



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Botucatu

GUILHERME GUTIERREZ PEREIRA

Análise da diversidade funcional em um gradiente
de precipitação na bacia amazônica a partir de
modelagem de vegetação

Campinas

2024

GUILHERME GUTIERREZ PEREIRA

Análise da diversidade funcional em um gradiente de precipitação na bacia amazônica a partir de modelagem de vegetação

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas junto ao Conselho de Curso de Bacharelado em Ciências Biológicas, do Instituto de Biociências de Botucatu da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Botucatu.

Financiadora: FAPESP – Proc [2023/06975-5](#)

Orientador: Prof. Dr. David Montenegro Lapola

Supervisor: Prof. Dr. Ricardo Benine Cardoso

Campinas

2024

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA INFORM.
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CÂMPUS DE BOTUCATU - UNESP

BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: ROSANGELA APARECIDA LOBO-CRB 8/7500

Pereira, Guilherme Gutierrez.

Análise da diversidade funcional em um gradiente de precipitação na bacia amazônica a partir de modelagem de vegetação / Guilherme Gutierrez Pereira. - Botucatu, 2024

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Botucatu

Orientador: David Montenegro Lapola

Capes: 20502001

1. Amazonas, Rio, Bacia. 2. Análise foliar. 3. Modelagem. 4. Ecologia vegetal.

Palavras-chave: Amazonia; Atributos funcionais; Modelagem trait-based.

Análise da diversidade funcional em um gradiente de precipitação na bacia amazônica a partir de modelagem de vegetação

Aluno: Guilherme Gutierrez Pereira

Graduando do Curso de Ciências Biológicas, IBB UNESP, Botucatu

Orientador: Prof. Dr. David Montenegro Lapola

Pesquisador, Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, CEPAGRI, UNICAMP, Campinas

Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura

UNICAMP

Junho/2024

Agradecimentos

Agradeço a minha equipe de pesquisa, que me deu amparo e incentivo para durante a execução do meu projeto, com destaque especial a Doutoranda Bianca Rius, que sempre esteve ao meu lado nessa jornada e sempre me incentivou.

Agradeço ao financiamento a pesquisa pela FAPESP ([2023/06975-5](#)), que auxiliou minha estadia na cidade e o desenvolvimento do meu projeto ao longo desse período de tempo.

Resumo: O gradiente pluviométrico decrescente oeste-leste da bacia amazônica determina o padrão de distribuição de espécies de plantas para cada região. Por sua vez, como esse gradiente determina a diversidade funcional, e seus componentes, ainda precisa ser melhor explorado. O presente trabalho avaliou como a diversidade funcional e seus componentes, se distribuem pelo gradiente de precipitação em 3 regiões (noroeste, centro e sudeste) da bacia amazônica. Para tal, foram utilizadas simulações feitas a partir do modelo de vegetação *traitbased* denominado CAETÊ (*CARbon and Ecosystem functional Trait Evaluation model*), em que atributos funcionais de folhas, tronco e raiz foram selecionados para análises dos componentes da diversidade funcional (riqueza, divergência e uniformidade). A partir desses atributos, encontramos que o quadrante sudeste apresentou maior riqueza (344% maior em atributo de folha em relação ao quadrante noroeste); maior uniformidade funcional (33% maior em atributo de raiz em relação ao quadrante noroeste); e menor divergência funcional (37% menor em atributo de folha em relação ao quadrante central). Além disso, o quadrante sudeste apresentou maior dissimilaridade funcional em relação aos outros quadrantes (92% dissimilar em atributo de raiz em relação ao quadrante noroeste). Dessa forma, menores taxas de precipitação e maior sazonalidade nessa região podem alterar a sua composição de atributos funcionais, tornando a região sudeste mais heterogênea por apresentar maior amplitude no espaço funcional, indo de encontro a composição de espécies sempre verde, semidecíduas, decíduas e herbáceas encontradas na região. Por fim, este estudo abre espaço para futuras análises visando compreender como outros fatores bióticos e abióticos podem alterar a diversidade funcional ao longo da bacia amazônica, e como interferências antrópicas e alterações climáticas podem impactar a diversidade da floresta.

Palavras-chave: Atributos funcionais, modelagem *trait-based*, Amazônia.

Sumário

1.Introdução.....	7
2.Hipótese.....	11
3.Objetivo.....	12
4.Materiais e Métodos.....	12
4.1. <i>Descrição do modelo CAETÊ.....</i>	<i>12</i>
4.2. <i>Simulações.....</i>	<i>16</i>
4.3. <i>Como será calculada a Diversidade Funcional.....</i>	<i>17</i>
4.4. <i>Comparação da diversidade funcional entre regiões</i>	<i>19</i>
5.Resultados.....	19
6.Discussão.....	18
7.Conclusão.....	22
9.Cronograma.....	28
10.Referências.....	28

1. Introdução

A Floresta Amazônica é a maior floresta tropical do mundo, além de abrigar uma das mais ricas diversidades de plantas do planeta (Oliveira et al., 2004). Somando-se a essas características, seu funcionamento impacta regiões tanto a nível local quanto a nível global, desempenhando um papel fundamental nos ciclos do carbono e da água (Levis et al., 2020; Hofhansl et al., 2016). Por conta de sua amplitude, a floresta amazônica apresenta regiões heterogêneas, com diversidade de solos e climas, formando um mosaico vegetacional, no qual diferentes localidades apresentam comunidades distintas, com diferentes níveis de diversidade e composição funcional (Silva-Souza et al., 2020).

Dentre as diferenças entre as regiões da bacia amazônica é possível destacar a taxa de precipitação: a bacia apresenta um gradiente hídrico oeste-leste em que regiões a oeste apresentam maior precipitação anual e menor sazonalidade climática quando comparadas às regiões centrais e sudeste (Silman, 2011). Tal heterogeneidade pluviométrica é um dos fatores determinantes para distribuição espacial de espécies ao longo da bacia amazônica: a parte oeste tende a apresentar maior diversidade vegetal taxonômica quando comparada à parte leste (Pitman et al., 2002). Outros estudos ainda mostram que diferentes regiões da Amazônia apresentam comunidades com diferentes estratégias de sobrevivência a partir da combinação de atributos funcionais para utilização de recursos hídricos disponíveis (Esquivel-Muelbert et al, 2019; Malhado et al, 2013; Pitman et al., 2002). Porém, ainda existem lacunas no conhecimento para entender completamente como e em que grau tais heterogeneidades ambientais determinam a heterogeneidade espacial na distribuição da diversidade funcional ao longo da bacia.

