

QUAL O PAPEL DOS FATORES AMBIENTAIS E DE PAISAGEM NAS DIVERSIDADES TAXONÔMICA, FUNCIONAL E FILOGENÉTICA DE BRIÓFITAS NA FLORESTA ATLÂNTICA NORDESTINA?

Mércia Patrícia Pereira Silva^{1*}; Rafael de Paiva Farias²; Benoît Loeuille³; Milena Nunes Bernardes Goetz¹; Lucas Erickson Nascimento da Costa⁴

¹Universidade Federal de Pernambuco; ²Universidade Federal da Bahia; ³Royal Botanic Gardens Kew; ⁴Instituto Tecnológico Vale; *E-mail para contato: mercia.psilva@ufpe.br

INTRODUÇÃO

Os padrões atuais de diversidade de plantas têm sido atribuídos a duas forças principais: evolutivas (presença de sinal filogenético nos traços das espécies) e determinísticas, seja por filtros ambientais (fatores climáticos, geográficos e histórico de uso da terra) ou por competição entre espécies (VELLAK; VELLAK; INGERPUU, 2007), com efeitos dependentes da escala. Os filtros ambientais estruturam a diversidade predominantemente em escalas maiores, onde espécies com requerimentos ambientais semelhantes devem ocorrer em habitats similares e específicos (SOBRAL; CIANCIARUSO, 2012). Por outro lado, em escalas menores e em habitats mais homogêneos a importância da competição deve aumentar, tornando-a uma restrição predominante para a co-ocorrência de espécies com características ecológicas similares (e.g. história de vida e preferência por microhabitats específicos) e filogeneticamente relacionadas (WEBB *et al.*, 2002). Todavia, as alterações causadas por atividades humanas interagem com estas forças e devem ser consideradas importantes na montagem dos padrões de diversidade, particularmente de grupos bioindicadores, como as briófitas, sendo a fragmentação e a perda dos habitats originais responsáveis por redução na diversidade taxonômica (ALVARENGA; PÔRTO; SILVA, 2009) e funcional (SOUZA; SILVA; PÔRTO, 2020) destas plantas. Nesse contexto, o entendimento das causas da diversidade de briófitas é extremamente relevante para a Floresta Atlântica. Este Domínio tem uma das maiores biodiversidades do planeta, porém é um dos principais alvos da degradação ambiental advinda das atividades exploratórias humanas (TABARELLI *et al.*, 2005). Na porção Setentrional (Norte do Rio São Francisco, Floresta Atlântica Nordeste-FAN), a unidade biogeográfica mais fragmentada e com menos áreas integralmente protegidas da Floresta Atlântica (TABARELLI *et al.*, 2005), a diversidade de briófitas tem sido documentada para algumas localidades (SILVA; PÔRTO, 2015), mas ainda faltam estudos que explorem as relações entre a diversidade e as características ambientais e de paisagem em escala regional. Assim, foi objetivo deste trabalho analisar os padrões regionais de diversidade de briófitas na FAN em escala regional. Especificamente, avaliaram-se as relações entre a riqueza de espécies e os diferentes componentes da diversidade (i.e., taxonômico, funcional e filogenético), bem como o papel das condições ambientais e da estrutura da paisagem nos padrões observados.

METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido em 13 localidades da FAN (Tabela 1), para as quais foram compiladas a temperatura e a precipitação média anual (Worldclim2 na resolução de 1km²; FICK; HIJMANS, 2017), e a variação na elevação (máxima-mínima), mensurada em campo com um GPS. As métricas de paisagem (área da localidade, índice de proximidade e número de manchas) foram calculadas no FRAGSTAT v4.2.1 (MCGARIGAL, 2015) e QGIS v3.4, usando imagens do Mapbiomas (mapbiomas.org; coleção 5; resolução de 30m), reclassificadas em formação florestal e não florestal. Utilizou-se um buffer de 5km a partir do centroide dos limites das localidades. O levantamento florístico seguiu métodos de coleta do grupo estudado, com caminhadas exploratórias em todos os substratos favoráveis ao seu desenvolvimento, com duração média de dois dias em cada localidade. A partir do conjunto de espécies identificadas, foram elaboradas uma matriz funcional e uma árvore filogenética. Baseada em literatura especializada, a matriz funcional foi composta pelo sistema sexual (monoica, dioica ou ambos) e pelas guildas de tolerância à luminosidade (especialistas de sol, sombra e generalistas) que sintetizam diversas características das briófitas para tolerar o ambiente. A árvore filogenética foi elaborada a partir de sequências de ITS, trnLF e rbcL (GenBank; ncbi.nlm.nih.gov/genbank/) através de inferência Bayesiana conduzida com MrBayes v.3.2.7a (RONQUIST *et al.*, 2012). Os modelos de evolução molecular foram selecionados usando o critério de informação de Akaike (AIC), implementado em jModelTest v. 2 (DARRIBA *et al.*, 2012), sendo que o melhor modelo, para as três regiões, foi: GTR + G + I. Quatro execuções independentes simultâneas iniciadas a partir de árvores iniciais aleatórias foram executadas por 10 milhões de gerações, com amostragem da distribuição posterior de árvores a cada 1.000 gerações (total de 10.000 amostras). O índice de Rao foi utilizado para avaliar a diversidade ao longo das localidades porque permite o cálculo de diferentes facetas (taxonômica, funcional e filogenética), sem viés da riqueza de espécies (DE BELLO *et al.*, 2010). As relações entre a riqueza e as diversidades taxonômica (Rao), funcional (RaoF) e filogenética (RaoFi) foram analisadas a partir de uma rede de correlações utilizando o teste de Spearman. Os efeitos das condições ambientais e da estrutura da paisagem na riqueza e nas diversidades Rao, RaoF e RaoFi foram avaliados através de regressões múltiplas (forward stepwise).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A riqueza ao longo das localidades totalizou 196 espécies, variando entre 12 (PDU e APA) e 102 spp. (PTA) (Tabela 1). As famílias mais representativas foram Lejeuneaceae (63 spp.), Calymperaceae e Fissidentaceae (12 spp.), estando em conformidade com inventários nos Neotrópicos, onde Lejeuneaceae se destaca (GRADSTEIN; PÓCS, 1989). Ademais, observou-se uma expressiva contribuição de espécies, comparada ao país (12%) e ao Nordeste (26%) (sensu Flora e Funga do Brasil 2023). A riqueza foi positivamente relacionada com a diversidade taxonômica, funcional e filogenética, que também estiveram positivamente relacionadas entre si (Figura 1), corroborando o relatado em literatura para escala regional (MEYNARD *et al.*, 2011). A forte associação entre as diversidades funcional e filogenética indica um marcante sinal filogenético no componente funcional analisado (WEBB *et al.*, 2002), ou seja, os atributos funcionais que favorecem a adaptação das espécies às condições locais estão evolutivamente conservados (WEBB *et al.*, 2002; CAVENDER-BARES *et al.*, 2009). Os atributos funcionais analisados cobrem dois aspectos cruciais do ciclo de vida das

bríofitas. Os sistemas reprodutivos revelam a distribuição das espécies e sua relação com as condições ambientais. Como a reprodução sexuada das bríofitas é dependente da água, muitas espécies dioicas têm produção de esporófito limitada pelo declínio de populações de um dos sexos ou pela distância entre populações de sexo oposto. Assim, em ambientes com pouca disponibilidade hídrica, dioicas se valem de propágulos assexuados, que têm dispersão limitada, enquanto as monoicas, por terem mais reprodução sexuada, conseguem alcançar distâncias maiores (LONGTON, 2018). Por outro lado, as guildas de tolerância refletem a amplitude de nicho das espécies, tendo uma relação direta com a distribuição ao longo dos ambientes (SILVA; PÔRTO, 2015). Ainda, o componente filogenético foi mais integrativo do que o funcional, pois o RaoFi apresentou as correlações mais fortes dentre os índices de diversidade e uma alta correlação (> 50%) com a riqueza. As diversidades e a riqueza, embora positivamente correlacionados, foram influenciados por diferentes fatores. Enquanto a elevação favorece a riqueza e a diversidade funcional, o aumento da temperatura média anual está associado à redução na diversidade taxonômica e filogenética (Figura 2). De fato, a elevação e seus fatores associados (e.g., umidade, radiação solar) é apontada como um fator relevante para bríofitas em ambientes tropicais (ARAÚJO *et al.*, 2021), favorecendo o incremento da riqueza e de diversidade de estratégias funcionais quanto à reprodução e tolerância às condições ambientais. O aumento da temperatura foi associado tanto com a redução de diversidade de espécies, quanto de história evolutiva, via redução da diversidade filogenética. Esse resultado reforça o papel da temperatura como um dos maiores moduladores da biodiversidade, o que preocupa ainda mais sobre os impactos das mudanças climáticas sobre a distribuição de espécies e diversidade. Para a FAN, espera-se com as mudanças climáticas, um aumento da temperatura e redução da precipitação (SOUZA *et al.*, 2014; VALE *et al.*, 2021), o que ameaça a diversidade regional de bríofitas. Por outro lado, nenhuma das variáveis da paisagem explicou os padrões regionais de riqueza e diversidade. Embora estudos prévios tenham evidenciado efeitos negativos da fragmentação e perda de habitat sobre as bríofitas (JIANG *et al.*, 2018), os padrões regionais de riqueza e diversidade da FAN parecem ser mais fortemente influenciados por condições ambientais. Contudo, a importância das características da paisagem não deve ser subestimada visto que tem sido demonstrado que fatores como os efeitos de borda, relacionados com as métricas de paisagem, podem interagir com fatores abióticos causando efeitos deletérios na diversidade de bríofitas (ARAÚJO *et al.*, 2021).

