. 2012.

MARQUES, M. C. M.; GRELE, C. E. V. (eds) **The Atlantic Forest**. Springer, Cham. 2021

MORIN, P. J. **Community Ecology**. Victoria: Blackwell Science. 2005.

PETCHEY, O. L.; GASTON, K. J. Functional diversity: back to basics and looking forward. **Ecol. Lett.** Vol. 9(6):741-758, 2006.

PETTORELLI, N.; WEGMANN, W.; SKIDMORE MÜCHER, S.; DAWSON T.; FERNANDEZ, M.; LUCAS, M. ET AL., Framing the concept of satellite remote sensing essential biodiversity variables: challenges and future directions. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, v.2, p. 122-131. 2016

PROSSER, J. I.; MARTINY, J. B. H. **Desafios conceituais em microbiologia. Ecologia da comunidade**. Fil. Trans. R. Soc. 2020

RICKLEFS, R. E.; SCHLUTER, D. (EDS.). **Species Diversity in Ecological Communities: Historical and Geographical Perspectives**. University of Chicago Press. 1993.

ROSELL, J. A.; OLSON, M. E.; MARTÍNEZ-GARZA, C. ; MARTÍNEZ-MÉNDEZ, N. Functional Diversity in Woody Organs of Tropical Dry Forests and Implications for Restoration. **Sustainability**. 2022

SCHEITER, S.; LANGAN, L.; HIGGINS, S. Next generation dynamic global vegetation models: learning from community ecology. **New Phytol.** 957-969. 2013

SCHOLES, R.; MACE, G.; TURNER, W.; GELLER, G.; JÜRGENS, N.; LARIGAUDERIE, A. ET AL., Toward a global biodiversity observing system. **Science**, p. 1044-1045. 2008

SCHNEIDER, F.; MORSDORF, F.; SCHMID, B.; PETCHEY, O.; HUENI A.; SCHIMEL D. ET AL., Mapping functional diversity from remote lysensed morphological and physiological forest traits. **Nat. Commun.** p. 1-57. 2017

SCHWEIGER, A.; CAVENDER-BARES, J.; TOWNSEND, P.; HOBBIE, S.; MADRITCH, M.; WANG, R. ET AL., Plant spectral diversity integrates functional and phylogenetic components of biodiversity and predicts ecosystem function. **Nature Ecology & Evolution**, p. 976-982. 2018

SILVA, A. F.; LEITÃO FILHO, H. Composição florística e estrutura de um trecho da mata atlântica de encosta no município de Ubatuba (São Paulo, Brasil) **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo. v.5, n. 1/2, p. 43-52, 1982

THOMAS, W.W.; CARVALHO, A. M. A.; GARRISON, J.; ARBELAEZ A. L. Plant Endemism in Two Forests in Southern Bahia, Brazil. **Biodiversity and Conservation** v. 7. 311-322. 1998.

TILMAN, D. **Functional Diversity Encyclopedia of Biodiversity**. 2001.

TURNER, W. Sensing biodiversity. **Science**, v. 346, p. 301-302. 2014

VAMOSI, S. M.; HEARD, S. B.; VAMOSI, J. C.; WEBB, C.O. Emerging Patterns In The Comparative Analysis of Phylogenetic Community Structure. **Mol Ecol**, v.18 p. 572-592. 2009.

VIOLLE, C.; NAVAS, M. L; VILE, D.; KAZAKOU, E.; FORTUNEL, C.; HUMMEL, I.; GARNIER, E. Let the concept of trait be functional. **Oikos**, v.116, p. 882-892, 2007.

VILELA, L.; DE CARVALHO LOPES, J. Hornschuchia (Annonaceae), an endemic and threatened genus from the Brazilian Atlantic Forest. **European Journal of Taxonomy**, v. 828(1), 75-108. 2022

WEIHER, E.; CLARKE, P.; KEDDY, P. A. Community assembly rules, morphological dispersion, of plant species the coexistence. **Oikos**, v. 81, n. 2, p. 309-322. 1998

WILLIG, M.R, KAUFMAN D.M, STEVENS R.D. Latitudinal gradients of biodiversity: pattern, process, scale, and synthesis. / **Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.** v. 34. p. 273-309. 2003

### **3 ARTIGO I - ANÁLISE DESCRITIVA DE ATRIBUTOS FUNCIONAIS DE UMA FLORESTA DE BREJO DE ALTITUDE**

#### **3.1 RESUMO**

A diversidade funcional é um importante componente da biodiversidade que leva em consideração as diferenças morfológicas, ecológicas e comportamentais entre as espécies e indivíduos e tem sido considerada uma importante medida para avaliar o estado de conservação dos ecossistemas. Diante deste fato foi testado se é possível analisar estatisticamente os atributos funcionais de espécies lenhosas de uma área de Floresta de Brejo de Altitude. O estudo de campo foi realizado no Parque Estadual Mata do Pau Ferro, Paraíba, Nordeste, Brasil. Foram analisados estatisticamente oito atributos vegetativos funcionais. Concluímos que ao todo as espécies apresentaram uma área Basal média (AB) de 0,32m<sup>2</sup>. Em relação a área foliar específica (SLA) as espécies apresentaram uma média 124,37 cm<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>. As espécies amostradas (n=31) apresentaram uma área foliar média de 190,57 cm<sup>2</sup>. Com relação aos atributos funcionais categóricos 55% das espécies apresentaram folhas simples, 42% folhas compostas e 3% folhas bicompostas. No que tange a ecologia foliar, 04 espécies foram classificadas como decíduas, 06 espécies como semidecíduas e 21 espécies como perenifólias.

**Palavras-chave:** brejos de altitude; diversidade funcional; atributos funcionais.

#### **3.2 INTRODUÇÃO**

A abordagem funcional da biodiversidade marca uma mudança na visão da Ecologia da Conservação, que passa a se preocupar não só com a perda das espécies, mas também em quanto essa perda afeta a funcionalidade do ecossistema (Diaz, et al., 2007), o que conseqüentemente, implica em perdas ambientais, sociais, econômicas e culturais. A necessidade de compreender a diversidade funcional deu um novo estímulo a uma longa tradição de estudo das características das plantas que refletem as estratégias ecológicas das espécies e determinam como as plantas respondem a fatores ambientais e influenciam as propriedades do ecossistema (KATTGE et al., 2011).

A Floresta Atlântica é a segunda maior floresta tropical da América do Sul. Com uma área total original de 1,6 milhões de ha é considerada uma das regiões mais biodiversas e únicas da Terra, resultado de uma história evolutiva complexa, o que resultou também em um alto grau de endemismo (MARQUES; GRELE 2021).

Parte da floresta atlântica é formada pelos Brejos de Altitude que são fragmentos da Mata Atlântica formando remanescentes de floresta úmida em plena região semiárida (CORDEIRO et al., 2020), cercadas por floresta secas, tendo uma condição climática peculiar com relação à umidade, temperatura e com pouco conhecimento sobre sua vegetação e ecologia funcional de suas espécies.

Há evidências que a variação nas características de plantas, dentro e entre as espécies, estão associadas a muitos processos ecológicos importantes em várias escalas. Isso resultou em uma forte demanda para se criar formas padronizadas para mensurar essas características (PEREZ-HARGUINDEGUY et al., 2013).

Medir a diversidade funcional significa medir a diversidade de atributos funcionais que estão diretamente ligados aos processos na comunidade natural (CORNELLISSSEN et al., 2003; PEREZ-HARGUINDEGUY et al., 2013).

Nas plantas, o conteúdo de matéria seca foliar é um atributo funcional, pois indica a resistência foliar a danos físicos, como herbivoria, ação eólica e pluvial (PEREZ-HARGUINDEGUY et al., 2013). Espécies com folhas com conteúdo de matéria seca elevados tendem a ser mais resistentes do que folhas com menor conteúdo, o que pode garantir uma maior taxa de sobrevivência (PEREZ-HARGUINDEGUY et al., 2013). A densidade básica da madeira também pode ser considerada um atributo funcional já que está relacionada às estratégias de resistência das plantas frente às condições ambientais variáveis (PEREZ-HARGUINDEGUY et al., 2013). Outros atributos funcionais nas plantas são a altura máxima, área foliar específica, divisão do limbo, tamanho da folha, área basal entre outros. Assim, atributos funcionais de diferentes partes da planta, como flores, sementes, folhas, raízes podem fornecer informações importantes sobre o papel das plantas em seu ambiente e sobre sua distribuição ao longo de gradientes ambientais (LAUGHLIN 2014).

A abordagem dos atributos funcionais nas plantas lida principalmente com variáveis quantitativas, a exemplo de taxas de sobrevivência, crescimento e reprodução, facilitando a identificação de padrões na comunidade e, conseqüentemente formulando previsões que podem auxiliar na conservação de áreas degradadas (HUSZAR 2011). Além disso, muitos atributos funcionais estão relacionados à utilização e conservação dos recursos ambientais e

podem, desta forma se relacionar a limitações ambientais particulares e estar associados às respostas das plantas às diferentes condições ambientais (JAGER et al., 2015).

A escolha da área de floresta de Brejo de Altitude se baseia pela sua condição biogeográfica, que promove uma constituição florística diferenciada, bem como pelo fato de ser um dos ambientes mais ameaçados da Mata Atlântica (RIBEIRO et al., 2009). A crescente e rápida degradação e substituição desses ecossistemas por grandes culturas geram uma urgente necessidade de se compreendê-los antes que o desmatamento e a fragmentação tornem irreversível a perda dos serviços ambientais prestados por essas formações vegetacionais.

Pensando nesta problemática, esta pesquisa teve como objetivo mensurar os atributos funcionais vegetativos contínuos (Área Foliar Específica, Tamanho da Folha, Densidade Básica da Madeira, Altura Máxima, Conteúdo de Matéria Seca Foliar e Área Basal) e categóricos (Divisão do Limbo e Ecologia Foliar) dos indivíduos de uma comunidade de floresta úmida e identificar as espécies vegetais arbóreas mais abundantes que contribuem com a manutenção da diversidade funcional do ecossistema estudado.

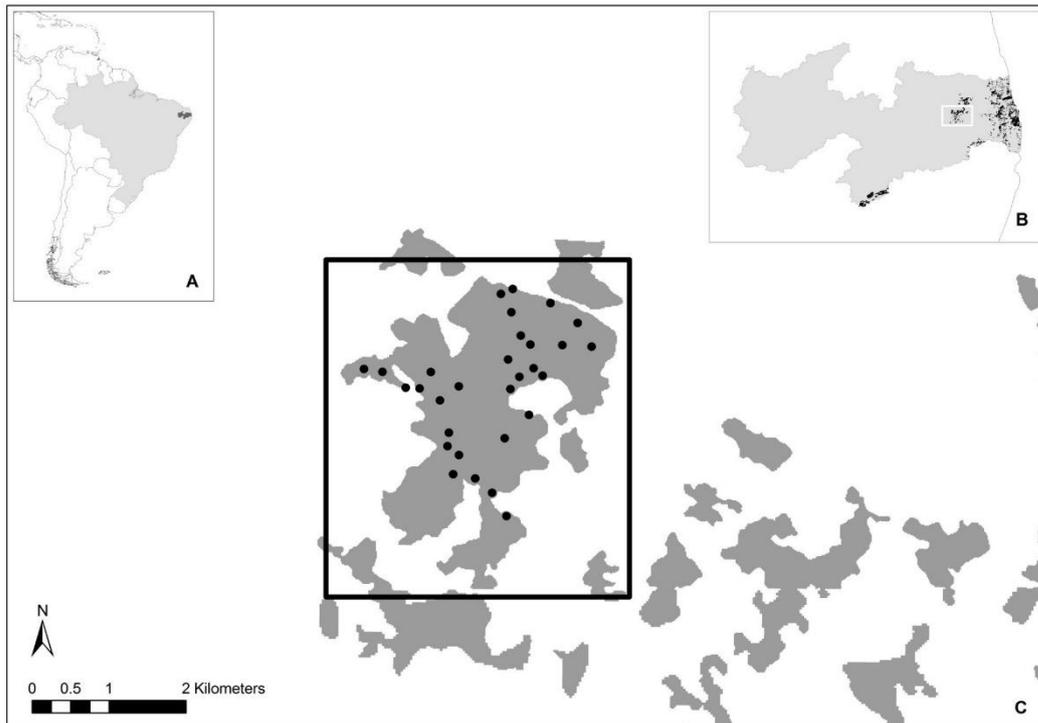
### 3.3 MATERIAL E MÉTODOS

**3.3.1 Área de estudo:** o estudo foi realizado no Parque Estadual Mata do Pau Ferro, localizado a 5 km a oeste do município de Areia (6°58'12" S e 35°42'15" W), Nordeste do Brasil (Figura 1). A área encontra-se a uma altitude variável entre 400 e 650 m, temperatura média anual de 22° C, umidade relativa em torno de 85% e totais pluviométricos anuais em torno de 1380 mm (SANTOS et al., 2020).

Seguindo a classificação de Veloso et al., (1991), a vegetação da área é do tipo Floresta Ombrófila Aberta, a qual encontra-se localizada na Ecorregião do Planalto da Borborema e dentro do domínio da floresta de Caatinga. Essa configuração caracteriza essas áreas como florestas de Brejos de Altitude, uma das fitofisionomias da Mata Atlântica (ANDRADE-LIMA 1982).

O relevo é bastante acidentado, o clima é úmido e os solos são profundos e medianamente férteis (MOREIRA, 1989). Com 600 ha, o Parque Estadual Mata do Pau Ferro destaca-se pela riqueza de espécies, na qual o número é relativamente maior, aproximadamente 70 espécies arbóreas (ANDRADE et al., 2006), do que a maioria das outras matas de brejo já estudadas (BARBOSA et al., 2004).

**3.3.2 Desenho Amostral:** foram elaboradas 30 parcelas permanentes (10 x 10 m), distribuídas aleatoriamente na área de estudo (Figura 1). As parcelas já se encontravam marcadas e com todos os pontos registrados com o auxílio de Sistema de Posicionamento Global (GPS).



