



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
MUSEU PARAENSE EMILIO GOELDI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS – BOTÂNICA
TROPICAL**

ELAINE SUZI NASCIMENTO VIEIRA

**FATORES LOCAIS E ESPACIAIS INFLUENCIAM A DIVERSIDADE BETA DE
MACRÓFITAS NA BAÍA DE CAXIUANÃ (AMAZÔNIA ORIENTAL)**

**BELÉM
2023**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
MUSEU PARAENSE EMILIO GOELDI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS – BOTÂNICA
TROPICAL**

ELAINE SUZI NASCIMENTO VIEIRA

**FATORES LOCAIS E ESPACIAIS INFLUENCIAM A DIVERSIDADE BETA DE
MACRÓFITAS NA BAÍA DE CAXIUANÃ (AMAZÔNIA ORIENTAL)**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, área de concentração Botânica Tropical, da Universidade Federal Rural da Amazônia e do Museu Paraense Emílio Goeldi, Linha de Pesquisa: Ecologia, Manejo e Conservação, como parte das exigências para obter o título de Mestre.
Orientadora: Dra. Thaísa Sala Michelan

BELÉM
2023

Dados Internacionais de Catalogação na
Publicação (CIP) Bibliotecas da Universidade
Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos
pelo(a) autor(a)

V657f Vieira, Elaine Suzi Nascimento

FATORES LOCAIS E ESPACIAIS INFLUENCIAM A DIVERSIDADE
BETA DEMACRÓFITAS NA BAÍA DE CAXIUANÃ (AMAZÔNIA ORIENTAL) /
Elaine Suzi Nascimento

Vieira. - 2023. 26 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências
Biológicas (CB), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da
Amazônia, Belém, 2023.

Orientador: Profa. Dra. Thaísa Sala Michelan

1. Plantas Aquáticas. 2. Aninhamento. 3. Turnover. 4. Biodiversidade
Aquática. I. Michelan, Thaísa Sala, *orient.* II. Título

CDD 581.76



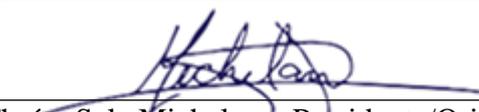
**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES UNIVERSIDADE
FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA MUSEU PARAENSE EMILIO GOELDI
PROGRAMA DE PÓS- GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS – BOTÂNICA
TROPICAL**

ELAINE SUZI NASCIMENTO VIEIRA

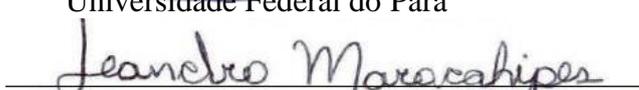
**FATORES LOCAIS E ESPACIAIS INFLUENCIAM A DIVERSIDADE BETA DE
MACRÓFITAS NA BAÍA DE CAXIUANÃ (AMAZÔNIA ORIENTAL)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA e do Museu Paraense Emílio Goeldi, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Botânica Tropical, na Linha de Pesquisa em Ecologia, Manejo e Conservação, para a obtenção do Título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA



Dr.^a Thaísa Sala Michelin – Presidente/Orientadora
Universidade Federal do Pará



Dr. Leandro Maracahipes dos Santos - 1º Examinador
Universidade Estadual de Campinas



Dr. Divino Vicente Silvério - 2º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia



Dr.^a Danielle Katharine Petsch - 3º Examinador
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dedico esse trabalho assim como a todos de minha vida, aos meus amores: Augusto e Gabriela.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

O mesmo também foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, e Edital FAPESPA 016-2014: “Diversidade beta de comunidades aquáticas em igarapés da Amazônia Oriental” agradeço pela oportunidade e fomento da pesquisa e bolsa de estudos. Agradeço ao Museu Paraense Emílio Goeldi, a Coordenação do curso de Pós-Graduação de Botânica Tropical (PPGBOT), a todos professores e colegas e em especial, minha Orientadora Dra. Thaísa Michelan.

A minha gratidão é primeiramente a Deus, que me sustentou até aqui e que diante de tantas incertezas permitiu que eu chegasse até esse momento.

Desde muito cedo descobri que a vida não era leve nem fácil. Contudo, graças a grandes pessoas hoje estou aqui. Às vezes me sentindo um peixe fora d’água, mas com a certeza de que grandes pessoas me deram o oceano para viver. Hoje minha gratidão e imenso carinho é a todos que fizeram parte da construção da minha história. Foram muitos anjos que atravessaram meu caminho e seguiram segurando firme em minhas mãos.