O funcionamento dos ecossistemas é intrinsecamente associado com a forma com que os organismos interagem (i.e., respondem e afetam) com o ambiente (Song et al., 2004). Isto se dá pois os organismos podem ser vistos como conjuntos de atributos funcionais (aspectos morfológicos, fisiológicos ou fenológicos observados à nível individual; Violle et al., 2007). Os atributos funcionais dos organismos determinam seu *fitness* (capacidade de um indivíduo sobreviver e se reproduzir) nos diferentes ambientes, e em ambientes diferentes o mesmo indivíduo pode apresentar *performance* diferenciada (Reich et al., 2003; Violle et al., 2007; Kraft et al., 2015). A amplitude de valores dos atributos funcionais em determinada unidade ecológica (i.e., população, comunidade e ecossistema) é denominada diversidade funcional (Petchey et al., 2006), sendo fundamental para determinar o funcionamento dos ecossistemas (Song et al., 2004). De acordo com Mason et al., 2005, a diversidade funcional pode ser decomposta em 3 principais componentes: (I) a riqueza funcional, que identifica a amplitude de atributos funcionais em uma unidade ecológica, ou seja, o espaço funcional que a mesma ocupa; (II) a uniformidade funcional, que diz a respeito a como a densidade dos valores dos atributos funcionais se distribuem ao longo do espaço funcional; (III) a divergência funcional, que mostra quanto esses atributos funcionais se concentram nas extremidades do espaço funcional ocupado. A união desses componentes influencia na dinâmica, na estabilidade e nos processos e propriedades dos ecossistemas (e.g., produtividade primária líquida; Tilman, 2001).

Apesar da diversidade taxonômica e funcional estarem altamente correlacionadas, não necessariamente comunidades que apresentam alta diversidade taxonômica também apresentam alta diversidade funcional, uma vez que a relação entre essas variáveis pode ser tanto equivalente, quanto positiva ou negativa (Diaz et al., 2001; Gross et al., 2017; Loreau,

1998; Song et al., 2004; Tilman et al., 1997). Quando essas variáveis apresentam correlação positiva, se tem uma equivalência no número de espécies e nichos ocupados pelas mesmas. Contudo, essas variáveis podem apresentar uma relação negativa, de forma que as espécies sobrepõe seus nichos entre si, dessa forma, apesar da abrangência na diversidade de espécies, os indivíduos podem desempenhar funções similares e apresentar redundância em sua funcionalidade (Diaz et al., 2001; Fonseca et al., 2001; Tilman, 2001, Tilman et al., 1997; Wright et al., 2006). Assim, embora a distribuição da diversidade de espécies ao longo da bacia amazônica seja relativamente bem compreendida (maior diversidade no noroeste e centro), pouco se sabe sobre a distribuição da diversidade funcional. Tendo em vista que a diversidade funcional é uma variável que possibilita a melhor compreensão do funcionamento dos ecossistemas (Cadotte et al., 2011), torna-se fundamental explorar como a mesma se distribui nas diferentes regiões da floresta amazônica.

Os modelos de vegetação são um dos métodos que possibilitam compreender o papel do clima no funcionamento dos ecossistemas e distribuição da vegetação (Beerling et al., 1997; Foley et al., 1998; Kirilenko et al., 1998). Porém, comumente, tais modelos representam a diversidade vegetal através de poucos PFTs (da sigla em inglês para *plant functional types*), por exemplo, utilizam 1 ou 2 PFTs para representar toda a diversidade encontrada na Amazônia (Fyllas et al., 2012), deixando lacunas na representação da vegetação com consequências para as simulações realizadas (Pavlick et al., 2013; Sakschewski et al., 2016; Verheijen et al., 2015). Em busca de melhorar a representação da diversidade de plantas, os modelos *trait-based* têm sido desenvolvidos, e buscam abranger diversas estratégias de vida a partir da combinação de atributos funcionais de plantas. Diferente dos modelos baseados em PFTs, os modelos *trait-based* possibilitam a análise dos diferentes componentes da

diversidade funcional e como estes respondem e afetam o ambiente, auxiliando a compreender como esses parâmetros se distribuem ao longo da bacia amazônica (Pavlick et al., 2013; Sakschewski et al., 2016; Verheijen et al., 2015). No entanto, até o momento, estudos que fizeram uso de modelos *trait-based* pouco se utilizaram desta possibilidade para ir a fundo nas análises de diversidade funcional (Rius et al., 2023). Além disso, poucos estudos (Hofhansl et al., 2020; Aguirre-Gutiérrez et al., 2022) buscaram compreender como a diversidade funcional se distribui ao longo da bacia amazônica. Assim, o principal objetivo deste trabalho é procurar avançar na elucidação de tais questões através da utilização de um modelo de vegetação *trait-based* denominado CAETÊ (*C*arbon and *E*cosystem *f*unctional *T*rait *E*valuation model; Rius et al., 2023). Este modelo permite a combinação de diferentes parâmetros (valores de atributos funcionais) para formar ampla variedade de estratégias de vida (>3000) que procuram representar os padrões de diversidade de estratégias observados na natureza.

2. Hipótese

Esperamos que, contrariando estudos de diversidade taxonômica, regiões ao leste da bacia apresentem maior diversidade funcional quando comparadas às regiões localizadas ao oeste., desde que a exposição à variabilidade dos padrões de precipitação é maior na região leste (Ciemer et al. 2019), já que essa variação seleciona diferentes estratégias de vida para lidar com a variabilidade climática resultado em maior diversidade funcional.

3. Objetivo

Identificar e comparar a distribuição da diversidade funcional e seus diferentes componentes (riqueza, uniformidade e redundância) em três regiões (noroeste, centro e leste) da bacia amazônica localizadas em um gradiente pluviométrico.

4. Material e métodos

Neste trabalho utilizaremos o modelo de vegetação desenvolvido pelo grupo de laboratório em que este estudo será desenvolvido, o modelo CAETÊ. Nenhum desenvolvimento ou simulação serão realizados no modelo. As simulações foram realizadas no trabalho de Rius et al 2023, sendo que o atual projeto terá enfoque em utilizar os resultados dessas simulações para analisar os diferentes aspectos da diversidade funcional proveniente dos resultados prévios.

4.1. Descrição do modelo CAETÊ

O CAETÊ é um modelo vegetacional *trait-based* que busca representar a diversidade de plantas encontradas na natureza através da combinação de valores de atributos funcionais, como por exemplo a porcentagem de alocação de carbono para os diferentes compartimentos da planta. Inicialmente, são criadas dezenas de milhares de combinações únicas de atributos, as quais chamamos de PLSs (da sigla em inglês para *Plant Life Strategies*). A combinação de atributos determina, para cada PLS, o seu comportamento ecofisiológico e suas respostas e efeitos no ecossistema, prescrevendo assim sua performance (abundância relativa) e sobrevivência (Rius et al., 2023). Os valores dos atributos que compõem os PLSs são amostrados uniformemente do range completo de valores baseados em literatura empírica/experimental e são apresentados na Tabela 1.

Faixa de valores de atributos funcionais						
	Alocação (%)			Tempo de Residência		
	α_{folha}	$\alpha_{Madeira}$	$\alpha_{Raízes\ finas}$	τ_{folha}	$\tau_{Madeira}$	$\tau_{Raízes\ finas}$
Gramíneas	15 - 85	-	15 - 85	1 (m*) - 8(y**)	-	1 (m) - 8 (y)
Estratégias Lenhosas	15 - 85	15 - 85	15 - 85	1 (m*) - 8(y**)	1 (y) – 80 (y)	1 (m) - 8 (y)

Tabela 1 - Faixa de valores de características funcionais a partir das quais os valores são amostrados e suas combinações criam as diferentes estratégias de vida vegetal (PLSs). Usado na abordagem de modelagem baseada em características. α : alocação; τ : tempo de residência. *meses; **anos.