**Figura 1** Localização do Parque Estadual Mata do Pau Ferro, Nordeste, Brasil. (A) Distribuição dos remanescentes de floresta Atlântica no estado da Paraíba (cinza escuro), destacando os remanescentes de floresta de Brejo de Altitude na Paraíba. (B) Fragmentos de floresta de Brejo de Altitude, destacando as unidades amostrais (círculos escuros) no Parque Estadual Mata do Pau Ferro (6°58'12'' S & 35°42'15'' W) (C). Mapa em ArcGis Desktop 10.1

**3.3.3 Coleta de amostras e dados:** As coletas foram realizadas durante o período de estudo (março de 2016 a julho de 2020). Foram amostrados indivíduos de espécies arbóreas presentes nas unidades amostrais. Foi registrada a riqueza e a abundância de espécie para todas as parcelas. Para cada espécie foram coletadas folhas jovens / adultas e saudáveis de até 10 indivíduos adultos e Circunferência ao Nível do Peito (CAP  $\geq$  10 cm) de parcelas diferentes, as quais foram analisadas em laboratório. A metodologia de coleta e armazenamento das amostras seguiu o método proposto para cada atributo funcional a ser medido, conforme a Tabela 1.

**3.3.4 Atributos funcionais:** As características selecionadas como atributos funcionais para a análise descritiva encontram-se resumidas na Tabela 1. A metodologia de mensuração dos atributos contínuos seguiu os protocolos de Cornelissen et al., (2003) e Smith (1954) e os atributos categóricos seguiram as classificações de Frankie *et al.*, (1974) e Morellato et al., (1989, 2000). Foram calculados, por espécie, a média e o desvio padrão de cada atributo funcional.

**Tabela 1** Atributos funcionais a serem descritos estatisticamente.

<b>Atributos contínuos</b>		
<b>Atributo</b>	<b>Descrição/ unidade</b>	<b>Amostras</b>
Área foliar específica (SLA)	Área foliar dividida pela massa seca (cm <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	3 folhas/indivíduo
Tamanho da folha (LS)	Área do limbo foliar (cm <sup>2</sup> )	3 folhas/indivíduo
Densidade básica da madeira (WD)	TU (%) + 1/1,53 (g.cm <sup>3</sup> ).	1 seção com pelo menos 3 cm de diâmetro do ramo
Altura máxima (H)	Categorias de 5m	Medida única por indivíduo
Conteúdo de matéria seca foliar (LDMC)	Massa úmida em função da massa seca (mg.g <sup>-1</sup> )	3 folhas/indivíduo
Área basal (BA)	Superfície da seção transversal ao nível do peito (170 cm) (cm <sup>2</sup> )	Medida única por indivíduo
<b>Atributos categóricos</b>		
<b>Atributo</b>	<b>Descrição das classes</b>	<b>Amostras</b>
Divisão do Limbo (LBD)	Folhas simples: sem divisão total do limbo Folhas compostas: com divisão total do limbo em folíolos.	Observação de 10 indivíduos
Deciduidade (DE)	Perenifólia, semidecídua e decídua	Observação de 10 indivíduos

a) Área foliar específica

Foi coletado folhas jovens (maior produtividade fotossintetizante) expandidas, sem sinal de patógeno ou de herbivoria. O pecíolo ou raque, assim como as nervuras foram

considerados parte da folha para a medição da área foliar específica. Foram coletados seções de galhos inteiros com as folhas e as removemos pouco antes da medição. Em campo, as amostras (galhos com folhas) foram enroladas em papel úmido e colocadas em sacos plásticos fechados, para evitar a desidratação das amostras. Cada folha (incluindo o pecíolo) foi cortada a partir da haste e suavemente seca antes da medição. A área projetada foi medida utilizando o *software* ImageJ 1.5.0. Processos fisiológicos e ecossistêmicos correlacionados a esse traço são: taxa de crescimento relativo, taxa fotossintética máxima e vida útil foliar (CORNELISSEN et al., 2003).

#### b) Tamanho da lâmina foliar

O processo de coleta e armazenamento das folhas foi idêntico ao relatado para área específica foliar. Foram coletadas 30 folhas, sendo três folhas aleatórias e bem iluminadas de cada um dos indivíduos. Medimos as lâminas foliares de forma individual (ou folíolos, no caso de folhas compostas). Processos fisiológicos e ecossistêmicos correlacionado com este traço incluem: equilíbrio hídrico, captação de luz e trocas gasosas (CORNELISSEN et al., 2003).

#### c) Densidade Básica da Madeira

Foi determinada a densidade básica da madeira pelo método de máximo teor de umidade, no qual foi determinada a massa saturada e a massa seca do galho, aplicando a densidade da “substância da madeira” que é dada pela constante  $1.53 \text{ g.cm}^3$  (SMITH 1954; FOELKEL et al., 1971). Foi medida a massa do galho fresco, posteriormente, o galho foi colocado em estufa para secar a  $60^\circ\text{C}$  durante 72 horas e, a posteriori, foi mensurada sua massa. Processos fisiológicos e ecossistêmicos relacionados a esse atributo incluem: longevidade, resistência a danos (CORNELISSEN et al., 2003).

#### d) Altura máxima

Foi quantificada a altura da planta pela distância em linha reta entre o nível do solo da planta e o limite superior dos principais tecidos fotossintéticos, por meio de um medidor de distância a laser (trena digital). A altura registrada correspondeu ao dossel geral da planta, eliminando quaisquer ramos excepcionais. Processos fisiológicos e ecossistêmicos relacionados a esse traço incluem: potencial competitivo, crescimento entre perturbação, tolerância ao estresse ambiental (CORNELISSEN et al., 2003).

e) Conteúdo de matéria seca foliar

Foram cortadas as folhas a partir do ramo e secado suavemente com papel toalha para remover qualquer vestígio de água da superfície, a posterior, medimos a massa fresca saturada de cada folha. Após o procedimento anterior, cada amostra foi seca em estufa à 60°C durante 72h e, posteriormente, medimos a sua respectiva massa seca. Processos fisiológicos e ecossistêmicos relacionados a esse traço incluem: vida útil foliar, taxa de crescimento relativo, resistência a danos, conteúdo de água, e produtividade (CORNELISSEN et al., 2003).

f) Área basal

Foi Medido a área basal em metros quadrado a partir da superfície da secção transversal ao nível de 1,3m do solo (CAP), a medição foi obtida através da fórmula  $BA = \pi.d^2/4$ . Processos fisiológicos e ecossistêmicos relacionados a esse traço incluem: potencial competitivo, taxa de crescimento relativo e resistência a danos (Cornellissen et al., 2003).

g) Divisão do Limbo

Foram classificados os indivíduos de acordo com a divisão do limbo foliar em: indivíduos com folhas simples, ausência da divisão total do limbo, indivíduos com folhas compostas, presença de uma divisão total do limbo foliar e indivíduos com folhas bicompostas, quando o limbo apresentava dois ou mais divisões totais. Processos fisiológicos e ecossistêmicos relacionados a esse atributo incluem equilíbrio hídrico, captação de luz e trocas gasosas (MORELLATO et al., 2000).

h) Deciduidade

Foi classificado a deciduidade foliar dos indivíduos em relação à sazonalidade em: perene, semidecidual e decidual. Processos fisiológicos e ecossistêmicos relacionados a esse atributo incluem equilíbrio hídrico, captação de luz e trocas gasosas (MORELLATO et al., 2000).

### 3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As coletas resultaram em uma amostragem de 870 indivíduos, representando 31 espécies distribuídas em 18 famílias.

De acordo com os dados, as parcelas que apresentaram maior diversidade foram 04 (n=23) e a 01 (n=20), as parcelas encontram-se nas maiores altitudes em relação as parcelas estudadas, 644m e 641m respectivamente, sugerindo que o microclima e particularidades em relação a estrutura do solo possa estar interferindo nesta diversidade. As famílias que apresentaram o maior número de espécies foram Fabaceae (04 espécies), Erythroxylaceae (03 espécies) e Sapindaceae (03 espécies). Estas famílias também foram amostradas com elevada importância em outros brejos de altitudes (NASCIMENTO & RODAL 2008; PINTO et al., 2012; ARAUJO et al. 2019). Muitas das espécies destas famílias possuem um maior sucesso em explorar os recursos ao longo de todo o gradiente altitudinal (DURIGAN et al. 2000; ARAUJO et al. 2019).

*Erythroxylum simonis* foi à espécie mais abundante, 309 indivíduos distribuída em 28 parcelas representando 31% dos indivíduos amostrados, sendo *Pterogyne nitens* a espécie de menor ocorrência com 8 indivíduos, presente apenas em 1 parcela. A grande abundância de *Erythroxylum simonis* deve-se principalmente ao seu alto grau endemismo. *Erythroxylum simonis* é uma espécie de sub-bosque da família das Erythroxylaceae encontradas nos brejos de altitude da região nordeste. Já *Pterogyne nitens* é uma espécie da família das Fabáceas que possui maior predominância relativa as florestas secas, por isso a baixaabundância (OLIVEIRA-FILHO, 2012).

Em relação aos atributos funcionais contínuos as espécies apresentaram uma altura média de 7,78m com destaque para *Byrsonima sericea* (15,52m) e uma amplitude total de 11,54m. A altura se torna uma estratégia ecológica importante para permanência da espécie, garantindo um potencial competitivo na obtenção de recurso e evitando o estresse ambiental (Cornellissen et al., 2003). Ao todo as espécies apresentaram uma Área Basal média de 0,32m<sup>2</sup> e uma amplitude total de 1,38 m<sup>2</sup>, *Hymenaea courbaril* (1,40m<sup>2</sup>), *Eschweilera ovata* (1,30m<sup>2</sup>), *Tapirira guianensis* (1,16m<sup>2</sup>) foram às espécies que apresentaram maior média, conforme a tabela 2, evidenciando que essas espécies possuem um potencial competitivo elevado. A área basal média encontrada nas parcelas é inferior aos valores encontrados por França & Stehmann (2004) em uma floresta altimontana por Moreno et al., (2003) em uma floresta úmida, mas é bem superior aos valores encontrados por Gama et al., (2002) em floresta secundária e Cestaro & Soares (2004) em uma floresta decídua. Os valores de área

basal encontrados são similares com aqueles encontrados em ecossistemas florestais com níveis de perturbação semelhantes.

**Tabela 2** Estatística descritiva dos atributos funcionais contínuos. Parque Estadual Mata do Pau Ferro, Nordeste, Brasil. (ALT) Altura, AB (Área basal), SLA (Área Foliar Específica), LS (Tamanho foliar), BWD (Densidade básica da madeira) e LDMC (Conteúdo de matéria seca foliar).

Estatística descritiva	ALT (m)	AB (m <sup>2</sup> )	SLA (cm <sup>2</sup> .g <sup>1</sup> )	LS (cm <sup>2</sup> )	DBM (g.cm <sup>3</sup> )	LDMC (mg.g <sup>1</sup> )
Mínimo	3.98	0.016	79.84	0006	0.237	28.03
Máximo	15.52	1.402	189.97	1811	0.402	91.05
Amplitude Total	11.54	1.386	110.13	1805	0.165	63.02
Mediana	7.60	1.230	120.45	0063	0.306	46.11
Média Aritmética	7.78	0.322	124.37	0190	0.309	45.09
Variância	6.65	1.670	83.51	1288	0.160	01.02
Desvio Padrão	2.58	0.408	2.890	0358	0.400	11.00

A estrutura do ambiente estudado é caracterizada pela presença de *B. sericea* (n=11), *T. guianensis* (n=11), *Hymenaeacourbaril* (n=18), *Eschweileraovata* (n=7), isso se deve principalmente ao grande porte destas espécies com altura máxima (H) de 15.5m, 8.19m, 11.75m e 11.61m respectivamente. Uma estrutura semelhante em brejos de altitude foi verificada no estado de Pernambuco (QUEIROZ, 2015). A altura máxima da planta está associada à forma de crescimento e a posição da espécie no gradiente, evidenciando vigor competitivo e seu tempo de vida potencial.

Em relação à Área foliar específica (SLA) as espécies apresentaram uma média 124.3 cm<sup>2</sup>.g<sup>1</sup> e amplitude total de 110.1 cm<sup>2</sup>.g com as espécies *Lonchocarpus araripense* (189.9 cm<sup>2</sup>.g<sup>1</sup>) e *Guapira sp* (198.1 cm<sup>2</sup>.g<sup>1</sup>) apresentando os maiores valores. As espécies amostradas apresentaram uma área foliar média de 19.05 cm<sup>2</sup> com destaque para espécie *Schefflera morototoni* (181.10 cm<sup>2</sup>). Espécies presentes em áreas perturbadas tendem a apresentar altas médias de SLA, uma vez que precisam de maior poder de captação de luminosidade para proporcionar um crescimento rápido (CHAZDON et al., 2007).

Sobre a densidade Básica da Madeira (WD) as espécies apresentaram uma média de 0.309 g.cm<sup>3</sup> e uma amplitude total de 0.165 g.cm<sup>3</sup> com as espécies *Talisia esculenta* (0.402 g.cm<sup>3</sup>) e *Psidium sp* (0.350 g.cm<sup>3</sup>) apresentando as maiores médias. Com relação ao conteúdo de matéria seca foliar (LDMC) a média das espécies foram 45mg.g<sup>1</sup> com maior média para *Erythroxylum pauferrense* (91mg.g<sup>1</sup>). Altos valores de DBM e LDMC

representam menor vulnerabilidade a danos físicos como herbivoria e exposição de ventos, além de maior longevidade (PEREZ-HARGUINDEGUY et al, 2013). A presença de espécies com alto grau de WD e LMDC são indicadores de ambientes mais conservados (NOGUEIRA et al., 2003; 2004; ZHOU et al., 2021). A maioria das médias de densidade básica das espécies apresentou valores mais elevados do que os citados na literatura, como pode ser observado na tabela 2. Essa discrepância provavelmente tem origem nas diferentes condições ambientais, de solo, de idade ou ainda nos diferentes genótipos das árvores analisadas (CINTRA, 2009).