Ao meu marido Augusto e minha filha Gabriela, por me fazerem superar traumas e me erguer quando não via nada que pudesse me levantar. A minha Ivone, a mãe que a vida me presenteou que foi sempre a maior incentivadora dos meus sonhos, a flor mais linda do meu jardim. Aos meus irmãos Eliane e Junior que apesar das minhas falhas sempre me admiraram e esperavam de mim a vitória. A minha mãe Neci, por ter me feito forte e resiliente. Padre Bruno Secchi (*in memoriam*), aquele que me deu a oportunidade de viver dignamente! A República de Emaús, acasa que me educou e conduziu enquanto criança e adolescente, minha gratidão e eterno carinho.

Na Universidade, pessoas maravilhosas e professores fantásticos. Agradeço aos colegas do Laboratório de Produtores primários - ECOPRO-UFGA, em especial, Dilene, Luiz, Raissa: sempre solícitos e acolhedores. À Franciele, que colaborou desde as primeiras linhas e que nem tenho palavras suficientes para agradecer. Agradeço muito de coração. A vocês minha eterna gratidão. A vida, nem sempre doce, nem sempre leve, muitas vezes nos fragiliza. Contudo, a todos que estiveram comigo nesse e nos demais momentos deixo aqui meus agradecimentos. Muito obrigada mesmo por poder contar com vocês, mais uma vez e sempre.

SUMÁRIO

ABSTRACT

1. CONTEXTUALIZAÇÃO	9
2. FATORES LOCAIS E ESPACIAIS INFLUENCIAM A DIVERSIDADE BETA DE MACRÓFITAS NA BAÍA DE CAXIUANÃ (AMAZÔNIA ORIENTAL)	10
2.1 INTRODUÇÃO	10
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	13
2.2.1 Descrição da área	13
2.2.2 Amostragem de macrófitas	14
2.2.3 Análise de dados	14
2.3 RESULTADOS	15
2.3.1 Caracterização das variáveis ambientais.	15
2.3.2 Caracterização da comunidade	16
2.3.3 Relação da diversidade beta total e seus componentes com as variáveis ambientais	17
2.4 DISCUSSÃO	19
2.5 CONCLUSÃO	22
REFERÊNCIAS	23

ABSTRACT

Understanding the patterns that determine species diversity among different localities arouses scientific interest, especially in the Amazon, which is one of the largest holders of biodiversity on the planet. Diversity patterns vary according to spatial scale, and beta diversity has been the focus of ecology in understanding community structure. Thus, the objective of this work was to analyze the beta diversity of macrophytes and their components in a region in the Caxiuanã National Forest (Eastern Amazon) and to investigate which environmental factors determine the change in species composition among the sampled sites. Our hypothesis is that spatial factors such as geographical distance and local factors (such as temperature, turbidity, conductivity, dissolved oxygen, depth and pH) influence macrophyte diversity in the Anapu River, Caxiuanã National Forest. For this purpose we collected macrophytes at 45 sites in a black water river (Rio Anapu). The species composition was determined by observation and recording of species. We measured limnological variables of the water and estimated the transparency of the water column. Aquatic macrophyte species responded well to physicochemical variations by changing species composition between sites, leading to higher beta diversity. This change was mainly due to species replacement (turnover) or at the expense of species loss and gain (nesting). In addition, the geographical distance between sites, electrical conductivity, turbidity, and pH were responsible for structuring the macrophyte community, corroborating our hypothesis. Our work brings new information about the patterns of macrophyte beta diversity in Amazonian ecosystems and especially in blackwater rivers. Besides helping to better understand the processes that structure the change in macrophyte species composition in these environments, it can also serve as a basis for future studies that address conservation.

Keywords: Aquatic plants. Nesting. Turnover. Aquatic biodiversity

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Compreender os padrões que determinam a diversidade de espécies entre diferentes localidades desperta interesse científico, principalmente na Amazônia, que é uma das maiores detentoras de biodiversidade do planeta. Os padrões de diversidade variavam de acordo com a escala espacial, e a diversidade beta tem sido o foco da ecologia na compreensão da estrutura das comunidades.