Esse projeto será baseado no trabalho de Rius et al. (2023) em que as PLSs são formadas a partir da combinação de seis atributos funcionais: (I) alocação de carbono para raízes finas (%); (II) alocação de carbono para tecidos lenhosos (%); (III) alocação de carbono para folhas (%); (IV) tempo de residência de carbono em raízes finas (anos); (V) tempo de residência de carbono em tecidos lenhosos (anos) e (VI) tempo de residência de carbono em folhas (anos) (tempo de residência de carbono = $1/\text{turnover}$). Para a formação da PLS, são amostrados primeiramente os valores referentes a alocação de carbono para cada

compartimento da planta (I, II e III), esses valores são combinados de forma aleatória, sendo que a porcentagem de alocação desses três compartimentos deve totalizar 100%. Após, serão amostrados os valores dos atributos referentes ao tempo de residência de carbono em cada compartimento (IV, V e VI). O conjunto de todas as estratégias de vida formadas irá compor um hipervolume, também chamado de espaço funcional multidimensional potencial. A partir do espaço potencial são amostradas 3000 PLSs as quais serão utilizadas para aplicação do modelo. O número 3000 foi definido a partir de uma análise de sensibilidade que pode ser encontrada em Rius et al. (2023)

Todas as células de grade são inicializadas com o mesmo conjunto de PLSs, sob condição análoga a solo nu. Porém, em cada célula de grade os PLSs apresentarão performance diferenciada de como que algumas estratégias sobreviverão, cada uma delas ocupando uma porção diferente da célula de grade (ver o cálculo de abundância relativa abaixo), enquanto outras serão excluídas da mesma e não podem se restabelecer. A performance diferenciada para cada PLS é possível pelo filtro ambiental climático e pelo fato de cada uma das características funcionais que compõem a PLS estão associadas a pelo menos um *trade-off* (Pavlick et al., 2013, Reu et al., 2014). Os trade-offs expressam relações de custos e benefícios que ditam o processo ecofisiológico de uma determinada PLS (Pavlick et al., 2013, Reu et al., 2011) além de evitar o surgimento de “super-plantas”. Portanto, em uma dada condição ambiental, algumas combinações de características são favorecidas a partir da relação entre custos e benefícios de investir carbono em cada compartimento e duração do tempo de residência, maximizando a sobrevivência e o desempenho. Uma PLS é considerada viva quando apresenta uma quantidade mínima de carbono ($>1^{-12} \text{ kgCm}^{-2}$), simultaneamente, nas folhas e raízes finas.

As células de grade possuem resolução de 0.5 ° e apresentam condições climáticas específicas a partir das variáveis de entrada (ver seção 4.2). Nas formulações que se seguem usaremos a seguinte simbologia: i representa um PLS, y representa uma célula de grade e z para um compartimento de planta. A formulação completa do modelo pode ser encontrada em Rius et al. (2023). A *performance* de uma PLS é equivalente à sua abundância relativa ($A_{ri,y}$) a qual diz a respeito à parcela que determinada PLS ocupa na célula de grade, calculada a partir de sua contribuição ($C_{i,y}$) para a quantidade total de carbono C_{Ty} :

$$A_{ri,y} = \frac{C_{i,y}}{C_{Ty}}$$

$$C_{Ty} = \sum_{i=1}^S C_{i,y}$$

S representa o número de PLSs sobreviventes na específica célula de grade. Assim, cada célula de grade será constituída de um mosaico de PLSs com diferentes parcelas de ocupação.

Cada célula é representada por um único valor de cada atributo funcional. O escalonamento do valor do atributo funcional para cada célula de grade (F_{gridy}) é feito a partir dos valores dos atributos de cada uma das PLSs vivas ($F_{i,y}$) ponderado por suas abundâncias relativas ($A_{ri,y}$):

$$F_{gridy} = \sum_{i=1}^S A_{ri,y} F_{i,y}$$

Este tipo de abordagem tem como suporte na hipótese chamada *biomass-ratio* (Grime, 1998) a qual prediz que os efeitos imediatos de uma espécie são proporcionais à sua contribuição relativa ao estoque total de carbono da comunidade. Este valor único de atributo em cada

célula de grade, chamado de *community weighted mean* (CWM) pode ser entendido como valor de atributo mais dominante presente em cada célula (Díaz et al., 2007).

4.2. Simulações

Nesse estudo será utilizada uma versão estacionária (i.e., não-dinâmica) do modelo CAETÊ, que tem base em médias mensais de variáveis climáticas a longo prazo (1980 a 2010). Estas variáveis são consideradas dados de entrada do modelo e compreendem a temperatura do ar à superfície, a precipitação, a radiação de onda curta, a umidade relativa e a concentração atmosférica de CO₂. Estes dados, exceto [CO₂], são disponibilizados pela plataforma ISI-MIP2 (*Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project 2*; Warszawski et al., 2014). A [CO₂] é obtida do *site CO₂ Earth website* (Mc. Gee, 2020), sendo que utilizaremos a média desta variável para o mesmo período usado para os dados climáticos.

Serão selecionados três quadrantes ao longo da bacia amazônica para a execução do modelo, (I) o primeiro localizado na região noroeste, (II) o segundo localizado a região central e o (III) terceiro, na região sudeste da bacia amazônica. Cada quadrante terá formado uma área de 10x10 células de grade, como mostrado na figura 1.

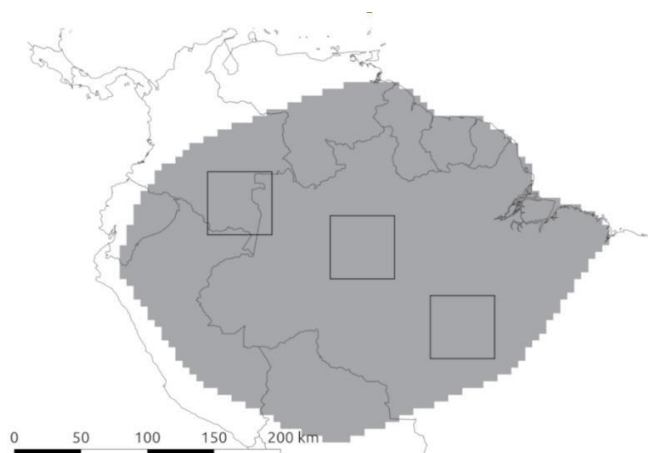


Figura 1 - Os três quadrantes (noroeste, central e sudeste) utilizados para elaboração das análises de diversidade funcional. Cada quadrante apresenta a dimensão de 10x10 células de grade. Figura modificada de Rius et al 2023.

Antes da execução do modelo, cada célula de grade irá passar por uma fase de *spinup*, a qual visa determinar a quantidade inicial de carbono em cada um dos tecidos vegetais.

Todos os dados provenientes das simulações utilizadas nesse trabalho, tanto os scripts quanto os resultados, serão disponibilizados no Repositório de Dados de Pesquisa da Unicamp (REDU - Unicamp), sendo de acesso público para futuras pesquisas.

4.3. Como será calculada a Diversidade Funcional

A partir dos CWMs (seção 4.1) dos atributos de cada célula de grade, será calculada a diversidade funcional de cada quadrante. As análises serão realizadas para cada quadrante, de maneira independente, a partir de curvas de distribuição de densidade de probabilidade de cada atributo funcional utilizando o pacote TPD (Carmona, 2019) no *software* R (R Core Team, 2022; Figura 2a). A partir dessas curvas é possível acessar os diferentes componentes da diversidade funcional. Baseado em Carmona et al. (2016), consideraremos três componentes (Figura 2c-e): (I) riqueza: a quantidade de espaço funcional ocupado pela

comunidade, ou seja, a faixa total de valores observados um atributo funcional específico considerando todos os organismos (PLSs no nosso caso); (II) uniformidade funcional: a regularidade da distribuição (no espaço funcional) da densidade de valores de um atributo considerando os PLSs da unidade ecológica específica; e (III) divergência funcional: o grau em que a abundância dos valores do atributo dos PLSs são distribuídos para os extremos de seu espaço funcional.