Com relação aos atributos funcionais categóricos 55% das espécies apresentaram folhas simples, 42% folhas compostas e 3% folhas bicompostas. No que tange a deciduidade 04 espécies foram classificadas como decíduas 06 espécies como semidecíduas e 21 espécies como perenifólias (Tabela 3).

**Tabela 3** Lista de algumas espécies amostradas de acordo com a divisão do limbo foliar (Folha Simples – FS, Folha Composta – FC, Folha Bicomposta – FB) e Deciduidade (Perenifólia – PE, Decídua – DE, Semidecídua – SD) no Parque Estadual Mata do Pau Ferro, Nordeste, Brasil (6°58'12" S, 35°42'15" W).

FAMÍLIA/ESPÉCIES	FS	FC	FB	PE	DE	SD
<b>ANACARDIACEAE</b>						
<i>Tapirira guianensis</i> Aubl	X					
<i>Thyrsodium spruceanum</i> Aubl		X				
<b>APOCYNACEAE</b>						
<i>Himatanthus bracteatus</i> A. DC.	X			X		
<b>ARALIACEAE</b>						
<i>Schefflera morototoni</i> Aubl		X		X		
<b>BIGNONIACEAE</b>						
<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S.Grose		X			X	
<b>BURSERACEAE</b>						
<i>Protium heptaphyllum</i> Aubl		X		X		
<b>ERYTHROXYLACEAE</b>						
<i>Erythroxylum citrifolium</i> A.St.-Hil.	X			X		
<i>Erythroxylum decidum</i> A.St.-Hil	X					X
<i>Erythroxylum paufferrense</i> Plowman	X			X		
<i>Erythroxylum simonis</i> Plowman	X			X		
<b>FABACEAE</b>						
<i>Bowdichia virgilioides</i> Kunt		X			X	

<i>Hymenaea courbaril</i> L		X		X
<i>Lonchocarpus araripense</i> (Poir.) Kunth ex DC	X			
<i>Pterogyne nitens</i> Tul.			X	X
LAURACEAE				
<i>Ocotea complicata</i> (Meisn.) Mez	X		X	
LECYTHIDACEAE				
<i>Eschweilera ovata</i> (Cambess.) Miers	X		X	
MALPIGHIACEAE				
<i>Byrsonima sericea</i> DC	X			X
MALVACEAE				
<i>Erioteca macrophylla</i> K.Schum		X	X	
<i>Luehea ochrophylla</i> Mart	X			X
MORACEAE				
<i>Brosimum guianense</i> Aubl	X		X	
<i>Sorocea hilarii</i> Gaudich	X		X	
MYRSINACEAE				
<i>Rapanea ferrugínea</i> Ruiz & Pav.	X		X	
MYRTACEAE				
<i>Myrcia candoleana</i> O.Berg	X			X
<i>Psidium</i> sp	X			X
NYCTAGINACEAE				
<i>Guapira</i> sp	X		X	
SAPINDACEAE				
<i>Allophylus laevigatus</i> (Turcz.) Radlk				
<i>Cupania revoluta</i> Rdlk		X	X	
<i>Talisia esculenta</i> (A. St.-Hil.) Radlk		X		X
SIMAROUBACEAE				
<i>Simarouba amara</i> aubl.		X	X	
RUBIACEAE				
<i>Guetarda viburnoides</i> Cham. Schltldl.	X		X	
<i>Psychotria carthagenesis</i> Jacq.	X		X	

A divisão do limbo foliar é uma importante estratégia ecológica da planta para captação da luminosidade (CORNELLISSSEN et al., 2003). Na área estudada foi observada uma predominância para espécies de folhas simples e compostas evidenciando a luz é um recurso relativamente escasso como em outras áreas de floresta úmida. A imensa maioria de espécies perenifólias (*Erythroxylum simonis*, *Talisia esculenta*, *Cupania revoluta*) evidencia entre

outros fatores, as altas taxas pluviométricas anuais (1380 mm) na área estudada fazendo com que não haja perdas das folhas dos indivíduos devido à sazonalidade. Apenas algumas espécies decíduas e semidecíduas permanecem no local.

### 3.5 CONCLUSÕES

Com o presente estudo foi possível realizar um levantamento de espécies e famílias, além mensurar estatisticamente os atributos funcionais contínuos e categóricos de plantas arbóreas em uma comunidade de floresta úmida, indicando as espécies mais abundantes, além da sua categorização de acordo com a divisão do limbo e a Deciduidade.

### REFERÊNCIAS

ANDRADE-LIMA, D. Present-day forest refuges in Northeastern Brazil. pp. 245-251, in: Prance, G.T. (ed.). **Biological diversification in the tropics**. Columbia University Press, New York, 1982.

ARAÚJO, T.; QUEIROZ, A.; LOPES, S. Fitossociologia de um brejo de altitude no semiárido brasileiro: variação das espécies dominantes ao longo do gradiente altitudinal. **Ciência Florestal**. V. 29. P. 779-794, 2019.

BARBOSA, M. R. V.; AGRA, M. F.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CUNHA J. P.; ANDRADE, L. A. neste volume. **Diversidade florística na Mata do Pau-Ferro**, Areia, Paraíba, 2004.

CESTARO, L. A.; SOARES, J. J. Variações florística e estrutural e relações fitogeográficas de um fragmento de floresta decídua no Rio Grande do Norte, Brasil **Acta Botanica Brasilica** v.18(2), 203-218. 2004.

CORNELISSEN, J. H. C.; LAVOREL, S.; GARNIER, E.; DÍAZ, S.; BUCHMANN, N.; GURVICH, D. E.; REICH, P. B.; TERSTEEGE, H.; MORGAN, H. D.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; PAUSAS J. G.; POORTER, H. Handbook of Protocols for Standardised and Easy Measurement of Plant Functional Traits Worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 51, p. 335-380. 2003.

DIAZ, S.; LAVOREL, S.; DE BELLO, F.; QUÉTIER, F.; GRIGULIS, K.; ROBSON, T. M. Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. **Proceedings of the National Academy of Science**, v.104, n. 52, p. 20684-20689, 2007.

DURIGAN, G. et al. Estrutura e diversidade do componente arbóreo da floresta na Estação Ecológica dos Caetetus, Gália, SP. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 371-383, 2000.

FRANÇA, G. S.; STEHMANN, J. R. Composição florística e estrutura do componente arbóreo de uma floresta altimontana no município de Camanducaia, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica** v. 27(1), p.19-30 2004

MORENO, M. R.; NASCIMENTO, M. T.; KURTZ, B. C. Estrutura e composição florística do estrato arbóreo em duas zonas altitudinais na mata atlântica de encosta da Região do Imbé, RJ. **Acta Botanica Brasilica** v.17(3), p. 371-386. 2003

MARQUES, M. C. M.; GRELLE, C. E. V. (Eds.). **The Atlantic Forest**. 2021.

MAYO, S. J.; FEVEREIRO, V. P. B. **Mata do Pau-Ferro: a pilot study of the brejo forest**. Royal Botanic Gardens, Kew, London, 1982.

MOREIRA, E. R. **Mesorregiões e microrregiões da Paraíba: delimitação e caracterização**. Governo da Paraíba, João Pessoa, 1989.

MORELLATO, L. P. C.; TALORA, D. C.; TAKAHASI, A.; BENCKE, C. S. C.; ROMERA, E. C.; ZIPPARRO, V. Phenology of Atlantic rainforest trees: a comparative study. **Biotropica** v.32. 811-823, 2000.

NASCIMENTO, L. M.; RODAL, M. J. N. Fisionomia e estrutura de uma floresta estacional montana do maciço da Borborema, Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 27-39, 2008.

NOGUEIRA, E. M.; FRANÇA, M. B.; NELSON, B. W. **Densidade de madeira em floresta densa na Amazônia Central e sua aplicação na estimativa de biomassa deflorestas no Arco do Desmatamento**. In: Anais (CD-ROM) do 54º Congresso Nacional de Botânica / 3ª Reunião Amazônica de Botânica, Universidade da Amazônia (UNAMA), Belém 2003

NOGUEIRA, E.M.; NELSON, B.W.; FEARNSSIDE, P.M. **Densidade do cerne de árvores na Amazônia Central: efeito da temperatura e da reidratação**. In: Razera, A.; Nogueira, E.M.; Freitas, D.V.; Gonçalves, J.F.C.; Luizão, F.J. (eds.), Anais (CD-ROM) do 3º Simpósio Brasileiro de Pós-graduação em Engenharia Florestal / 1º Encontro Amazônico de Ciências Florestais, Manaus — AM. 2004.

PEREZ-HARGUINDEGUY, N. ET AL., New Handbook for Standardised Measurement of Plant Functional Traits World Wide. **Australian Journal Botany** V. 61, n.3, p 167-234, 2013.

PINTO, M. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; NASCIMENTO, L. M. **Florística e estrutura da vegetação de um brejo de altitude em Pesqueira, PE, Brasil**. Revista Nordestina de Biologia, João Pessoa, v. 21, n. 1, p. 47-79, 2012.

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F.; HIROTA, M. M. Brazilian Atlantic Forest: how much is left and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation** 142, 1141–1153, 2009.

SANTOS, H. A, ET AL. **Plano de manejo do Parque Estadual Mata do Pau-Ferro**. [recurso eletrônico] / organizado por Heloisa Araújo dos Santos et al. Realização e apoio do Governo do Estado da Paraíba, SEIRMA, SUDEMA, ATECEL, Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza, - Cabedelo, PB: Editora UNIESP, p.349. 2020

TABARELLI, M. Integridade e ameaças aos brejos da Paraíba e Pernambuco. In: Tabarelli, M. (Ed.) Plano de Conservação dos Brejos de Paraíba e Pernambuco. **Relatório Técnico do Subprojeto Recuperação e Manejo dos Ecossistemas Naturais de Brejos de Altitude de Pernambuco e Paraíba**. Projeto *PROBIO*, Ministério do Meio Ambiente. Recife. Pp. 82-91, 2001.

WEBB, C. O.; ACKERLY, D. D.; MCPEEK, M. A.; DONOGHUER, M. J. Phylogenies and community ecology. **Annu. Rev. Ecol. Syst.** v. 33, 475–505, 2002.

ZHOU, T.; ZHANG, J.; QIN, Y.; JIANG, M.; QIAO, X. The Effects of Biotic and Abiotic Factors on the Community Dynamics in a Mountain Subtropical Forest. **Forests**. v. 12, 427. 2021

## **4 ARTIGO II - DIVERSIDADE FUNCIONAL E FILTRAGEM AMBIENTAL EM ESPÉCIES ARBÓREAS DE UMA FLORESTA OMBRÓFILA ABERTA**

### **4.1 RESUMO**

Fatores ambientais atuam como filtros influenciando como as espécies estão distribuídas, conseqüentemente direcionando a diversidade funcional nas comunidades. Diante deste fato, foi testado se as variáveis ambientais (Altitude, Abertura de dossel, Inclinação do Terreno, Distância da Área Perturbada, Propriedades do solo) de uma área de Floresta de Brejo de Altitude estariam atuando como potenciais filtros influenciando a diversidade funcional local de plantas. O estudo de campo foi realizado no Parque Estadual Mata do Pau Ferro, Paraíba, Nordeste, Brasil. Foi calculada a diversidade funcional utilizando um índice baseado em dendrogramas a partir de oito atributos vegetativos funcionais (Área Foliar Específica, Tamanho da Folha, Densidade Básica da Madeira, Altura Máxima, Conteúdo de Matéria Seca Foliar, Área Basal, Divisão do Limbo e Deciduidade Foliar). Foi testado índice de diversidade funcional como variável dependente dos seguintes Filtros ambientais preditores: Teor de matéria orgânica, teor de sódio, potássio, alumínio, cálcio, magnésio, capacidade de troca catiônica (CTC), textura do solo, abertura de dossel, altitude, inclinação e distância da paisagem perturbada. Foram testados os modelos a partir de uma análise Stepwise e selecionado o melhor modelo através do Critério de Informação de Akaike (AIC). A diversidade funcional variou, significativamente, de modo positivo em função da altitude ( $p < 0,001$ ), da estrutura e textura do solo ( $p < 0,001$ ) e Distância da Paisagem Perturbada ( $p < 0,001$ ) e negativamente em função Teor de Matéria Orgânica ( $p < 0,001$ ). Concluímos que na floresta úmida estudada, as variáveis ambientais locais associadas aos componentes do solo, altitude e distância da paisagem perturbada atuaram como filtros abióticos, direcionando a diversidade funcional de plantas nessa comunidade.

**Palavras-chave:** brejos de altitude; mata atlântica; atributos funcionais

## 4.2 INTRODUÇÃO

Fatores como tipos de solos, o clima, regimes de perturbação, composição atmosférica e interações bióticas são considerados filtros ambientais que influenciam fortemente quais são as espécies que podem estar estabelecidas nos diferentes ambientes, (SIEFERT 2012; ASEFA et al., 2017). O efeito da filtragem ambiental em comunidades de plantas tem sido avaliado ao longo de gradientes ambientais locais ou regionais (DE BELLO et al., 2013; BUTTERFIELD; MUNSON 2016). Portanto, somente as espécies que possuem atributos que possuem capacidade de suportar tais condições estarão hábeis a sobreviver em determinado ambiente (DIAZ et al., 1998). Essas adaptações podem levar a uma convergência de determinadas funcionalidades ecológicas dentro da comunidade diminuindo a diversidade funcional (DIAZ; CABIDO 2003).

Pesquisas têm demonstrado que as respostas das espécies aos fatores ambientais são controladas por seus traços funcionais (DE BELLO et al., 2013; KAZAKOU et al., 2016). Esses fatores, também influenciam a abundância das espécies (STEIN et al., 2014), assim como, os valores de diversidade funcional em diferentes comunidades (PAUSAS; VERDÚ, 2008; CORNWELL; ACKERLY 2010).

A altitude e a inclinação do terreno também são fatores que podem influenciar a diversidade funcional de espécies vegetais, como verificado por Zang et al., (2017) numa floresta montanhosa no Sudeste Asiático. Adicionalmente, perturbações antrópicas também têm sido pesquisadas como fatores que filtram as espécies nas comunidades e influenciam a riqueza de espécies, os traços funcionais e a diversidade funcional (MAYFIELD et al., 2010; TABARELLI et al., 2010; GARCIA et al., 2015).