Tabela 1. Localização, condições climáticas e riqueza de bríofitas das localidades de Floresta Atlântica Nordeste, Brasil. P = precipitação média anual; T = temperatura média anual.

Localidades	Localização (LongW;LatS)	Altitude (Min - Máx.)	P (mm)	T (°C)	Riqueza
Parque Estadual Dunas do Natal (PDU)	-35.1833;-5.8500	13 – 45	1237	25,6	12
RPPN Mata Bela (MBL)	-35.0659;-6.4092	13 – 51	1471	25,8	24
RPPN Mata Estrela (MET)	-35.0235;-6.3744	35 – 65	1524	26	20
APA Barra do Rio Mamanguape (APA)	-34.9091;-6.8536	25 – 55	1720	25,6	12
Jardim Botânico Benjamim Maranhão (JBB)	-34.8614;-7.1366	20 – 50	1936	25,3	21
REBIO Guaribas (GBA)	-35.1419;-6.7420	109 – 204	1271	25	39
Reserva Ecológica da Mata do Pau-Ferro (PFE)	-35.7445;-6.9836	400 – 600	1267	21,8	50
RPPN Gargaú (GGA)	-34.9563;-6.9913	22 – 80	1687	25,4	35
RPPN Pacatuba (PAC)	-35.1566;-7.0425	82 – 147	1221	25,1	45
Mata do Estado/ Serra dos Mascarenhas (MDE)	-35.5094;-7.6162	300 – 700	1005	22,6	97
REBIO Pedra Talhada (PTA)	-36.4304;-9.2591	560 – 990	1413	22,1	102
Parque Nacional de Itabaiana (ITA)	-37.3423;-10.7545	400 – 659	1303	23,5	69
Refúgio da Vida Silvestre Mata do Junco (MJU)	-37.0588;-10.5382	111 – 173	1257	24,4	61

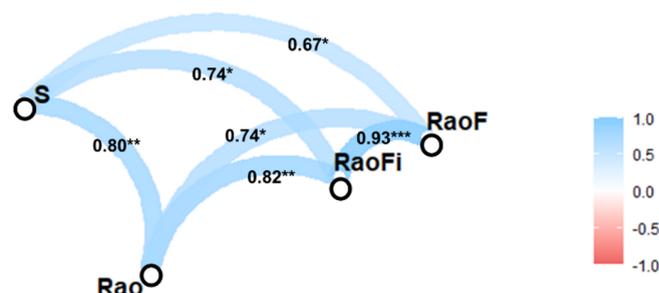


Figura 1: Rede de correlações entre riqueza (S) e diversidades taxonômica (Rao), funcional (RaoF) e filogenética (RaoFi) de bríofitas na Floresta Atlântica Nordeste. Valores compreendem os resultados das correlações de Spearman par-a-par. * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$.

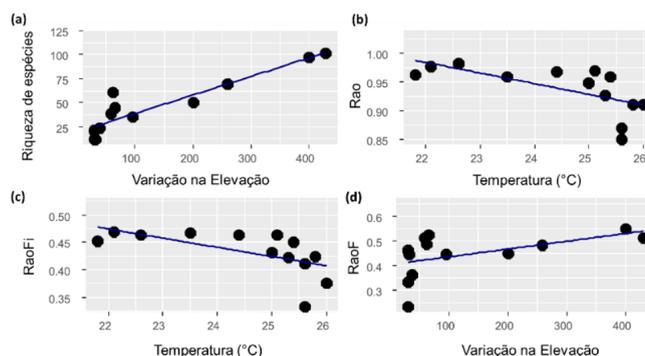


Figura 2: Síntese dos efeitos da temperatura e variações na elevação nos padrões regionais de riqueza e diversidades taxonômica (Rao), funcional (RaoF) e filogenética (RaoFi) de bríofitas na Floresta Atlântica Nordeste.

CONCLUSÕES

A relação positiva entre as facetas indica que a redução regional de espécies está intimamente relacionada com a perda de diversidade nos variados componentes, embora diferentes fatores ambientais modulem os padrões observados. Os padrões de riqueza e diversidade de briófitas na FAN foram explicados pelas variações na elevação e temperatura média anual, apontando a importância do grupo como indicador ambiental a despeito de modificações na paisagem. Contudo, ressalva-se que as métricas da paisagem podem estar mais associadas às condições locais e seus possíveis efeitos interativos com os fatores ambientais não foram considerados no presente estudo. Ainda, devido a sua sensibilidade às alterações de temperatura, as briófitas representam importantes monitores na predição de mudanças climáticas e podem contribuir para responder questões do quão rápido o aumento da temperatura global afeta as espécies e os ecossistemas, o que deve ser considerado em trabalhos futuros.