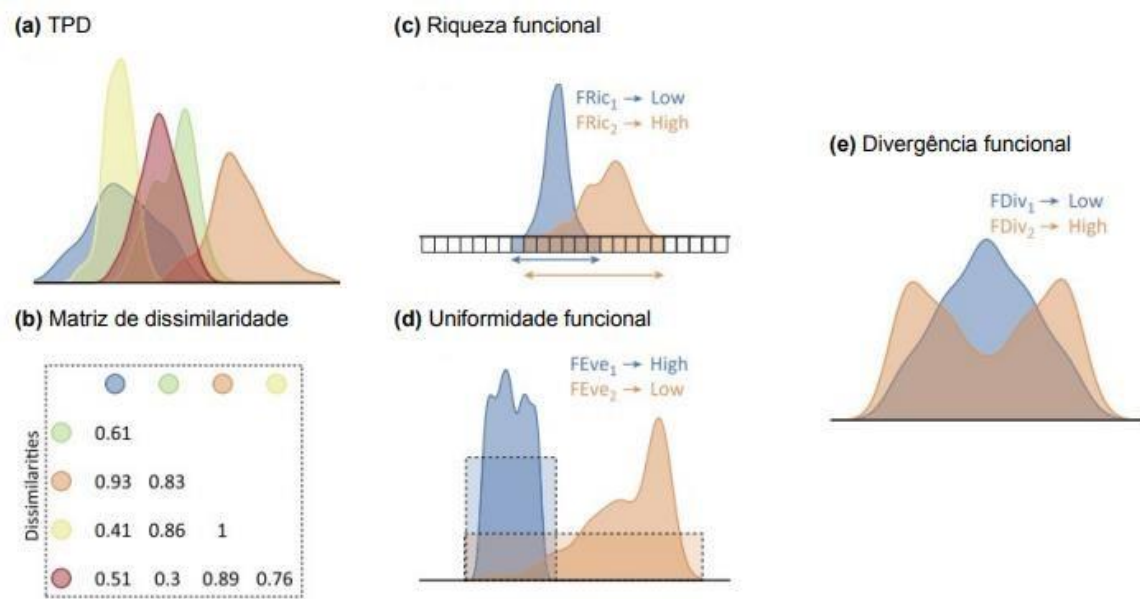


Figura 2 - Representação de aspectos da diversidade funcional a partir do pacote *Trait Probability Density* (TPD). A figura (a) apresenta exemplos de distribuição de densidade de atributos. Matriz de dissimilaridade (b) entre a diversidade funcional de cada curva, representada por diferentes cores. Riqueza funcional (c) constituída pela abundância de diferentes atributos funcionais ao longo de um espaço funcional. Uniformidade funcional (d) constituída pela distribuição de atributos funcionais em um espaço funcional. Divergência funcional (e) constituída por como ocorre a distribuição dos atributos funcionais ao longo do espaço funcional. Figura modificada de Carmona et al. (2016).

4.4. Comparação da diversidade funcional entre regiões

Todas as comparações de diversidade funcional, serão realizadas através de cálculo de índice de dissimilaridade baseado em Carmona et al. (2016) por meio do pacote TPD (Carmona, 2019) no *software* R (R Core Team, 2022; Figura 2). Este índice computa o grau de sobreposição (*overlap*) entre uma curva de distribuição e outra, indicando, assim, quanto diferentes tais curvas são em termos funcionais. Por exemplo, ao comparar duas curvas é possível observar se houve exclusão, diminuição ou aumento na ocorrência de determinados valores de atributos funcionais. O índice varia entre 0 (completamente similares; total sobreposição entre as curvas) e 1 (completamente diferentes, sem sobreposição entre as curvas).

Também compararemos, em termos percentuais, a diferença dos valores obtidos para cada componente da diversidade funcional calculado. As comparações serão feitas entre as três regiões selecionadas para o estudo.

5. Resultados

A partir das análises realizadas, temos que a distribuição dos seis atributos no espaço funcional está representada pelas figuras 3 e 4, em que a figura 3 agrupa atributos de alocação de carbono, e a figura 4 atributos de tempo de residência de carbono.

Ao comparar os componentes da diversidade funcional entre os quadrantes, encontramos que, de maneira geral, a região SE apresenta maior riqueza funcional em comparação a região NO e CE, sendo determinada principalmente pela distribuição dos atributos τ_{leaf} , α_{wood} , τ_{wood} , α_{root} e τ_{root} no espaço funcional (Fig 3 e 4). Já a partir da comparação entre as regiões NO e CE, encontramos menor diversidade funcional na primeira

região, principalmente para os atributos α leaf, α root e α root, que mostram ocupação do espaço funcional mais restrita como representado nas figuras 3 e 4.

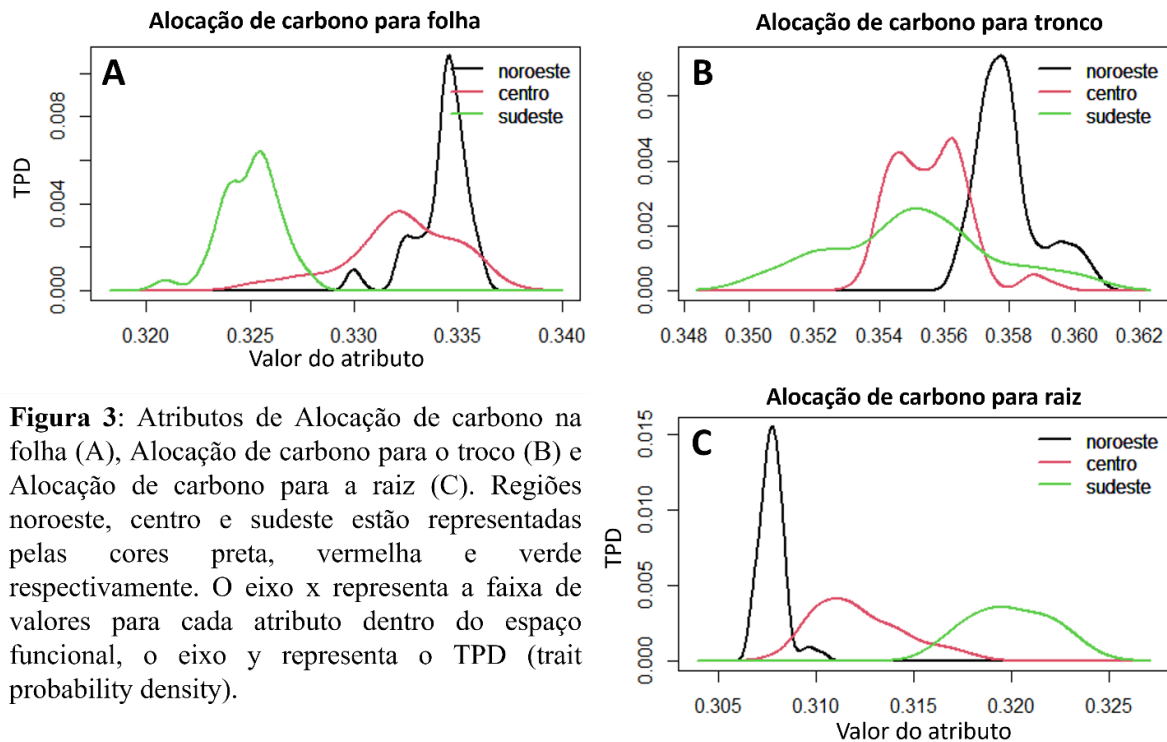


Figura 3: Atributos de Alocação de carbono na folha (A), Alocação de carbono para o tronco (B) e Alocação de carbono para a raiz (C). Regiões noroeste, centro e sudeste estão representadas pelas cores preta, vermelha e verde respectivamente. O eixo x representa a faixa de valores para cada atributo dentro do espaço funcional, o eixo y representa o TPD (trait probability density).