Vários filtros ambientais presentes no solo como teor de potássio (K) e Fósforo (P) e as condições climáticas como temperatura e teor de umidade podem ocorrer simultaneamente (ALMEIDA et al., 2018; PINHO et al., 2019; ARRUDA et al., 2020), e sua interação pode formar gradientes ecológicos (WHITTAKER 1967; DWYER; LAUGHLIN 2017) que geram diferentes condições ambientais que favorecem ou dificultam o estabelecimento de espécies, estruturando assim a diversidade taxonômica e funcional. Por exemplo, na região do Chaco, a composição específica varia espacialmente de acordo com as condições ambientais (MORALES et al., 2019; ASSUNÇÃO et al., 2022). Além disso, eventos de incêndio e uso humano interferem no crescimento da vegetação (KUNST et al., 2006).

Por outro lado, alguns estudos assumem que uma série de filtros hierárquicos pode impedir que uma espécie em potencial entre em uma comunidade se as características

funcionais de uma espécie não funcionarem bem nas condições específicas do ecossistema local (KEDDY 1992; MENEGOTTO et al., 2019; SUTTON et al., 2020).

No entanto, outros estudos vêm demonstrando que as comunidades podem ser resultado de ambos os processos (LOREAU 2000; SHURIN; SRIVASTAVA 2005), além de outra como dispersão e especiação. Por exemplo, já foi observado que padrões de diversidade funcional foram determinados por variáveis ambientais locais como abertura de dossel, topografia, fertilidade e composição química e textura do solo em uma área de floresta amazônica (KRAFT et al., 2008; KRAFT et al., 2015). Além disso, as condições edáficas interagem fortemente com as comunidades ao longo de gradientes (FRIDLEY et al., 2011; LIANCOURT et al., 2013). Interações do solo podem explicar a variação na diversidade de atributos foliares (WRIGHT et al., 2004; FRESCHE et al., 2011).

No Nordeste do Brasil ocorrem os Brejos de Altitude, formações florestais que são uma das fitofisionomias da Mata Atlântica e são caracterizadas por serem ilhas de florestas úmidas serranas inseridas no domínio da Caatinga, uma formação vegetacional predominantemente xerófila (ANDRADE, 1982). Essa condição biogeográfica pode proporcionar variações ambientais locais diferentes daquelas encontradas em outras florestas úmidas, as quais devem influenciar a estrutura dessas comunidades.

Os brejos são “áreas de exceção” com alto grau de endemismo na região do semiárido devido às condições privilegiadas quanto à umidade do solo e do ar, temperatura e cobertura vegetal (ANDRADE, 1989; CORDEIRO et al., 2020). Acredita-se que a formação de floresta úmida isolada sofra influência da condição ambiental vizinha e apresente padrões diferentes daqueles encontrados em outras florestas úmidas. Diante disto, tivemos como objetivo testar se as variáveis ambientais locais como altitude, abertura de dossel, fatores edáficos e distância da paisagem perturbada estariam atuando como potenciais filtros, influenciando a diversidade funcional de plantas em uma área de floresta de Brejo de Altitude.

## 4.3 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.3.1 Área de Estudo

A caracterização da área estudada foi realizada no capítulo I, item *Materiais e Métodos*.

### 4.3.2 Coleta de dados

Estabelecemos 30 parcelas permanentes (10m x 10m), distribuídas aleatoriamente na área de estudo (Figura 1), a partir da localização das coordenadas, em campo, com o auxílio de Sistema de Posicionamento Global (GPS). Foram registradas as espécies arbóreas do estrato arbustivo e arbóreo presentes nas parcelas. Foram registradas a riqueza e a abundância de espécies em todas as parcelas. Para cada espécie, Foram coletadas folhas adultas e saudáveis ( $n = 36$ ) de até doze indivíduos adultos, com Circunferência ao Nível do Peito (CAP  $\geq 10$  cm), de parcelas diferentes. Este material foi analisado em laboratório para a coleta dos dados dos atributos. Também foi utilizados binóculos (10 x 42) para visualização das espécies arbóreas, podão e tesoura de poda para a coleta das amostras.

### 4.3.3 Atributos funcionais

As características selecionadas como atributos funcionais para a análise da diversidade funcional encontram-se resumidas na Tabela 1 do capítulo I. A mensuração dos atributos contínuos seguiu o proposto por Cornelissen et al., (2003) e Smith (1954) e os atributos categóricos foram utilizadas as classificações de Frankie *et al.*, (1974) e Morellato et al., (1989; 2000).

### 4.3.4 Variáveis ambientais

#### Altitude

Foi registrada a altitude utilizando um barômetro com altímetro digital. Mensurados os dados de altitude de cada extremidade e de um ponto central da parcela, depois foi realizada uma média desses pontos.

### Inclinação do Terreno

A inclinação do terreno nas parcelas foi realizada utilizando um inclinômetro digital com transferidor e medidor de ângulos nível CO. O mesmo possui faixa de medição de 4 x 90°, com +/- 0,1°, base magnética com 3 ímãs de alta potência e escala de medição 4 x 90° e resolução: 0,1° (PROTRACTOR). Foi calculada a inclinação do terreno a partir da distância entre o ponto mais baixo e o ponto mais alto da parcela.

### Abertura de Dossel

A abertura de dossel foi calculada utilizando uma fotografia hemisférica. Foi calculada a abertura de dossel a partir da média do índice de área foliar de cada extremidade e de um ponto central da parcela, através das fotografias hemisféricas dadas pelo Plant Canopy Imager modelo CI 110 com lente de 8 mm, olho de peixe CID Bio-Science, Inc.

### Distância da Paisagem Perturbada

A Distância da Área Perturbada foi mensurada com o uso do equipamento de Sistema de Posicionamento Global (GPS) modelo GPS Portátil Garmin GPSMAP 64x GPS/GLONASS. A transferência dos dados coletados pelo receptor foi realizada através do software RCS (Receiver Communication Software) da própria Garmin.

Foram consideradas áreas perturbadas aquelas que sofreram algum tipo de degradação pela ação antrópica, modificando a sua condição natural.

### Estrutura do Solo, Textura, Fertilidade e Química do solo

Foram coletadas as amostras de solo recolhendo-se cinco subamostras com 10 cm de diâmetro e 25 cm de profundidade do solo, uma de cada extremidade da parcela e uma central. Em seguida, foram misturadas as subamostras e do montante foi retirada uma amostra de 500g (Silva 2009; Embrapa 2011). Como descritores para determinar a física do solo, foram selecionadas: a estrutura e textura do solo.

Para mensurar a estrutura do solo foi utilizado o método da proveta onde foi determinada a umidade da amostra em base gravimétrica. O cálculo da estrutura do solo foi realizada através da fórmula:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{m.f}}{\mathbf{V}}$$

Em que:

E – estrutura do solo, em kg.dm<sup>3</sup> (equivalente a g cm<sup>3</sup>).

m – massa da amostra de solo (TFSA), em g.

V – volume de solo na proveta, em cm<sup>3</sup>.

f – fator de correção de umidade da amostra.

Para mensurar a textura do Solo foi estimada, através do método indireto, pela relação entre a estrutura do solo e a estrutura das partículas, onde a estrutura do solo considerou o volume de poros mais o volume das partículas e a densidade das partículas considerou apenas o volume das partículas. O cálculo da textura do solo foi realizado através da fórmula:

$$\mathbf{T} = \frac{(\mathbf{E_p} - \mathbf{E_s})}{\mathbf{E_p}}$$

Em que:

T – Textura do solo, em m<sup>3</sup>.

E<sub>p</sub> – Estrutura de partículas sólidas do solo, em kg dm<sup>3</sup>.

E<sub>s</sub> – Estrutura do solo, em kg dm<sup>3</sup>

Como descritores da química do solo, foram selecionados: pH, quantidade de fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H<sup>+</sup>+Al<sup>+3</sup>), soma das bases (SB) e capacidade de troca catiônica (CTC). Como descritores da fertilidade do solo, foram utilizados o teor de matéria orgânica (MO) e o valor de saturação de bases (V%). Este último é recomendado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), para classificar a fertilidade dos solos em: solos eutróficos, com alta fertilidade (V>50 %) e solos distróficos com média à baixa fertilidade (V<50 %). Para mais detalhes, ver Silva (2009) e Embrapa (2011).

Foram realizadas as análises das amostras de solo no Laboratório de Física e Química do Solo do Departamento de Solos e Engenharia Rural do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba.

#### 4.3.5 Cálculo da diversidade funcional

Para determinar a diversidade funcional (FD) foi utilizado o método proposto por Petchey & Gaston (2002, 2006). Foi construída uma matriz funcional (espécies x atributos funcionais), em seguida essa matriz foi convertida em uma matriz de distância dos atributos funcionais entre as espécies amostrados pelo método de Gower (LEGENDRE & LEGENDRE 1998), uma vez que os dados incluem variáveis contínuas e categóricas. Posteriormente, foi realizado o agrupamento da matriz de distância pelo método UPGMA para construir o dendrograma. Para calcular a diversidade funcional de cada unidade amostral, foi somado o comprimento dos braços necessários para ligar todas as espécies que ali ocorrem, usando o método fornecido por Petchey & Gaston (2002). Para testar se o dendrograma corresponderá à matriz de distância apropriadamente, foi calculado o coeficiente de correlação cofenética (PETCHEY & GASTON 2002, 2006). As análises foram realizadas no ambiente computacional R (version 3.2.1; R Foundation for Statistical Computing, <http://www.R-project.org>). Foram utilizados os pacotes ‘FD’, ‘cluster’ e ‘vegan’.

#### 4.3.6 Análises estatísticas

Foi realizada a estatística descritiva de cada atributo funcional contínuo e a porcentagem dos atributos categóricos. Foram testados se as variáveis ambientais selecionadas apresentavam forte correlação utilizando o teste de correlação de Pearson, para evitando assim redundância na análise realizada. Foi realizada uma análise inicial de regressão linear múltipla (JONGMAN et al., 1995) dos valores do índice FD em função fatores ambientais. Em seguida, foi realizada uma análise Stepwise utilizando o Critério de Informação de Akaike (“Akaike’s information criterion”, JOHNSON & OMLAND 2004) para eleger o melhor modelo dentre as variáveis testadas. Utilizando-se as variáveis selecionadas no melhor modelo, foi realizada mais uma vez a análise de regressão múltipla para constatar como esse conjunto de variáveis ambientais estaria atuando como preditoras da diversidade funcional. Foram usados os pacotes “vegan” (OKSANEN et al., 2012) e “Mass” no ambiente computacional R (version 3.2.1; R Foundation for Statistical Computing, <http://www.R-project.org>).

### 4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram amostrados 1020 indivíduos pertencentes a 31 espécies distribuídas em 18 famílias. As famílias que apresentaram o maior número de espécies foram Fabaceae (04

espécies), Erythroxylaceae (03 espécies) e Sapindaceae (03 espécies). As espécies mais abundantes foram *Erythroxylum simonis* (n = 328 indivíduos), registrada em 28 parcelas e representando 35% dos indivíduos amostrados, seguida por *Thyrsodium spruceanum* (n = 68). A espécie com o menor número de indivíduos foi *Pterogyne nitens*, com apenas oito indivíduos presentes apenas em uma unidade amostral.

A comunidade, de acordo com a ponderação do número de espécies, apresentou predominância de espécies com folhas simples (57%), seguidas de espécies com folhas compostas (40%) e folhas bicompostas (3%). Do total de espécies registradas, 68% são perenifólias, 19% são semidecíduas e 13% são decíduas.

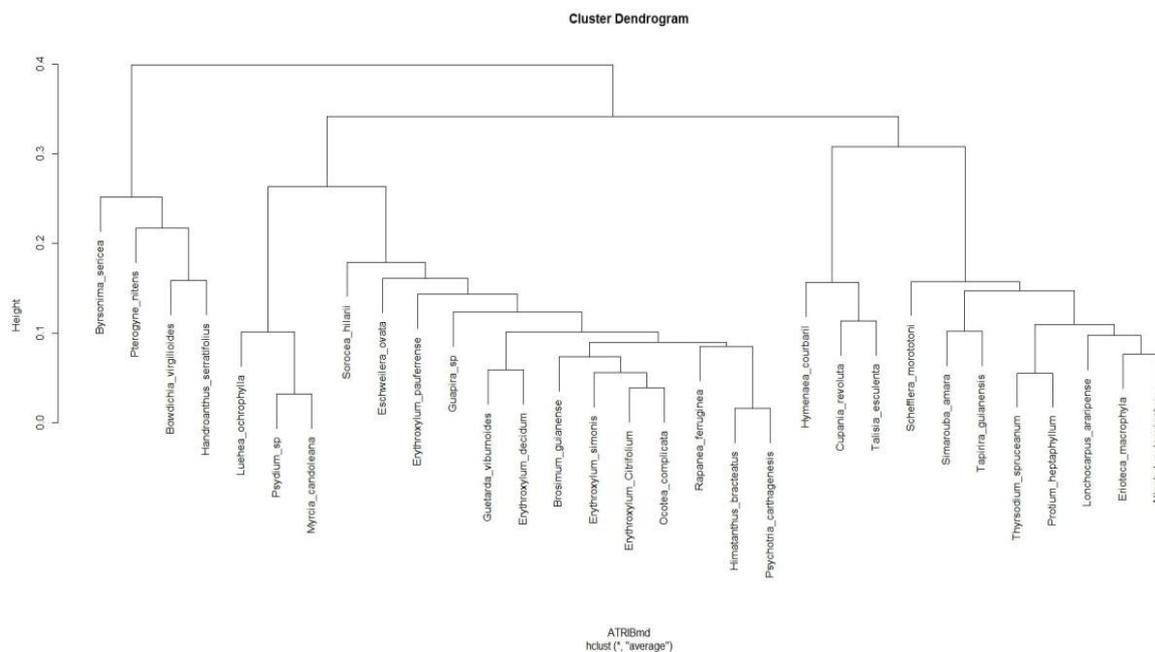
Os valores do índice de diversidade funcional das variáveis ambientais por parcela estão representados na tabela 4.