Autorização legal

Autorização para atividades com finalidade científica nº 19672 (SISBIO).

Fomento

Fundação Grupo Boticário de Proteção À Natureza e CNPq.

Palavras-chave: escala regional, filtros ambientais, paisagens antrópicas.

Referências

- ALVARENGA, Lisi D. P.; PÔRTO, Kátia C.; SILVA, Mércia P. P. Relations Between Regional-Local Habitat Loss and Metapopulation Properties of Epiphyllous Bryophytes in the Brazilian Atlantic Forest. **Biotropica**, v. 41, n. 6, p. 682-691, 14 jul. 2009.
- ARAÚJO, F. M. S. *et al.* Altitudinal gradient drives regional and local diversity and composition patterns of epiphyllous bryophytes in ecological refuges. **Plant Biology**, v. 24, n. 2, p. 292-301, 21 nov. 2021.
- CAVENDER-BARES, Jeannine *et al.* The merging of community ecology and phylogenetic biology. **Ecology Letters**, v. 12, n. 7, p. 693-715, jul. 2009.
- DARRIBA, Diego *et al.* jModelTest 2: more models, new heuristics and parallel computing. **Nature Methods**, v. 9, n. 8, p. 772, 30 jul. 2012.
- DE BELLO, Francesco *et al.* The partitioning of diversity: showing Theseus a way out of the labyrinth. **Journal of Vegetation Science**, v. 21, n. 5, p. 992-1000, 1 set. 2010.
- FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, out. 2017.
- GRADSTEIN, S. R.; POCS, T. BRYOPHYTES. *In*: GRADSTEIN, S. R.; POCS, T. **Tropical Rain Forest Ecosystems**. [S. l.]: Elsevier, 1989. p. 311-325. ISBN 9780444427557.
- JIANG, Tiantian *et al.* Species composition and diversity of ground bryophytes across a forest edge-to-interior gradient. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 8 ago. 2018.
- LONGTON, R. E. Reproductive biology and life-history strategies. *In*: LONGTON, R. E. **Bryology for the Twenty-first Century**. [S. l.]: Routledge, 2018. p. 369. ISBN 9781315138626.
- MCGARIGAL, Kevin. FRAGSTATS help. **University of Massachusetts: Amherst, MA, USA**, v. 182, 2015.
- MEYNARD, Christine N. *et al.* Beyond taxonomic diversity patterns: how do α , β and γ components of bird functional and phylogenetic diversity respond to environmental gradients across France? **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, n. 6, p. 893-903, 28 jan. 2011.
- RONQUIST, Fredrik *et al.* MrBayes 3.2: Efficient Bayesian Phylogenetic Inference and Model Choice Across a Large Model Space. **Systematic Biology**, v. 61, n. 3, p. 539-542, 22 fev. 2012.
- SILVA, Mércia Patrícia Pereira; PÔRTO, Kátia Cavalcanti. Diversity of bryophytes in priority areas for conservation in the Atlantic forest of northeast Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 29, n. 1, p. 16-23, mar. 2015.
- SOBRAL, Fernando Landa; CIANCIARUSO, Marcus Vinicius. Estrutura filogenética e funcional de assembleias:(re) montando a ecologia de comunidades em diferentes escalas espaciais. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 4, p. 617-631, 2012.
- SOUZA, Everaldo Barreiro de *et al.* Mudanças ambientais de curto e longo prazo: projeções, reversibilidade e atribuição. **Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas**, p. 320-346, 2014.
- SOUZA, João P. S.; SILVA, Mércia P. P.; PÔRTO, Kátia C. Spatial distribution of functional traits of bryophytes along environmental gradients in an Atlantic Forest remnant in north-eastern Brazil. **Plant Ecology & Diversity**, v. 13, n. 1, p. 93-104, 2 jan. 2020.
- TABARELLI, Marcelo *et al.* Desafios e oportunidades para a conservação da biodiversidade na Mata Atlântica brasileira. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 132-138, 2005.
- VALE, Mariana M. *et al.* Climate Change and Biodiversity in the Atlantic Forest: Best Climatic Models, Predicted Changes and Impacts, and Adaptation Options. *In*: VALE, Mariana M. *et al.* **The Atlantic Forest**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 253-267.
- VELLAK, Kai; VELLAK, Ain; INGERPUU, Nele. Reasons for moss rarity: Study in three neighbouring countries. **Biological Conservation**, v. 135, n. 3, p. 360-368, mar. 2007.
- WEBB, Campbell O. *et al.* Phylogenies and Community Ecology. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 33, n. 1, p. 475-505, nov. 2002.