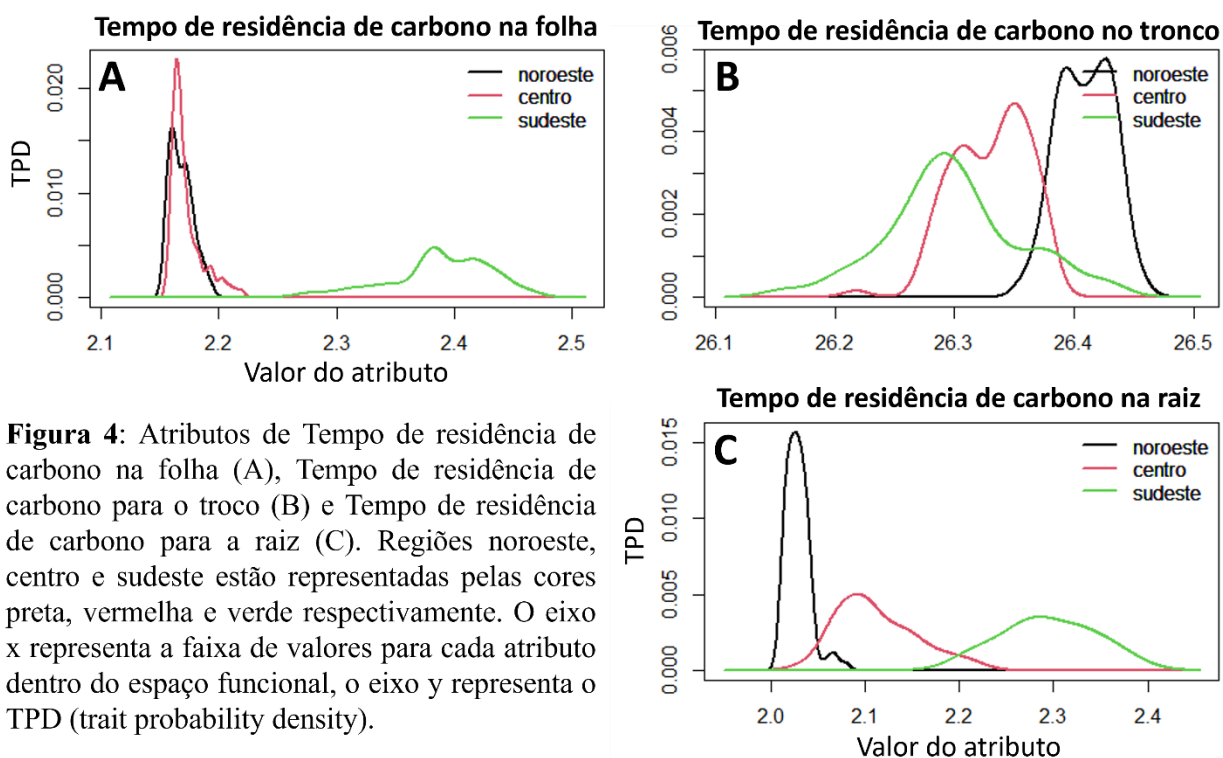


Figura 4: Atributos de Tempo de residência de carbono na folha (A), Tempo de residência de carbono para o tronco (B) e Tempo de residência de carbono para a raiz (C). Regiões noroeste, centro e sudeste estão representadas pelas cores preta, vermelha e verde respectivamente. O eixo x representa a faixa de valores para cada atributo dentro do espaço funcional, o eixo y representa o TPD (trait probability density).

Ao olhar para os índices de uniformidade funcional, observamos que a região SE apresenta uma distribuição mais uniforme dos atributos α_{wood} , α_{root} e τ_{root} ao longo do espaço funcional em comparação com as regiões NO e CE. A região CE apresentou distribuição mais uniforme dos atributos α_{leaf} e τ_{wood} , enquanto a região NO apresentou maior uniformidade de τ_{leaf} em relação às outras regiões, como apresentada na Tabela 1.

Em relação à divergência funcional, observamos que o quadrante que apresenta menor divergência é o SE (Tab. 1). O quadrante NO apresenta maior divergência em atributos como α_{leaf} , α_{wood} e τ_{root} em comparação aos outros quadrantes, enquanto o quadrante CE apresentou maior divergência em τ_{leaf} e α_{root} (Tab. 1).

Quadrante Noroeste	τ_{leaf}	α_{leaf}	τ_{wood}	α_{wood}	τ_{root}	α_{root}
Riqueza Funcional	0.047	0.006	0.112	0.004	0.075	0.004
Divergência Funcional	0.532	0.550	0.480	0.561	0.524	0.473
Uniformidade Funcional	0.733	0.645	0.740	0.662	0.585	0.575
Quadrante Central						
Riqueza Funcional	0.065	0.013	0.152	0.006	0.213	0.011
Divergência Funcional	0.771	0.464	0.482	0.440	0.500	0.504
Uniformidade Funcional	0.575	0.690	0.743	0.650	0.713	0.718
Quadrante Sudeste						
Riqueza Funcional	0.209	0.007	0.298	0.011	0.249	0.010
Divergência Funcional	0.487	0.401	0.378	0.438	0.466	0.479
Uniformidade Funcional	0.682	0.640	0.680	0.750	0.764	0.767

Tabela 1: Componentes da diversidade funcional (Riqueza, Divergência e Uniformidade) referente a cada atributo funcional analisado no estudo, em cada um dos quadrantes analisados.

O grau de dissimilaridade entre as distribuições dos valores dos atributos nos diferentes quadrantes pode ser encontrado na Tabela 2. O quadrante que apresentou maior dissimilaridade em relação aos outros foi o quadrante SE, sendo determinada principalmente pela distribuição dos atributos α leaf, τ leaf, α root e τ root. O quadrante CE se mostrou dissimilar ao quadrante NO em relação aos atributos α wood, τ wood, α root e τ root, já a distribuição dos atributos α leaf e τ leaf se mostraram menos dissimilares entre esses quadrantes.