**Tabela 4** Valores representativos do Índice de Diversidade Funcional (FD) e das Variáveis Ambientais: Abertura do Dossel (AD), Textura do Solo (TS), Estrutura do Solo (ES) Altitude (AL), Inclinação do Terreno (IN), Distância da Área Perturbada (DPP) E Teor de Matéria Orgânica (MO), Potencial de Hidrogênio do Solo (pH).

PARCELA	FD	AD (graus)	TS (g.mm <sup>3</sup> )	AL (metros)	IN (metros)	DPP (metros)	ES (g.mm <sup>3</sup> )	MO (mg.g)	pH
01	3,73	1,33	0,57	641,00	1,70	39,20	1,10	34,72	4,90
02	1,42	1,54	0,58	600,00	1,40	38,20	1,12	65,78	4,48
03	2,19	1,57	0,62	628,00	12,30	67,40	0,96	63,43	4,24
04	3,86	1,76	0,46	644,00	3,80	200,00	1,39	14,30	4,38
05	2,89	1,52	0,60	564,00	8,70	36,70	1,02	16,58	5,13
06	0,74	1,38	0,49	601,00	9,80	31,50	1,04	33,38	4,26
07	2,06	1,53	0,58	595,00	12,80	500,00	1,07	31,89	4,20
08	2,14	1,78	0,62	502,00	15,70	200,00	0,99	15,28	4,71
09	1,29	1,34	0,56	597,00	24,20	55,00	1,13	30,29	5,12
10	1,71	1,28	0,47	596,00	9,70	500,00	1,40	35,65	4,90
11	1,86	1,26	0,54	568,00	26,90	31,70	1,21	24,85	4,63
12	1,92	1,56	0,64	606,00	24,10	200,00	0,93	53,35	4,09
13	2,03	1,10	0,57	549,00	32,90	42,80	1,11	39,11	5,06
14	1,31	1,82	0,51	558,00	13,70	128,20	1,27	18,45	5,12
15	1,35	1,78	0,53	581,00	14,70	32,30	1,22	28,33	5,04
16	1,77	1,52	0,50	531,00	18,30	300,00	1,30	18,38	4,76
17	1,46	1,34	0,58	559,00	20,70	200,00	1,10	52,08	6,05
18	2,14	1,37	0,52	568,00	28,80	500,00	1,26	16,32	5,00
19	1,13	1,39	0,58	542,00	33,00	200,00	1,10	32,31	5,11
20	1,77	1,58	0,54	557,00	4,50	231,00	1,21	14,50	4,85
21	1,93	1,45	0,54	600,00	8,60	300,00	1,15	28,05	4,69
22	2,01	1,47	0,50	586,00	13,40	45,40	1,29	12,02	5,74
23	1,19	2,25	0,54	545,00	8,60	300,00	1,21	30,18	5,00
24	2,03	1,65	0,54	545,00	11,20	200,00	1,25	19,95	5,10
25	2,95	1,32	0,56	612,00	12,80	400,00	1,17	44,53	4,41
26	2,19	2,13	0,52	555,00	8,70	400,00	1,22	25,20	4,94
27	1,05	1,59	0,55	564,00	17,20	141,30	1,13	29,54	5,28
28	1,26	1,35	0,42	534,00	21,10	500,00	1,48	34,16	5,78
29	1,97	1,39	0,52	553,00	18,80	531,70	1,24	19,73	4,63
30	2,94	1,42	0,62	621,00	24,50	400,00	1,00	53,77	4,64

A variação do índice de diversidade funcional (FD) entre as parcelas foi de 3,12. A parcela 04 foi a que apresentou maior índice FD (3,86) e maior altitude (644m). Em relação à abertura de dossel a amplitude total registrada entre as parcelas foi de 1,15° de índice foliar. A parcela 06 apresentou o menor índice FD (0,76) e a menor distancia da paisagem perturbada (31,50m). A textura, a estrutura e teor de matéria orgânica do solo apresentaram uma amplitude entre as parcelas de 0,22; 0,55; 53,76 respectivamente.

A correlação cofenética foi de 0,8, indicando que as estruturas das matrizes de distância foram preservadas no dendrograma representado pela figura 02.



**Figura 2** Dendrograma Funcional entre espécies arbóreas e atributos funcionais das espécies encontradas no Parque Estadual Mata do Pau Ferro.

A análise de regressão múltipla inicial indicou que, pelo menos, cinco das variáveis ambientais, estariam influenciando o valor do índice de diversidade funcional ( $F=3.7823$ ;  $R^2=0.62$ ;  $p=0.009$ ). Após o teste de correlação permaneceram as seguintes variáveis ambientais (Altitude, Distância da Paisagem Perturbada, Estrutura do Solo, Textura do Solo e Teor de Matéria Orgânica) com os valores de acordo com a tabela 4.

**Tabela 5** Modelos da análise stepwise dos valores de diversidade funcional em função das variáveis ambientais. Diversidade funcional (FD), Abertura de dossel (AD), Fertilidade do Solo (FS), Altitude (AL), Inclinação do Terreno (IN), Distância da Paisagem Perturbada (DPP), Estrutura do Solo (ES), Textura do Solo (TS), Fósforo (P), Potássio (K), Sódio (Na), Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Capacidade de Troca de Cátions (CTC), Matéria Orgânica (MO).

<b>Modelos</b>	<b>AIC</b>
FD + AD + FS + AL + IN + DPP + ES + TS + P + K + Na + Al + Ca + CTC + MO	-35.64
FD + AD + AL + IN + DPP + ES + TS + P + K + Na + Al + Ca + CTC + MO	-36.83
FD + AD + AL + IN + DPP + ES + TS + P + K + Al + Ca + CTC + MO	-38.10
FD + AD + AL + DPP + ES + TS + P + K + Al + Ca + CTC + MO	-40.83
FD + AL + DPP + ES + TS + P + K + Al + Ca + CTC + MO	- 41.82
FD + AL + DPP + ES + TS + P + K + Ca + CTC + MO	- 42.51
FD + AL + DPP + ES + TS + P + K + CTC + MO	- 43.29
FD + AL + DPP + ES + TS + CTC + MO	- 43.49
FD + AL + DPP + ES + TS + MO	- 43.70

O melhor modelo (AIC= - 43.7) (Tabela 5), testado na regressão múltipla final, indicou que a diversidade funcional variou significativamente em função da altitude, da distância da área perturbada, da estrutura e textura do solo e no teor de matéria orgânica, sugerindo que estas variáveis ambientais poderiam estar direcionando os valores de diversidade funcional na área estudada ( $F= 9.44$ ;  $R^2= 0.674$ ;  $p<0,001$ ) (Tabela 6).

**Tabela 6** Coeficientes parciais de determinação da regressão múltipla final entre o índice de diversidade funcional (FD) e as variáveis ambientais selecionadas no melhor modelo de acordo com AIC. F-statistic: 9.44,  $R^2$ : 0.674,  $p<0.001$

Variáveis ambientais	FD	
	<i>t</i>	<i>p</i>
Altitude	6.943	<0.001
Estrutura do solo	4.712	<0.001
Distância da paisagem perturbada	4.152	<0.001
Textura do solo	5.104	<0.001
Matéria orgânica (MO)	- 4.079	<0.001

Os coeficientes para altitude, estrutura e textura foram significativamente diferentes de zero, elevando-se, das áreas mais baixas para as áreas mais elevadas, para os solos variando

de argiloso a humoso. O coeficiente para matéria orgânica foi significativamente diferente de zero, reduzindo das áreas com maior para menor teor de matéria orgânica. O coeficiente parcial da distância das parcelas para a paisagem perturbada indicou que a diversidade funcional tende a aumentar das áreas perturbadas para o interior do fragmento.

Com uma variação altitudinal de 140m na área, os resultados sugerem um aumento na diversidade funcional de plantas das áreas da menor para maior altitude, provavelmente associado à formação de microclimas no transcurso do gradiente dessa área. Nas áreas mais altas, há condições microclimáticas que favorecem a presença de uma floresta úmida e conforme reduz a altitude, essas condições tornam-se mais propícias a uma vegetação de floresta semidecidual seca, na qual há uma maior ocorrência de espécies com atributos funcionais semelhantes, adaptados àquelas condições ambientais. O agrupamento de determinados atributos funcionais, como folhas perenes nas áreas mais elevadas, ocorre, provavelmente, pela predominância de espécies e indivíduos das famílias Anacardiaceae, Erythroxylaceae e Moraceae, as quais são abundantes em florestas úmidas (OLIVEIRA et al., 2006). A diversidade funcional local, medida a partir de atributos funcionais associados à morfofisiologia e ecologia das plantas, sugere um direcionamento por variáveis ambientais associadas à altitude, composição e características do solo.

A altitude tem sido registrada como uma variável ambiental capaz de selecionar espécies e caracterizar tipos vegetacionais, tanto a nível regional, quanto local (ZHANG et al., 2017), determinando padrões de variação da diversidade, especialmente, ao longo de gradientes de altitude em relevo de montanhas (PAVOINE & BONSALL 2011; PERRONNE et al., 2014). Para Zhang et al., (2017), comunidades florestais diferem em composição, diversidade, estrutura, função e ambiente das espécies de acordo com a altitude da área, já que elevações divergentes apresentam diferentes condições ambientais.

Variações nos componentes químicos e físicos do solo são capazes de afetar padrões de diversidade nas comunidades de plantas e essas variáveis podem estar associadas (OLIVEIRA-FILHO & FONTES 2000).

A estrutura e a textura do solo influenciaram positivamente a diversidade funcional, provavelmente devido à presença de uma faixa contínua de solo com diferentes estruturações, o que podem levar a englobar espécies com atributos funcionais diversos. Essa variabilidade na estrutura e textura do solo auxilia na seleção de espécies capazes de crescer em condições diversas, favorecendo assim a elevação da diversidade funcional. De acordo com Borges et. al (1997) a textura e a estrutura do solo são fatores que podem favorecer o estabelecimento da maioria das espécies em uma comunidade arbórea.

Altas concentrações de matéria orgânica no solo favorecem a bioatividade. Na área estudada, a relação negativa da matéria orgânica com a diversidade funcional pode estar associada a características peculiares das florestas úmidas onde o acúmulo da matéria orgânica proporcionado pela enorme quantidade de serrapilheira favorece apenas espécies funcionalmente similares. Faixas de solo com altas concentrações de matéria orgânica podem favorecer espécies com atributos funcionalmente similares como altura máxima, densidade básica da madeira e conteúdo de matéria seca foliar, fazendo com que a diversidade funcional diminua (SILVA et al., 2013).

A coexistência de espécies é ampliada pela complementaridade funcional, quanto mais distinto os atributos das espécies, maior a diversidade (PETCHEY 2004). Se faz necessário levar em consideração que impactos humanos influenciam a riqueza e a composição de comunidades (LOPES et al., 2012). A influência da perturbação antrópica sobre a diversidade funcional mostra que as comunidades se reorganizam mantendo maior concentração de atributos relacionados à tolerância às novas condições ambientais, registrando diferenças significativas de atributos entre as unidades amostrais de fragmentos e interiores de floresta, ocorrendo à redução da diversidade funcional nos fragmentos.

Foi observado que, na floresta de Brejo de Altitude estudada, variações na altitude e nos fatores associados aos componentes do solo como estrutura, textura, matéria orgânica e distância da paisagem perturbada, atuaram como filtros ambientais, influenciando a diversidade funcional nessa comunidade de floresta úmida.

#### **4.5 CONCLUSÕES**

Foi possível concluir que na floresta úmida estudada, as variáveis ambientais locais como Altitude, estrutura do solo, textura do solo e distância da paisagem perturbada atuaram como filtros abióticos, influenciaram positivamente a diversidade funcional de plantas nessa comunidade. O teor de matéria orgânica do solo foi a única variável estudada que atuou como filtro ambiental e influenciou negativamente a diversidade funcional na área estudada.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE-LIMA, D. Present-day forest refuges in Northeastern Brazil. Pp. 245-251, in: Prance, G.T. (Ed.). *Biological diversification in the tropics*. Columbia University Press, New York. 1982
- APG. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. **Botanical Journal of the Linnean Society**, V. 181, 1–20. 2016
- ASEFA, M; CAO, M.; ZHANG, G.; CI, X.; LI, J.; YANG, J. Environmental filtering structures tree functional traits combination and lineages across space in tropical tree assemblages. **Scientific Reports**. 2017
- ASSUNÇÃO, V. A.; SARTORI, A.; MANSANO, V. Floristic structuring of woody plants from the Chaco in light of abiotic factors, **Rodriguésia**, v. 73. 2022
- AUSTRHEIM, G. Plant diversity patterns in semi-natural grasslands along an elevational gradient in southern Norway. **Plant Ecology**, Volume 161, Issue 2, 193 -205. 2002
- BARBOSA, M. R. V.; AGRA, M. F.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CUNHA J. P.; ANDRADE, L. A. neste volume. **Diversidade florística na Mata do Pau-Ferro**, Areia, Paraíba, 2004.
- BOBBINK, R.; HORNUNG, M.; ROELOFS, J. G. M. The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation. **J. Ecol.** v. 86, 717–738. 1998
- BORGES, E. M.; LOMBARDI, NETO, F.; CORRÊA, G. F.; COSTA, L. M. Misturas de gesso e matéria orgânica alterando atributos físicos de um latossolo com compactação simulada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.125-130. 1997
- BUTTERFIELD, B. J.; MUNSON, S. M. Temperature is better than precipitation as a predictor of plant community assembly across a dry land region. **Journal of Vegetation Science**. 2016
- CORNELISSEN, J. H. C.; LAVOREL, S.; GARNIER, E.; DÍAZ, S.; BUCHMANN, N.; GURVICH, D. E.; REICH, P. B.; TERSTEEGE, H.; MORGAN, H. D.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; PAUSAS J. G.; POORTER, H. Handbook of Protocols for Standardised and Easy Measurement of Plant Functional Traits Worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 51, p. 335-380. 2003.

CORNWELL, W. K.; SCHWILK, D. W.; ACKERLY, D. D. A Trait-Based Test for Habitat Filtering: Convex Hull Volume. **Ecology**, V. 87, P. 1465-1471. 2006

DE BELLO, F.; PRICE, J. N.; MUNKMULLER, T.; LIIRA, J.; ZOBEL, M.; THUILLER, W.; GERHOLD, P.; GOTZENBERGUER, L.; LAVERGNE, S.; LEPS, J.; ZOEBEL, K.; PARTEL, M. Functional species pool framework to test for biotic effects on community assembly. **Ecology**, v. 93, 2263–2273, 2012.

DIAZ, S.; CABIDO, M. Vive La Différence: Plant Functional Diversity Matters to Ecosystem Processes. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 16: 646-655. 2001

DIAZ, S.; LAVOREL, S.; DE BELLO, F.; QUÉTIER, F.; GRIGULIS, K.; ROBSON, T. M. Incorporating Plant Functional Diversity Effects In Ecosystem Service Assessments. **Proceedings of the National Academy of Science**, v. 104, 20684-20689. 2007

DIAZ, S.; LAVOREL, S.; CHAPIN, F. S III.; TECCO, P. A.; GURVICH, D. E.; GRIGULIS, K. Functional Diversity – At the Cross roads between Ecosystem Functioning & Environmental Filters. In: Canadell, J. G.; Pataki, D.; Johnson, J. B.; Omland, K. S. Model Selection in Ecology & Evolution. **Trends Ecol.** v. 19, 101–108. 2004

EMBRAPA. Manual de métodos de análise do solo. Embrapa Solos, Rio de Janeiro. 2011

FRANKIE, G. W.; BAKER H. G.; OPLER P. A. Comparative Phenological Studies of Trees in Tropical Wet & Dry Forests in the Low lands of Costa Rica. **Journal of Ecology**, v. 62, 881-913. 1974

FRESCHET, G. T.; DIAS, A. T. C.; ACKERLY, D. D.; AERTS, R.; VAN BODEGOM, P. M.; CORNWELL, W. K.; ET AL., Global to community scale differences in the prevalence of convergent over divergent leaf trait distributions in plant assemblages. **Global Ecology and Biogeography**, vol. 5, 755 -765. 2011

FRIDLEY, J. D.; GRIME, J. P.; ASKEW, A. P.; MOSER, B.; STEVENS, C. J. Soil heterogeneity buffers community response to climate change in species –rich grassland. **Global Change Biogeography**, vol. 17, 2002 -2011. 2011

GARCIA, L. C.; CIANCIARUSO, M.V.; RIBEIRO, D. B.; DOS SANTOS, F. A. M.; RODRIGUES R. R. Flower functional trait responses to restoration time. **Applied Vegetation Science** vol. 18, 402–412. 2015

GILLIAM, F. S. Response of the herbaceous layer of forest ecosystems to excess nitrogen e position. **J. Ecol.** v. 94, 1176–1191. 2006

GIRÃO, L. C.; LOPES A. V.; TABARELLI, M.; BRUNA, E. M. Changes in tree reproductive traits reduce functional diversity in a fragmented Atlantic forest landscape. **PloSOne** vol. 2. 1–12. 2007

JOHNSON, J.; OMLAND, K. Model selection in ecology and evolution. **Trends Ecology & Evolution.** vol. 19: 101–108. 2004

JONGMAN, R. H. G.; TERBRAAK, C. J. F.; VAN TONGEREN, O. F. R. **Data Analysis in Community & Landscape Ecology.** Cambridge University Press, Cambridge. 1995

KAZAKOU, E.; FRIED, G.; RICHARTE, J.; GIMENEZ, O.; VIOLLE, C.; METAY, A. A. plant trait-based response-and-effect framework to assess vineyard inter-row soil management. **Botany Letters.** Vol. 163, p. 373-388, 2016

KLEIJN, D.; BEKKER, R. M.; BOBBINK, R.; DE GRAAF, M. C. C.; ROELOFS, J. G. M. Search for key biogeochemical factors affecting plant species persistence in heath land and acidic grasslands: a comparison of common and rare species. **J. Appl. Ecol.** v. 45, p. 680–687. 2008

KRAFT, N. J. B.; VALENCIA, R.; ACKERLY, D. D. Functional Traits & Niche-Based Tree Community Assembly in an Amazonian Forest. **Science**, V. 322, P. 580-582. 2008

KRAFT, N. J. B. ET AL., Community assembly, coexistence, and the environmental filtering metaphor. **Functional Ecology**, v. 29, p. 592–599. 2015

KEDDY, P. A. Assembly and response rules: two goals for predictive community ecology. **Journal of Vegetation Science**, v. 3, n. 2, p. 157–164. 1992

LAVOREL, S.; MCINTYRE, S.; LANDSBERG, J.; FORBES, T. D. A. Plant Functional Classifications: From General Groups to Specific Groups Based on Response to Disturbance. **Trends in Ecology & Evolution**, V. 12, N. 12, P. 474-478. 1997

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. Numerical Ecology. Elsevier, Amsterdam. 1998

LIANCOURT, P.; SPENCE, L. A.; SONG, D. S.; LKHAGVA, A.; SHARKHUU, A.; BOLDGIV, B.; HELLIKER, B. R.; PETRAITIS, P. S.; CASPER, B. B. **Plant response to climate change** varies with topography, interactions with neighbors, and ecotype. **Ecology**, v. 94, p. 444-453. 2013

LOPES, A. V.; GIRÃO, L. C.; SANTOS, B. A.; PERES, C. A.; TABARELLI M. Long-term erosion of tree reproductive trait diversity in edge-dominated Atlantic forest fragments. **Biological Conservation** v. 142: 1154–1165. 2009

LOPES, S. F.; SCHIAVINI, I. S.; VALE, V.; PRADO, J. A.; ARANTES, C. S. Historical review of studies in seasonal semideciduous forests in Brazil: a perspective for conservation **Braz. Geogr. J. Geosci. Humanit. Res. Medium** Volume 2, Pages 21-40. 2012

LOREAU, M. Biodiversity and ecosystem functioning: recent theoretical advances. **Oikos**. Vol. 91, p. 3-17, 2000

MATERECHERA, S. A; MLOZA-BANDA, H. R. Soil penetration resistance, root growth and yield of maize as influenced by tillage system on ridges in Malawi. **Soil and Tillage Research**, v.41, p.13-24. 1997

MAYFIELD, M. M ET AL., What does species richness tell us about functional trait diversity? Predictions and evidence for responses of species and functional trait diversity to land-use change. **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, n. 4, p. 423–431. 2010

MAYO, S. J.; FEVEREIRO, V. P. B. Mata do Pau-Ferro: A Pilot Study of the Brejo Forest. Royal Botanic Gardens, Kew, London. 1982

MENEGOTTO, A.; DAMBROS, S.; NETTO, S. A. The scale-dependent effect of environmental filters on species turnover and nestedness in an estuarine benthic community. **Ecology** v. 100, 1–9. 2019.

MORALES, M.; OAKLEY, L.; SARTORI, A. L. B.; MOGNI, V. Y.; ATAHUACHI, M.; VANNI, R. O.; FORTUNATO R. Diversity and conservation of legumes in the Gran Chaco and biogeographical inferences. **PLoS One** v. 14. 2019

MOREIRA, E. R. Mesorregiões e Microrregiões da Paraíba: Delimitação e Caracterização. Governo da Paraíba, João Pessoa. 1989

MORELLATO, L. P. C.; RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. F.; JOLY, C. A. Estudo Comparativo Da Fenologia de Espécies Arbóreas de Floresta de Altitude e Floresta Mesófila Semi-Decídua na Serra do Japí, Jundiá, São Paulo. **Revista Brasileira de Botânica** v. 12, 85-98. 1989

MORELLATO, L. P. C.; TALORA, D. C.; TAKAHASI, A.; BENCKE, C. S. C.; ROMERA, E. C.; ZIPPARRO, V. Phenology of Atlantic Rain Forest Trees: A Comparative Study. **Biotropica** v. 32, 811-823. 2000

MOUCHET, M. A.; VILLÉGER, S.; MASON, N. W. H.; MOUILLOT, D. Functional diversity measures: An overview of their redundancy and their ability to discriminate community assembly rules. **Functional Ecology** v. 24, 867–876. 2010

OKSANEN, J.; BLANCHETT, F. G.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; MINCHIN, P. R.; O'HARA, R. B.; SIMPSON, G. L.; SOLYMOS, P.; STEVEN, M. H. M.; WAGNER, H. Vegan: Community Ecology Package. R Package 2.0.3 Downloaded from [Http://Cran.R-Project.Org/Package=Vegan](http://Cran.R-Project.Org/Package=Vegan). 2012

OLIVEIRA FILHO, A. T.; FONTES, M. A. L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the influence of climate. **Biotropica** v. 32, 793-810. 2000

OLIVEIRA FILHO, A. T.; BUDKE, J. C.; JARENKOW, J. A.; EISENLOHR, P. V.; NEVES, D. R. M. Delving into the variations in tree species composition and richness across South American subtropical Atlantic and Pampean forests. **Journal of Plant Ecology**. v. 8, p. 242–260, 2013

OLIVEIRA, F. X.; ANDRADE, L. A.; FELIX, L. P. Comparações florísticas e estruturais entre comunidades de Floresta Ombrófila Aberta com diferentes idades, no Município de Areia, PB, Brasil. **Acta Bot. Bras.** [online]. vol.20, n.4, p. 861-873. 2006

PAUSAS, J. G.; VERDÚ, M. Fire Reduces Morphospace Occupation in Plant Communities. **Ecology**, v. 89, 2181-2186. 2008

PEARSON, E.; ORTEGA, K.; EREN, Ö.; HIERRO, L. Community assembly theory as a framework for biological invasions. **Trends Ecol.** vol. 33, 313–325. 2018.

PETCHEY, O. L.; GASTON, K. J. Functional Diversity (FD), Species Richness & Community Composition. **Ecology Letters**, V. 5, P. 402-411. 2002

PETCHEY, O. L.; HECTOR, A.; GASTON, K. J. How Do Different Measures Of Functional Diversity Perform? **Ecology**, V. 85, N. 3, P. 847-857. 2004

PETCHEY, O. L.; GASTON, K. J. Functional Diversity: Back to Basics & Looking Forward. **Ecol. Lett.** V. 9(6), p. 741-758. 2006

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language & environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2012

SHEATHER, S. A. **Modern Approach to Regression With R**. Springer Science & Business Media. 2009

SIEFERT, A. Incorporating intraspecific variation in tests of trait-based community assembly. **Oecologia** v. 170, p. 767–775. 2012

SILVA, D. M.; BATALHA, M. A.; CIANCIARUSO, M. V. Influence of fire history and soil properties on plant species richness and functional diversity in a neotropical savanna. **Acta Bot. Bras. [online]**, vol.27, n.3, p. 490-497. 2013

SHURIN, J. B.; SRIVASTAVA, D. New perspectives on local and regional diversity: Beyond saturation. **Metacommunities: Spatial Dynamics and Ecological Communities**. 399-417. 2005

SUDING, K. N.; COLLINS, S. L.; GOUGH, L.; ET AL. Functional- and abundance-based mechanisms explain diversity loss due to N fertilization. **Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.** 102, 4387–4392. 2005

SUTTON, L.; IKEN, K.; BLUHM, A.; MUETER, J. Comparison of functional diversity of two Alaskan Arctic shelf epibenthic communities. **Mar. Ecol. Prog. Ser.** V. 651, p. 1–21 2020.

TABARELLI, M. ET AL., Prospects for Biodiversity Conservation in the Atlantic Forest: Lessons from Aging Human-Modified Landscapes. **Biological Conservation**. V. 143, p. 2328-2340, 2010

TABARELLI, M. Integridade e Ameaças aos Brejos da Paraíba e Pernambuco. In: Tabarelli, M. (Ed.) Plano de Conservação dos Brejos de Paraíba e Pernambuco. Relatório Técnico Do Subprojeto Recuperação e Manejo dos Ecossistemas Naturais de Brejos de Altitude de Pernambuco e Paraíba. Projeto Probio, Ministério Do Meio Ambiente. Recife. p. 82-91. 2001

TILMAN, D. Functional Diversity. **Encyclopedia of Biodiversity**. V. 3, p.109-120, 2001.