τ leaf	NO	CE	SE
NO	0	0.233	1
CE	0.233	0	1
SE	1	1	0

α leaf	NO	CE	SE
NO	0	0.494	1
CE	0.494	0	0.907
SE	1	0.907	0

τ wood	NO	CE	SE
NO	0	0.857	0.833
CE	0.857	0	0.406
SE	0.833	0.406	0

α wood	NO	CE	SE
NO	0	0.800	0.717
CE	0.800	0	0.389
SE	0.717	0.389	0

τ root	NO	CE	SE
NO	0	0.899	1
CE	0.899	0	0.922
SE	1	0.922	0

α root	NO	CE	SE
NO	0	0.895	1
CE	0.895	0	0.887
SE	1	0.887	0

Tabela 2: Grau de dissimilaridade separados por atributos entre cada uma das regiões analisadas no estudo. Quanto mais próximo de 0, menos dissimilares são as regiões, quanto mais próximo de 1, mais dissimilares são as regiões.

6. Discussão

Os resultados do estudo destacam uma diferença relevante da região SE em relação às regiões NO e CE referente aos diferentes componentes da diversidade funcional. A região SE

apresenta condições climáticas diferentes das outras regiões analisadas no estudo, dando destaque à menor taxa de precipitação e à maior sazonalidade, levando a um consequente maior estresse hídrico (Silman, 2011; Albrecht et al., 2004; Phillips et al., 2009). Por conta desse fator climático, a região SE apresenta maior heterogeneidade ambiental (Espinoza et al., 2019; Ciemer et al., 2019), apresentando combinações de atributos funcionais, como a maior alocação de carbono para raízes finas (Tab. 1), que otimiza a captação de água (Xing et al., 2024), tornando as estratégias de vida desta região adaptadas às estações secas, comparadas a regiões CE e NO da bacia (Coutinho et al., 2018; Oliveira et al., 2004; Ciemer et al., 2019)

Por exemplo, nossos resultados mostram que a região SE é a que apresenta maior riqueza funcional dos atributos (Fig. 3 e 4), ou seja, maior amplitude de ocupação no espaço funcional, o que está provavelmente relacionado à maior heterogeneidade ambiental, tais resultados gerados pelo CAETÊ vão de encontro a diversidade de tipos funcionais presentes nessa região, contendo espécies sempre verde, semidecíduas, decíduas e herbáceas (Butt et al., 2008; Gallo et al., 2022; Silva et al., 2020). Resultados similares foram encontrados na floresta tropical de Gana, em que regiões mais secas apresentaram maior riqueza funcional em comparação a regiões mais úmidas (Aguirre-Gutiérrez et al., 2019).

Tais argumentos podem ser sustentados teoricamente pelas seguintes hipóteses: (i) Hipótese de Segurança, postulando que a maior biodiversidade protege ecossistemas de possíveis declínios no seu funcionamento e produtividade, dessa forma, a maior riqueza funcional encontrada na região SE reflete a maior variabilidade de estratégias de vida para lidar com as condições ambientais mais variantes (Yachi et al., 1999; Shanafelt et al., 2015); (ii) Hipótese do Distúrbio intermediário, postulando que picos de diversidade de espécies

ocorrem quando há distúrbios em intensidade e frequência média, possibilitando a coexistência de espécies (Fox, 1979; Moi et al., 2020; Herben et al., 2018), dessa forma, a inconstância pluviométrica da região SE pode ser vista como um tipo de distúrbio, impedindo a super-dominância de apenas algumas estratégias de vida e possibilitando que outras sobrevivam, gerando uma alteração na composição de atributos funcionais existentes, aumentando, conseqüentemente, a amplitude de atributos funcionais existentes nesta região; (iii) Diversidade de Resposta, postulando que um sistema que apresenta maior diversidade de respostas a variações ambientais se mostra mais resiliente a essas mudanças, dessa forma, a maior diversidade de resposta funcional presente na região SE pode conferir maior resiliência para o sistema ecológico frente a distúrbios ambientais, como a escassez hídrica, ampliando as estratégias de vida que existem nesta região (Mori et al., 2013; Elmqvist et al., 2003).

Juntamente a isso, observamos como o gradiente de precipitação influencia na distribuição dos atributos ao longo do espaço funcional, sendo caracterizada pela decrescente amplitude de valores de atributos no sentido SE-NO: região SE com distribuição mais ampla, passando pela região CE, com distribuição intermediária, para NO, com distribuição desses atributos mais concentrada (Fig. 3 e 4). Esses resultados mostram que o gradiente pluviométrico pode determinar a distribuição e a amplitude dos atributos ao longo do espaço funcional, como observado nos trabalhos que associam a distribuição e diversidade taxonômica com a disponibilidade hídrica ao longo da bacia amazônica (Butt et al., 2008; Feeley et al., 2012)

Observamos também, que as regiões SE e CE mostraram distribuições de atributos mais uniformes do que a região NO, ou seja, os atributos analisados para estas duas regiões

estão distribuídos de forma mais homogênea ao longo do espaço funcional. As menores taxas de precipitação e maior sazonalidade nessas regiões, possibilitam a coexistência de diferentes estratégias de vida adaptadas às variações climáticas ao longo das estações, conferindo maior uniformidade funcional ao impedir a hiper dominância (Draper et al., 2021; Lundholm, 2009; Fox, 1979; Ter Steege et al., 2013).

Já a região NO, apresenta picos e concentrações dos atributos analisados (Fig. 3 e 4), mostrando a hiper dominância de poucas estratégias de vida, o que pode ser explicado pela alta e constante taxa de precipitação, resultando na baixa uniformidade funcional desta região (Tab. 1) (Draper et al., 2021; Ter Steege et al., 2013; Zubieta et al., 2017). Por exemplo, os atributos de folha apresentam picos no espaço funcional, indicando possivelmente estratégias de vida dominantes que ocupam grande parte do dossel para captação de recursos luminosos, outros trabalhos indicam que essas adaptações tornam essas estratégias de vida ótimas competidoras neste ambiente estável e pouco variável (de Toledo et al., 2013; Getzin et al., 2011; Ricotta et al., 2014), justificando nosso resultado de baixa uniformidade funcional da região. O estudo de Ricotta et al., 2014 indica que regiões com maiores taxas de sucessão são mais heterogêneas apresentam maior diversidade de espécies, logo são mais uniformes que regiões mais homogêneas dominadas por poucas estratégias de vida, contudo, o atual modelo CAETÊ não apresenta módulos envolvendo processos de sucessão ecológica. Dessa forma, percebe-se que ainda existem algumas lacunas no nosso modelo e na literatura acerca da uniformidade funcional de plantas em florestas tropicais.

Considerando o índice de divergência funcional (Tab. 1), notamos que a região SE apresenta menor divergência em comparação a região NO e CE, que são similares em relação a essa variável entre si a partir dos atributos analisados. A maior divergência funcional é

caracterizada pela densidade de valores encontrados no centro em relação aos extremos do espaço funcional, dessa forma, temos que os atributos das regiões NO e CE se encontram mais concentrados na região central, apresentando maior divergência por conta da distância do extremo, enquanto a região SE, por não apresentar alta densidade de atributos na região central do espaço funcional, possui menor divergência (Mouillot et al., 2013a). Essas características podem ser explicadas pela presença de estratégias de vidas dominantes em regiões com maior estabilidade hídrica, como a NO e CE (Draper et al., 2021; Ter Steege et al., 2013), enquanto a região SE por estar suscetível a maior heterogeneidade ambiental, apresenta maior abrangência de estratégias de vida (Moi et al., 2020; Herben et al., 2018). Estudos com gramíneas mostraram que ambientes com maior variação ambiental, apresentam comunidades com maior divergência funcional (Siefert, 2012), enquanto o efeito da pastagem, que caracteriza distúrbios, sobre gramíneas aumentou a riqueza funcional, mas não influenciou na divergência funcional da comunidade de plantas (Niu et al., 2016). Poucos estudos buscaram entender o efeito das condições climáticas na divergência de atributos funcionais. Assim, ainda existem lacunas na literatura para compreender como a divergência funcional responde à heterogeneidade ambiental ou às mudanças climáticas. Esta lacuna pode ser ainda mais ampla para florestas tropicais, consideradas hiper diversas.

A dissimilaridade entre os quadrantes foi outro componente analisado pelo trabalho (Tab. 2), sendo SE o quadrante mais dissimilar em relação aos outros. Esses resultados mostram como o gradiente de precipitação ao longo da bacia influencia na diferença das regiões entre si, uma vez que, como nossos resultados evidenciam, ocorre uma alteração na composição funcional das estratégias de vida frente às diferentes condições climáticas de cada localidade, à medida que a disponibilidade hídrica e a sazonalidade se modificam

(Aguirre-Gutiérrez et al., 2022; Esquivel-Muelbert et al., 2019). A alta dissimilaridade do quadrante SE em relação aos outros é explicada pela maior riqueza e homogeneidade encontrada nessa região, como discutido anteriormente. Dessa forma, podemos concluir que as condições climáticas diferenciais existentes nessa região selecionam estratégias de vida mais diversas, onde a faixa de ocorrência dos atributos funcionais é mais ampla do que nas regiões NO e CE.

7. Conclusão

O presente estudo elucidou como o gradiente de precipitação presente na bacia amazônica pode influenciar a diversidade funcional em cada uma das regiões analisadas. A riqueza, uniformidade e divergência funcional se mostraram importantes componentes para interpretar como diferentes atributos relacionados à alocação e residência do carbono estão distribuídos ao longo do espaço funcional, e como a precipitação pode ser um dos fatores que modula a ocorrência e distribuição destes atributos.

Esse estudo evidencia a importância de analisar métricas distintas de diversidade, como a diversidade funcional, sendo essa de crucial importância para melhor compreensão do funcionamento da floresta amazônica e como impactos antrópicos e alterações climáticas podem afetar as diferentes regiões da bacia de forma diferencial. Buscando a melhor compreensão de como os fatores abióticos podem influenciar a diversidade funcional dessas regiões, o CAETÊ se mostra uma ótima ferramenta para auxiliar o desenvolvimento de análises subsequentes envolvendo cenários climáticos futuros e como essas alterações podem afetar diferentes regiões da floresta amazônica.

Por fim, identificamos a existência de lacunas na literatura acerca dos componentes da diversidade funcional em florestas tropicais, como a Amazônia, abrindo portas para

futuros estudos que busquem a melhor compreensão de como esses componentes são modulados por diferentes fatores bióticos e abióticos existentes ao longo da bacia amazônica.

8. Cronograma de Execução

Atividade	Período
Revisão Bibliográfica	Maio/2023 – Fevereiro/2024
Análise das simulações no Modelo de Vegetação CAETÊ	Maio/2023 – Agosto/2023
Cálculo da diversidade funcional dos quadrantes	Agosto/2023 – Dezembro/2023
Análises de dados do projeto	Setembro/2023 – Dezembro/2023
Relatório Final	Outubro/2023 – Março/2024

9. Referências

Aguirre-Gutiérrez, J, Oliveras, I, Rifai, S, et al. Drier tropical forests are susceptible to functional changes in response to a long-term drought. *Ecology Letters*, 2019, 22(5), 855-865.

Aguirre-Gutiérrez, J, Berenguer, E, Oliveras Menor, I, et al. Functional susceptibility of tropical forests to climate change. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6(7), 878-889.

Albrecht, RI & Silva Dias, MAF. Características microfísicas da precipitação convectiva e estratiforme associadas à oscilação de larga-escala no sudeste da Amazônia. *Congresso brasileiro de meteorologia*, 2004, Vol. 13.

- Beerling, DJ, Woodward, FI, Lomas, M, et al. Testing the responses of a dynamic global vegetation model to environmental change: a comparison of observations and predictions. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 1997, 439-450.
- Butt, N, Malhi, Y, Phillips, O, et al. Floristic and functional affiliations of woody plants with climate in western Amazonia. *Journal of Biogeography*, 2008, 35(5), 939-950.
- Cadotte, MW, Carscadden, K and Mirotchnick, N. Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services. *Journal of applied ecology*, 2011, 48(5), 1079-1087.
- Carmona, CP, de Bello, F, Mason, NW, et al. Trait probability density (TPD): measuring functional diversity across scales based on TPD with R. *Ecology*, 2019, 100(12), e02876.
- Cierner, C, Boers, N, Hirota, M, et al. Higher resilience to climatic disturbances in tropical vegetation exposed to more variable rainfall. *Nature Geoscience*, 2019, 12(3), 174-179.
- Coutinho, EDC, Rocha, EJPD, Lima, AMM, et al. Variabilidade climática da precipitação na bacia amazônica brasileira entre 1982 e 2012. *Revista Brasileira de Climatologia*, 2018, 22, 476-500.
- de Toledo, JJ, Magnusson, WE & Castilho, CV. Competition, exogenous disturbances and senescence shape tree size distribution in tropical forest: Evidence from tree mode of death in Central Amazonia. *Journal of Vegetation Science*, 2013, 24(4), 651-663.
- Draper, FC, Costa, FR, Arellano, G, et al. Amazon tree dominance across forest strata. *Nature ecology & evolution*, 2021, 5(6), 757-767.

Elmqvist, T, Folke, C, Nyström, M, et al. Response diversity, ecosystem change, and resilience. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(9), 488-494.

Espinoza, JC, Sörensson, AA, Ronchail, J, et al. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2019, 26, 100637.

Esquivel-Muelbert, A, Baker, TR, Dexter, KG, et al. Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology*, 2019, 25(1), 39-56.

Feeley, KJ, Malhi, Y, Zelazowski, P, et al. The relative importance of deforestation, precipitation change, and temperature sensitivity in determining the future distributions and diversity of Amazonian plant species. *Global Change Biology*, 2012, 18(8), 2636-2647.

Foley, JA, Levis, S, Prentice, IC, et al. Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global change biology*, 1998, 4(5), 561-579.

Fonseca, CR and Ganade, G. Species functional redundancy, random extinctions and the stability of ecosystems. *Journal of Ecology*, 2001, 118-125.

Fox, JF. Intermediate-disturbance hypothesis. *Science*, 1979, 204(4399), 1344-1345.

Fyllas, NM, Quesada, CA and Lloyd, J. Deriving plant functional types for Amazonian forests for use in vegetation dynamics models. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, 14(2), 97-110.

Gallo, SC, Cupertino-Eisenlohr, MA, Silva, DRD, et al. Novelties from the herbaceous stratum in a key region for the conservation of the Southern Amazon. *Biota Neotropica*, 2022, 22.