WEIHER, E.; CLARKE, P.; KEDDY, P. A. Community assembly rules, morphological dispersion, of plant species the coexistence. **Oikos**, v. 81, n. 2, p. 309–322. 1998

WILLIG, M. R.; KAUFMAN, D. M.; STEVENS, R. D. Latitudinal gradients of biodiversity: pattern, process, scale, and synthesis. / **Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.** v. 34, 273-309. 2003

WRIGHT, J. P.; NAEEM, S.; HECTOR, A.; LEHMAN, C.; REICH, P. B.; SCHMID, B.; ET AL., Conventional functional classifications schemes underestimate the relationship with ecosystem functioning. **Ecology Letters**. V. 9: 111–120. 2006

WRIGHT, I. J.; REICH, P. B.; WESTOBY, M.; ACKERLY, D. D.; BARUCH, Z.; BONGERS, F. ET AL., The worldwide leaf economics spectrum. **Nature**, v. 428, 821 –827. 2004

ZHANG, J. T.; BAI, X.; SHAO, D. Functional Diversity And Its Attribute Factors In The Yunmeng Mountain National Forest Park In Beijing, China. **CERNE**, v. 23, p.75-84. 2017

ZOU, C. B; ET AL., Effects of soil air-filled porosity, soil matric potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. **Plant and Soil** v. 236(1), 105-115. 2001

## 5 ARTIGO III - CORRELACIONANDO A DIVERSIDADE FUNCIONAL DE PLANTAS DE UMA FLORESTA OMBRÓFILA ABERTA COM A REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DO DOSSEL

### 5.1 RESUMO

A diversidade funcional de plantas (FD) é um componente da biodiversidade que caracteriza a variabilidade de atributos dentro de uma comunidade, paisagem, ou mesmo grandes escalas espaciais, influenciando os processos e a estabilidade dos ecossistemas. Portanto, é importante entender como e por que o FD varia dentro dos ecossistemas, ao longo dos gradientes de disponibilidade de recursos. Normalmente, a FD é avaliada por meio de medições de trabalho de campo intensivo, enquanto a avaliação da FD por sensores remotos orbitais pode fornecer uma maneira de monitorar as alterações da FD de uma forma otimizada e eficiente. O potencial de satélites operacionais para inferir a FD, no entanto, continua a ser desvendado. Foi estudado as relações entre FD e medições de reflectância espectral feitas pelo Satélite Sentinel-2. Foram coletados de 2018 a 2020 em 30 parcelas de um ecossistema de Brejo de Altitude atributos vegetativos de folhas amostradas *in situ*. Foi calculado a diversidade funcional usando características foliares de plantas que possuem significado ecológico conhecido: área foliar específica (SLA), teor de matéria seca foliar (LDMC), tamanho da folha (LS), divisão do limbo foliar (LBD) e Deciduidade (DEC). Além disso, incluímos três características da planta inteira: altura da árvore (H), Área Basal (BA) e densidade básica da madeira (WD). Foi aplicado a correlação de Pearson usando a reflectância de superfície Sentinel-2 medida em 2018 a 2020 como variáveis preditivas para modelar medidas de FD *in situ*. Este estudo demonstrou um grande potencial de integração entre dados de satélite e a variação espacial em FD na faixa B12 ( $r = -0,396$ ) do sentinel-2. A novidade deste estudo é a integração efetiva de medições de reflectância espectral com a diversidade funcional. Portanto, representa um passo importante para alcançar esquemas rápidos de monitoramento da biodiversidade.

**Palavras-chave:** diversidade funcional; mata atlântica; sensoriamento remoto.

## 5.2 INTRODUÇÃO

A diversidade funcional (FD) é conceituada como a diversidade de atributos das plantas dentro de uma comunidade que são funcionalmente relevantes para o desenvolvimento dos ecossistemas (TILMAN, 2001; PETCHEY & GASTON, 2006). Estudos demonstram que a FD representa fortemente o funcionamento e a estabilidade dos ecossistemas (TILMAN et al., 1997; DÍAZ & CABIDO, 2001; RUIZ-BENITO et al., 2014), e também regulam vários serviços ecossistêmicos como, biomassa e manutenção da fertilidade do solo, serviços esses que sustentam o bem-estar humano (DÍAZ et al., 2007).

Dada a relevância da FD para o funcionamento do ecossistema, é fundamental entender sua variação no espaço. A FD pode variar de acordo com os fatores abióticos, incluindo aspectos climáticos e altitude (DE BELLO et al., 2006; LAMANNA et al., 2014) e também topografia e tipos de solo (SCHNEIDER et al., 2017), tornando difícil a interpretação sem a devida referência espacial na variação da FD.

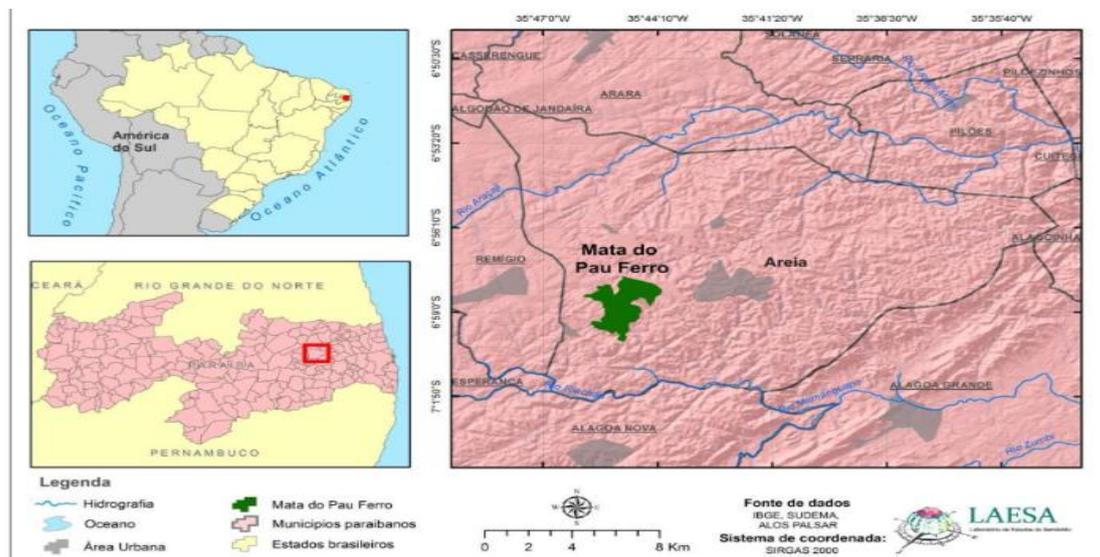
Apesar do progresso recente, várias lacunas de conhecimento no mapeamento do padrão da DF permanecem. Havendo necessidade de explorar outros métodos e ferramentas para preenchê-las. Por exemplo, estudos de modelagem baseados em dados climáticos e edáficos podem fornecer previsões da FD, no entanto, a precisão e a resolução dos mapas modelados são limitadas por grandes incertezas na meteorologia, nos dados de solo interpolados por medições pontuais (HARRIS et al., 2014; WU et al., 2017; BATJES, 2016) e no conhecimento sobre as relações entre clima, solo e FD (BRUELHEIDE et al., 2018).

Instrumentos multiespectrais orbitais podem produzir mapas de alta resolução da variação espacial de FD ao longo grandes escalas espaciais, mas necessitam ser estudados com mais detalhes (WANG et al., 2018). Os dados de sensoriamento remoto são espacialmente contínuos, mas suas resoluções são muitas vezes ineficazes para uma escala fina como características edáficas e vegetacionais. Assim, as abordagens atuais se concentram tanto no mapeamento de alta resolução para diversidade funcional em uma pequena extensão espacial (XUANLONG et al., 2019). Aqui, propomos que as recentes pesquisas em sensoriamento remoto espacial multiespectral podem contribuir para mensuração da DF em escalas locais e regionais. Essas medições por satélite podem facilitar muito o sensoriamento remoto da Diversidade Funcional de Plantas.

O objetivo foi realizar um estudo para verificar se existe correlação entre a refletância espectral, medições feitas pelo satélite Sentinel-2, com a FD a partir de medições *in-situ* em redes de parcelas que abrangem gradientes de diversidade de espécies arbóreas em uma Floresta Ombrófila Aberta Montana.

### 5.3 MATERIAL E METÓDOS

A área de estudo (Figura 03) e a coleta de amostras e dados desta pesquisa já foram descritos no capítulo I, item **Materiais e Métodos**. Os métodos para a medição dos atributos funcionais e os cálculos da diversidade funcional já foram descritos no capítulo II, item **Calculando a Diversidade Funcional**.



**Figura 3** Localização do Parque Estadual Mata do Pau Ferro no município de Areia Paraíba, Nordeste, Brasil

#### 5.3.1 Dados espectrais

O sensor escolhido foi o MSI do satélite Sentinel-2 com uma resolução espacial de 10m na região do visível e infravermelho próximo (B2, B3, B4 e B8), 20m nas bandas RedEdge (faixa espectral estreita entre o vermelho visível e o infravermelho próximo – B5, B6, B7, B8A) e infravermelho médio (B11 e B12) e 60m nas regiões de aerossol, vapor de água e cirrus (B1, B9 e B10). Esse sensor foi escolhido por apresentar a melhor resolução espacial disponível gratuitamente com cobertura sobre a área de estudo.

Os valores de refletância e de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) dos pontos de coordenadas das parcelas foram extraídos usando a plataforma do Google Earth Engine colocando no script um filtro de nuvens inferior a 40% e intervalo de tempo entre

2016-06-01 e 2020-06-01. O valor considerado foi a média dos valores nesse intervalo (GORELICK et al., 2017).

### 5.3.2 Análises estatísticas

Foi utilizado o ambiente computacional R (version 3.2.1; R Foundation for Statistical Computing, <http://www.R-project.org>) para correlacionar através do coeficiente de correlação de Pearson os dados de FD com os dados obtidos de NDVI das faixas da região do visível e infravermelho próximo (B2, B3, B4e B8), 20m nas bandas RedEdge (faixa espectral estreita entre o vermelho visível e o infravermelho próximo – B5, B6, B7, B8A) e infravermelho médio (B11 E B12) e 60m nas regiões de aerossol, vapor de água e cirrus (B1, B9 e B10) do Sentinel-2.

## 5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A diversidade funcional é um importante instrumento que indica como as espécies estão distribuídas, ou seja, é a medida de biodiversidade ecologicamente mais relevante (MAGIOLI et al., 2021).

Na área estudada foram mensurados os índices de diversidade funcional (FD) de 30 parcelas e estes índices variaram entre os valores: 3,00 (parcela 28) a 12,26 (parcela 04) conforme demonstrados na tabela 7. Em relação à distância da borda: as parcelas que se mostraram mais biodiversas funcionalmente foram as que estavam localizadas a mais de 50m da borda, entre elas a parcela 04 (FD 12,26) e a parcela 01 (FD 11,38). As parcelas que apresentaram os menores índices de diversidade funcional foram as parcelas 28 (FD 3,00) 19 (FD 3,12) e 23 (FD 3,18) respectivamente. Fatores como perturbação antrópica, composição do solo, inclinação do terreno e altitude influenciam as espécies e interferem na variação da diversidade funcional.

**Tabela 7** Valores do índice de diversidade funcional (FD) utilizando atributos contínuos e valores das faixas de reflectâncias da faixa B12 e do NDVI do Sentinel-2.

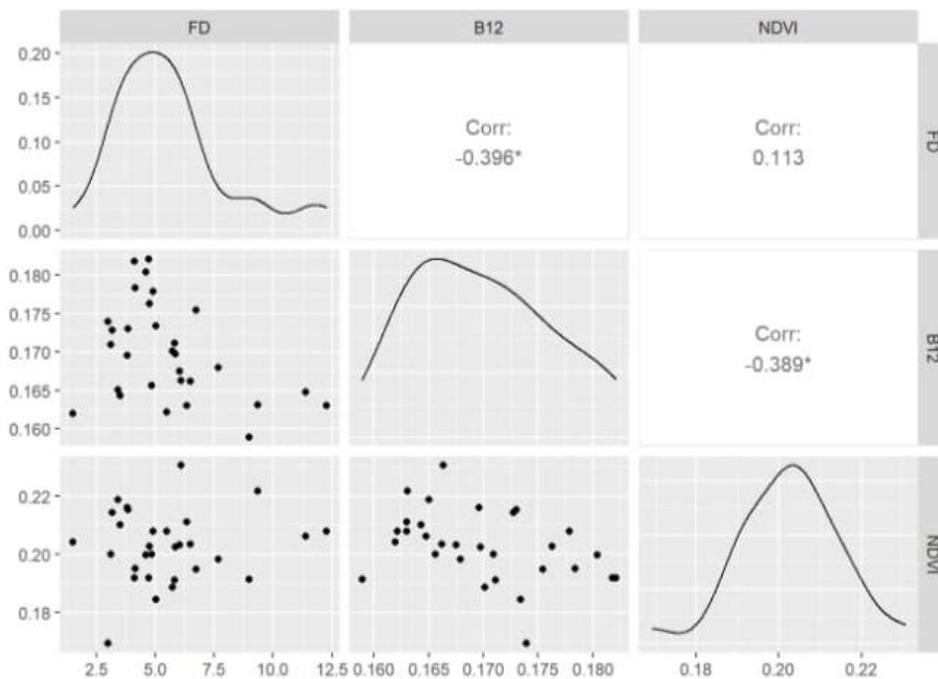
PARCELA	FD	B12	NDVI
01	11,38	0,16	0,22
02	05,86	0,17	0,24
03	04,86	0,17	0,23

<b>04</b>	12,26	0,16	0,22
<b>05</b>	06,33	0,16	0,21
<b>06</b>	01,50	0,16	0,20
<b>07</b>	05,81	0,17	0,25
<b>08</b>	07,67	0,17	0,21
<b>09</b>	04,14	0,18	0,22
<b>10</b>	03,50	0,16	0,22
<b>11</b>	06,04	0,17	0,24
<b>12</b>	05,73	0,17	0,23
<b>13</b>	04,91	0,18	0,23
<b>14</b>	03,86	0,17	0,21
<b>15</b>	04,76	0,18	0,27
<b>16</b>	04,59	0,18	0,24
<b>17</b>	04,13	0,18	0,22
<b>18</b>	06,10	0,17	0,25
<b>19</b>	03,12	0,17	0,24
<b>20</b>	03,42	0,17	0,21
<b>21</b>	06,49	0,17	0,24
<b>22</b>	05,02	0,17	0,23
<b>23</b>	03,18	0,17	0,24
<b>24</b>	04,73	0,18	0,22
<b>25</b>	09,34	0,16	0,26
<b>26</b>	06,73	0,18	0,23
<b>27</b>	03,82	0,17	0,21
<b>28</b>	03,00	0,17	0,22
<b>29</b>	05,48	0,16	0,20
<b>30</b>	09,00	0,16	0,21

---

O impasse sobre o uso de medições de sensoriamento remoto para estimar a FD de plantas é que as limitações de recursos podem afetar as características das plantas (atributos vegetativos) e estas, por sua vez, podem afetar a reflectância espectral medida por sensoriamento remoto óptico (WANG et al., 2018).

Este estudo demonstrou um moderado potencial de integração entre dados de satélite e a variação espacial nos índices de diversidade funcional na faixa de reflectância B12 ( $r = -0,396$ ) do sentinel-2 (Figura 04), essas faixas do espectro são sensíveis ao conteúdo hídrico, quanto maior a reflectâncias nessas bandas, menor o conteúdo hídrico, o que facilita a identificação de variações de coberturas vegetacionais.