- Getzin, S, Worbes, M, Wiegand, T, et al. Size dominance regulates tree spacing more than competition within height classes in tropical Cameroon. *Journal of Tropical Ecology*, 2011, 27(1), 93-102.
- Gross, N, Bagousse-Pinguet, YL, Liancourt, P, et al. Functional trait diversity maximizes ecosystem multifunctionality. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(5), 0132.
- Herben, T, Klimešová, J & Chytrý, M. Effects of disturbance frequency and severity on plant traits: An assessment across a temperate flora. *Functional Ecology*, 2018, 32(3), 799-808.
- Hofhansl, F, Andersen, KM, Fleischer, K, et al. Amazon forest ecosystem responses to elevated atmospheric CO₂ and alterations in nutrient availability: filling the gaps with model experiment integration. *Frontiers in Earth Science*, 2016, 4, 19.
- Hofhansl, F, Chacón-Madrigal, E, Fuchslueger, L, et al. Climatic and edaphic controls over tropical forest diversity and vegetation carbon storage. *Scientific Reports*, 2020, 10(1), 1-11.
- Kirilenko, AP and Solomon, AM. Modeling dynamic vegetation response to rapid climate change using bioclimatic classification. *Climatic change*, 1998, 38(1), 15-49.
- Kleidon, A, Adams, J, Pavlick, R, et al. Simulated geographic variations of plant species richness, evenness and abundance using climatic constraints on plant functional diversity. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(1), 014007
- Kraft, NJ, Godoy, O and Levine, JM. Plant functional traits and the multidimensional nature of species coexistence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(3), 797802.

Levis, C, Peña-Claros, M, Clement, CR, et al. Pre-Columbian soil fertilization and current management maintain food resource availability in old-growth Amazonian forests. *Plant and Soil*, 2020, 450, 29-48.

Loreau, M. Biodiversity and ecosystem functioning: a mechanistic model. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1998, 95(10), 5632-5636.

Lundholm, JT. Plant species diversity and environmental heterogeneity: spatial scale and competing hypotheses. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 20(3), 377-391.

Malhado, ACM, Ladle, RJ, Whittaker, RJ, et al. The ecological biogeography of Amazonia. *Berkeley Planning Journal*, 2013, 26(1), 217–220.

Mason, NW, Mouillot, D, Lee, WG, et al. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity. *Oikos*, 2005, 111(1), 112-118.

Moi, DA, García-Ríos, R, Hong, Z, et al. Intermediate disturbance hypothesis in ecology: a literature review. *Annales Zoologici Fennici*, 2020, 57 (1-6), 67-78.

Mori, AS, Furukawa, T & Sasaki, T. Response diversity determines the resilience of ecosystems to environmental change. *Biological reviews*, 2013, 88(2), 349-364.

Mouillot, D., Graham, NAJ, Vill'eger, S, et al. A functional approach reveals community responses to disturbances. *Trends Ecol. Evol.*, 2013a, 28 (3), 167–177.

Niu, K, He, JS, Zhang, S, et al. Grazing increases functional richness but not functional divergence in Tibetan alpine meadow plant communities. *Biodiversity and Conservation*, 2016, 25, 2441-2452..

Oliveira, AN, Amaral, LL. Florística e fitossociologia de uma floresta de vertente na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. *Acta Amazonica*, 2004, 34(1), 21-34.

Pavlick, R, Drewry, DT, Bohn, K, et al. The Jena Diversity-Dynamic Global Vegetation Model (JeDi-DGVM): a diverse approach to representing terrestrial biogeography and biogeochemistry based on plant functional trade-offs. *Biogeosciences*, 2013, 10(6), 4137-4177.

Petchey, OL and Gaston, KJ. Functional diversity: back to basics and looking forward. *Ecology letters*, 2006, 9(6), 741-758.

Phillips, OL, Aragão, LE, Lewis, S, et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 2009, 323(5919), 1344-1347.

Pitman, NC, Terborgh, JW, Silman, MR, et al. A comparison of tree species diversity in two upper Amazonian forests. *Ecology*, 2002, 83(11), 3210-3224.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2022, Vienna, Austria.

Reich, PB, Wright, IJ, Cavender-Bares, J, et al. The evolution of plant functional variation: traits, spectra, and strategies. *International Journal of Plant Sciences*, 2003, 164(S3), S143-S164.

Reu, B, Proulx, R, Bohn, K, et al. The role of climate and plant functional trade-offs in shaping global biome and biodiversity patterns. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(4), 570–581.

Reu, B, Zaehle, S, Bohn, K, et al. Future no-analogue vegetation produced by no-analogue combinations of temperature and insolation. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(2), 156–167.

Ricklefs, RE. Environmental heterogeneity and plant species diversity: a hypothesis. *The American Naturalist*, 1977, 111(978), 376-381.

Ricotta, C, Bacaro, G & Moretti, M. A new measure of functional evenness and some of its properties. *PLoS One*, 2014, 9(8), e104060.

Rius, BF, Davelos JP, Fleischer K, et al. Higher functional diversity improves modeling of Amazon Forest carbon storage. *Ecological Modeling*, 2023, 481, 110323.

Sakschewski, B, Von Bloh, W, Boit, A, et al. Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. *Nature climate change*, 2016, 6(11), 1032-1036.

Shanafelt, DW, Dieckmann, U, Jonas, M. Biodiversity, productivity, and the spatial insurance hypothesis revisited. *Journal of Theoretical Biology*, 2015, 380, 426-435.

Siefert, A. Spatial patterns of functional divergence in old-field plant communities. *Oikos*, 2012, 121(6), 907-914.

Silman, MR. Plant species diversity in Amazonian forests. *Tropical rainforest responses to climatic change*, 2011, 285-314.

Silva, DRD, Soares-Lopes, CRA, Gressler, E, et al. Woody vegetation associated with rocky outcrops in Southern Amazonia: a starting point to unveil a unique flora. *Biota Neotropica*, 2020, 20.

- Song, Y, Wang, P, Li, G, et al. Relationships between functional diversity and ecosystem functioning: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 34(2), 85-91.
- Ter Steege, H, Pitman, NC, Sabatier, D. Hyperdominance in the Amazonian tree flora. *Science*, 2013, 342(6156), 1243092.
- Tilman, D, Knops, J, Wedin, D, et al. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 1997, 277(5330), 1300-1302.
- Tilman, D. "Functional diversity." *Encyclopedia of biodiversity*, 2001, 3(1) 109-120.
- Verheijen, LM, Aerts, R, Brovkin, V, et al. Inclusion of ecologically based trait variation in plant functional types reduces the projected land carbon sink in an earth system model. *Global change biology*, 2015, 21(8), 3074-3086.
- Violle, C, Navas, ML, Vile, D, et al. Let the concept of trait be functional!. *Oikos*, 2007, 116(5), 882-892.
- Warszawski, L, Frieler, K, Huber, V, et al. The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): project framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(9), 3228-3232.
- Wright, JP, Naeem, S, Hector, A, et al. Conventional functional classification schemes underestimate the relationship with ecosystem functioning. *Ecology Letters*, 2006, 9(2), 111-120.
- Xing, Y, Chen, M, Dao, J, et al. Fine-root morphology of woody and herbaceous plants responds differently to altered precipitation: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2024, 552, 121570.

Yachi, S & Loreau, M. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: the insurance hypothesis. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 1999, 96, 1463–1468.

Zubieta, R, Saavedra, M, Espinoza, JC. Assessing precipitation concentration in the Amazon basin from different satellite-based data sets. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(7), 3171-3187.