**Figura 4** Correlação entre o índice de diversidade funcional e as faixas de reflectância B12 e NDVI do Sentinel-2.

Outros estudos recentes que tentaram mapear atributos funcionais individuais usando sensoriamento remoto, com abordagem estatística ou modelagem de transferência radiativa, também mostrou sucesso no mapeamento da massa foliar por área (MOHAMMED ALI et al., 2017; SINGH et al., 2015), concentração de nitrogênio foliar (ASNER et al., 2015; KNYAZIKHIN et al., 2013) e teor de clorofila (INOUE et al., 2016; GITELSON & MERZLYAK, 1997). Esses estudos proporcionaram importantes avanços metodológicos no

mapeamento da FD e seus resultados fornecem uma base eficiente para investigar as relações de funcionamento de ecossistemas ao longo de gradientes ambientais.

Em comparação com o mapeamento da FD usando medições de sensoriamento remoto aéreo (SCHNEIDER et al., 2017; ASNER et al., 2017), nossa abordagem pode ser aplicada a outras extensões geográficas, o que oferece possibilidades importantes para estudos futuros.

Podem-se aplicar nossos dados para mapear a FD ao longo de um gradiente ambiental e depois investigar como a FD varia ao longo da cobertura vegetal. Embora seja reconhecida a capacidade de nossos dados para resolver dinâmicas temporais em DF ainda precisa ser validada. Estudos futuros poderiam determinar a variação sazonal e interanual da DF, permitindo estudar como FD responde, por exemplo, ao uso da terra.

A vegetação pode também afetar a reflectância espectral do Sentinel-2 (ASNER 1998; XIAO et al., 2014), especialmente na região NIR, pois a radiação NIR pode penetrar mais profundo no dossel da floresta e, portanto, fornecer informações sobre perfil de folhagem dentro de um dossel. Isso, por sua vez, está relacionado a propriedades estruturais e arquitetônicas do dossel, como altura do dossel e ângulo da folha (COLWELL 1974; HUETE 2004).

As medições de reflectância do dossel integram várias características da planta, incluindo traços de folha, arquitetura do dossel e estrutura da vegetação (USTIN & GAMON 2010), e, portanto, a FD derivada de características combinadas de folhas e plantas inteiras podem potencialmente ser melhor relacionadas com a variabilidade espectral do que usando qualquer característica individual sozinha. A abordagem que pode integrar efetivamente medições de sensoriamento remoto de várias fontes precisa ser explorada no futuro no contexto de monitoramento da Diversidade Funcional.

## **5.5 CONCLUSÕES**

Um passo importante para monitorar a variação nos índices de diversidade funcional de plantas é identificar e mapear sua localização. Nesse sentido a classificação das imagens MSI Sentinel-2 mostrou-se eficaz, especialmente quanto todo pacote de bandas é considerado. Com os resultados pode-se aprimorar o processo de manejo das unidades de conservação.

Neste sentido, este estudo demonstrou um moderado potencial de integração entre dados de satélite multiespectrais e a variação espacial para o índice de diversidade funcional de plantas arbóreas, incentivando a estudos mais aprofundados sobre essa relação. A

integração efetiva de medições de reflectância espectral com a diversidade funcional é de extrema importância para alcançar projeções rápidas de monitoramento da biodiversidade de plantas arbóreas em florestas úmidas evitando assim monitoramento in situ de forma exaustiva.

Considerando a banda B12 banda adquirida com resolução espacial de 20 metros de resolução espacial (borda vermelha e SWIR) apresentaram resultados mais fidedignos com a verdade de campo. O bom desempenho deste produto foi devido à maior variabilidade espectral, onde se destacaram as bandas localizadas na região da RedEdge, no qual tiveram alta contribuição na discriminação dos índices de diversidade funcional. Por outro lado, a classificação a partir das imagens Sentinel-2 em outras faixas de reflectância não apresentaram resultados satisfatórios.

Novos estudos necessitam ser realizados para uma melhor análise de como as faixas do Sentinel-2 reflete de forma fidedigna a variação da diversidade funcional.

## REFERENCIAS

ANDERSON-TEIXEIRA, K.; DAVIES, S.; BENNETT, A.; GONZALEZ-AKRE, E.; MULLER-LANDAU, H.; WRIGHT, S.; ET AL., CTFS-Forest GEO: a worldwide network monitoring forests in an era of global change. **Glob. Chang. Biol.** p. 528-549. 2015

ASNER, G. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance **Remote Sensing of Environment**, v. 64 p. 234-253. 1998

ASNER, G.; MARTIN, R.; TUPAYACHI, R.; ANDERSON, C.; CARRANZA-JIMÉNEZ, L.; ET AL., Amazonian functional diversity from forest canopy chemical assembly. **Proc. Natl. Acad. Sci.** p. 5604-5609. 2014

ASNER, G.; MARTIN, R.; ANDERSON, C.; KNAPP, D. Quantifying Forest canopy traits: imaging spectroscopy versus field survey. **Remote Sensing of Environment**, p. 15-27. 2015

ASNER, G.; MARTIN, R.; KNAPP, D.; ANDERSON, C.; SINCA, F.; VAUGHN V.; ET AL. Airborne laser-guided imaging spectroscopy to map forest trait diversity and guide conservation. **Science**, p. 385-389. 2017

BARBOSA, M. R. V.; AGRA, M. F.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CUNHA J. P.; ANDRADE, L. A. neste volume. **Diversidade florística na Mata do Pau-Ferro**, Areia, Paraíba, 2004.

BATJES, N. H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. **Geoderma**, p. 61-68. 2016

CORNELISSEN J.H.C, LAVOREL S, GARNIER, DIAZ S, BUCHMANN N, GURVICH D.E, REICH P.B, TER STEEGE H, H.D. MORGAN H.D. **A handbook of protocols for standardized and easy measurement of plant functional traits worldwide**. Aust. J. Bot. pp. 335-380. 2003

COLWELL, J. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, pp. 175-183. 1974

DE BELLO, F.; LEPŠ, J.; SEBASTIÀ, M. Variations in species and functional plant diversity along climatic and grazing gradients. **Ecography**, p. 801-810. 2006

DÍAZ, S.; CABIDO, M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. **Trends Ecol. Evol.** p. 646-655. 2001

DÍAZ, S.; LAVOREL, S.; MCINTYRE, S.; FALCZUK, V.; CASANOVES, F.; MILCHUNAS, D.; ET AL. Plant trait responses to grazing - a global synthesis. **Glob. Chang. Biol.**, v. 13 (2), p. 313-341. 2007

DÍAZ, S.; LAVOREL, S.; DE BELLO, F.; QUÉTIER, F.; GRIGULIS, K.; ROBSON, T. Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessment Proc. **Natl. Acad. Sci.** p. 20684-20689. 2007

FISHER, R.; KOVEN, C.; ANDEREGG, W.; CHRISTOFFERSEN, B.; DIETZE, M.; FARRIOR, C.; ET AL. Vegetation demographics in earth system models: a review of progress and priorities. **Glob. Chang. Biol.** p. 35-54. 2018

GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. **Int. J. Remote Sens.** p. 2691-2697. 1997

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE R. Google Earth Engine: análise geoespacial em escala planetária para todos, **Sensoriamento Remoto do Ambiente**, v. 202, p 18-27. 2017

HARRIS, D. J.; JONES, P. D.; OSBORN, T. J.; LISTER, D. H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. **Int. J. Climatol.** p. 623-642. 2014

HUETE, A. Optical properties of earth surface materials. Artiola, J.; Pepper, I.; Brusseau, M.(Eds.). Environmental Monitoring and Characterization, Elsevier, Burlington, MA, USA. 2004

INOUE, Y.; GUÉRIF, M.; BARET, F.; SKIDMORE, A.; GITELSON, A.; SCHLERF, M.; OLIOSO, A. Simple and robust methods for remote sensing of canopy chlorophyll content: a comparative analysis of hyperspectral data for different types of vegetation. **Plant Cell Environ.** p. 2609-2623. 2016

JETZ, W. J.; CAVENDER-BARES, J. R.; PAVLICK, R. D.; SCHIMEL, D. F.; DAVIS, F. G.; ASNER, G.; ET AL., Monitoring plant functional diversity from space. **Nature Plants**, v.2, p. 16024. 2016

KNYAZIKHIN, Y.; SCHULL, M.; STENBERG, P.; MÖTTUS, M.; RAUTIAINEN, M.; YANG, Y.; ET AL. Hyperspectral remote sensing of foliar nitrogen content. **Proc. Natl. Acad. Sci.** p. E185-E192. 2013

LAMANNA, C.; BLONDER, B.; VIOLLE, C.; KRAFT, N.; SANDEL, B.; ŠÍMOVÁ I, ET AL. Functional traits pace and the latitudinal diversity gradient. **Proc. Natl. Acad. Sci.** p. 13745-13750. 2014

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. Numerical Ecology. Elsevier, Amsterdam. p.97. 1998

MAGIOLI, M.; FERRAZ, K. M. P.; CHIARELLO, A.G. ET AL. Land-use changes lead to functional loss of terrestrial mammals in a Neotropical rainforest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, p. 161-170. 2021

MOHAMMED ALI, A.; DARVISHZADEH, R.; SKIDMORE A. Retrieval of specific leaf area from Landsat-8 surface reflectance data using statistical and physical models **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, p. 3529-3536. 2017

MORELLATO, L. P. C.; TALORA, D. C.; TAKAHASI, A.; BENCKE, C. S. C.; ROMERA, E. C.; ZIPPARRO, V. Phenology of Atlantic Rain Forest Trees: A Comparative Study. **Biotropica**. v.32, p. 811-823. 2000

PETCHEY, O. L; GASTON, K. J. Functional diversity: back to basics and looking forward. **Ecol. Lett.**, v. 9 (6), p. 741-758. 2006

PETTORELLI, N.; WEGMANN, W.; SKIDMOREMÜCHER, S.; DAWSON, T.; FERNANDEZ, M.; LUCAS, M.; ET AL. Framing the concept of satellite remote sensing

essential biodiversity variables: challenges and future directions. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, v.2, pp. 122-131. 2016

PURSCHKE, O.; SCHMID, B.; SYKES, M.; POSCHLOD, P.; MICHALSKI, S.; DURKA, W.; ET AL., Contrasting changes in taxonomic, phylogenetic and functional diversity during a long-term succession: insights into assembly processes **J. Ecol.** p. 857-866. 2013

R CORE TEAM. R: A language and Environment for Statistical Computing R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2017

RUIZ-BENITO, P.; GÓMEZ-APARICIO, L.; PAQUETTE, A.; MESSIER, C.; KATTGE, J.; ZAVALA, M. Diversity increases carbon storage and tree productivity in Spanish forests. **Glob. Ecol. Biogeogr.** p. 311-322

SCHEITER, S.; LANGAN, L.; HIGGINS, S. Next generation dynamic global vegetation models: learning from community ecology. **New Phytol.** 957-969. 2013

SCHNEIDER, F.; MORSDORF, F.; SCHMID, B.; PETCHEY, O.; HUENI, A.; SCHIMEL, D.; ET AL. Mapping functional diversity from remote lysensed morphological and physiological forest traits. **Nat. Commun.** pp. 1-57. 2017

SCHOLES, R.; MACE, G.; TURNER, W.; GELLER, G.; JÜRGENS, N.; LARIGAUDERIE, A.; ET AL. Toward a global biodiversity observing system. **Science**, p. 1044-1045. 2008

SCHWEIGER, A.; CAVENDER-BARES, J.; TOWNSEND, P.; HOBBIE, S.; MADRITCH, M.; WANG, R.; ET AL. Plant spectral diversity integrates functional and phylogenetic components of biodiversity and predicts ecosystem function. **Nature Ecology & Evolution**, p. 976-982. 2018

SINGH, A.; SERBIN, S.; MCNEIL, B.; KINGDON, C.; TOWNSEND, P. Imaging spectroscopy algorithms for mapping canopy foliar chemical and morphological traits and their uncertainties. **Ecol. Appl.**, p. 2180-2197. 2015

TILMAN, D.; KNOPS, J.; WEDIN, D.; REICH, P.; RITCHIE, M.; SIEMANN, E. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. **Science**, p. 1300-1302. 1997

TILMAN, D. Functional diversity. *Encyclopedia of Biodiversity*, p. 109-120. 2001

TREJO, D.; BAROIS, I.; SANGABRIEL-CONDE, W. Disturbance and land use effect on functional diversity of the arbuscular mycorrhizal fungi. **Agrofor. Syst.**, p. 265-279. 2016

TURNER, W. Sensing biodiversity. **Science**, pp. 301-302. 2014

USTIN, S.; GAMON J. Remote sensing of plant functional types. **New Phytol.** p. 795-816. 2010.

WANG, R.; GAMON, J.; SCHWEIGER, A.; CAVENDER-BARES, J.; TOWNSEND, P.; ZYGIELBAUM, A.; ET AL. Influence of species richness, evenness, and composition on optical diversity: a simulation study. **Remote Sens. Environ.** p. 218-228. 2018

WU, Z.; AHLSTRÖM, A.; SMITH, B.; ARDÖ, J.; EKLUNDH, L.; FENSHOLT, R.; LEHSTEN, V. Climate data induced uncertainty in model-based estimations of terrestrial primary productivity. **Environ. Res. Lett.** 2017

XIAO, Y.; ZHAO, W.; ZHOU, D.; GONG, H. Sensitivity analysis of vegetation reflectance to biochemical and biophysical variables at leaf, canopy, and regional scales **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.** p. 4014-4024. 2014

## **6 CONCLUSÕES GERAIS**

Através desses estudos, foi possível mensurar a diversidade funcional e observar que, na floresta tropical úmida estudada (Parque Estadual Mata do Pau Ferro), as variáveis ambientais locais, altitude e aquelas associadas aos componentes do solo tais como estrutura, textura, matéria orgânica, atuaram como filtros abióticos, direcionando a diversidade funcional de plantas nessa comunidade. Podemos também entender como as variáveis ambientais podem atuar como filtros, influenciando a dinâmica da estruturação das assembleias de plantas é um grande passo para compreensão da ecologia dessas comunidades e que a variação dessa diversidade pode ser percebida por análises de sensoriamento remoto.