Assim, o objetivo desse trabalho foi analisar a diversidade beta de macrófitas e seus componentes em uma região na Flona de Caxiuanã (Amazônia Oriental) e investigar quais são os fatores ambientais que determinam a mudança na composição de espécies entre os locais amostrados. Nossa hipótese é que fatores espaciais como a distância geográfica e fatores locais como (temperatura, turbidez, condutividade, oxigênio dissolvido, profundidade e pH) influenciam a diversidade de macrófitas no Rio Anapu, Flona de Caxiuanã. Para isso coletamos as macrófitas em 45 pontos em um rio de água preta (rio Anapu).

A composição de espécies foi determinada através da observação e registro das espécies. Mensuramos variáveis limnológicas da água e estimamos a transparência da coluna de água. As espécies de macrófitas aquáticas responderam bem as variações físico-químicas através da mudança na composição de espécies entre os locais, o que leva a uma maior diversidade beta. Essa mudança foi devida principalmente à substituição das espécies (turnover) ou em detrimento da perda e ganho de espécies (aninhamento). Além disso a distância geográfica entre os pontos, a condutividade elétrica, turbidez e pH foram os responsáveis por estruturar a comunidade de macrófitas, corroborando nossa hipótese.

Nosso trabalho traz novas informações sobre os padrões de diversidade beta de macrófitas em ecossistemas amazônicos e especialmente em rios de água preta. Além de auxiliar no melhor entendimento de processos que estruturam a mudança na composição de espécies de macrófitas nesses ambientes, também podem servir de base para estudos futuros que abordem conservação.

2. FATORES LOCAIS E ESPACIAIS INFLUENCIAM A DIVERSIDADE BETA DE MACRÓFITAS NA BAÍA DE CAXIUANÃ (AMAZÔNIA ORIENTAL)

2.1. INTRODUÇÃO

A Amazônia é responsável por uma imensa biodiversidade de fauna e flora, no entanto, também é alvo de grandes impactos por exploração de seus recursos (CASTELLO; MACEDO, 2016; GARDNER et al., 2013). Há grande sobreposição de áreas de grande diversidade com áreas de interesse econômico, aumentando ainda mais as pressões e conduzindo ao aumento das alterações antrópicas. Portanto, é importante a compreensão dos vários processos e mecanismos estruturadores das comunidades entre diferentes localidades no bioma Amazônico. Esses estudos despertam o interesse de toda comunidade científica e sociedade em geral, pois sabe-se que ações humanas podem provocar a perda de espécies e alterar o funcionamento desse ecossistema (DE PAIVA et al., 2021; FARES et al., 2020; LIMA et al., 2022). Dessa maneira, é fundamental o estudo dos diversos fatores que determinam a diversidade de espécies e como estas respondem às variações ambientais. Isso poderá auxiliar em estratégias de conservação e manejo desses ecossistemas (HEINO et al., 2015).

A ecologia de comunidades tem como objetivo explicar padrões de distribuição de abundância e as interações entre as espécies (TOWNSEND C.R., 2006). Os padrões de diversidade variam de acordo com a escala espacial possibilitando sua decomposição em três níveis de diversidade, segundo Whittaker (1972): A diversidade alfa ou local, que é o número de espécies em uma localidade; a diversidade beta, que é a variação na composição de espécies entre as comunidades de diferentes locais (MAGURRAN, 2004) e a diversidade gama ou regional, que é o número total de espécies observadas em todos os habitats estudados de uma região. Em estudos atuais, a diversidade beta tem sido o foco dos ecólogos, a fim de aumentar a compreensão da diversidade de espécies e tentar implementar medidas de conservação eficazes (HEINO; MELO; BINI, 2015). A beta diversidade é um fator chave para entender o funcionamento dos ecossistemas tropicais e a causa de sua diversidade (CONDIT et al., 2002).

Vários fatores são considerados importantes para compreender a beta diversidade. A exemplo, a “hipótese da heterogeneidade do ambiente” (SIMPSON, 1949; MACARTHUR E WILSON 1967), o qual postula que condições ambientais mais heterogêneas favorecem mais nichos. Estas condições levariam ao aumento da diversidade (TEWS et al., 200).

São consideradas determinantes da diversidade beta, as variáveis bióticas e abióticas que agem como filtros ambientais selecionando as espécies que se estabelecem em

determinada comunidade, além dos fatores estocásticos (extinção e colonização) (BASELGA; BONTHOUX; BALENT, 2015; CHASE; MYERS, 2011). Isso acontece porque a distribuição das espécies está limitada a locais que possuem condições ambientais que contemplem as exigências do seu nicho ecológicos (HUTCHISON, 1957). Como na maioria das vezes as condições ambientais são variadas na paisagem ou estão distribuídas em manchas como prediz a teoria do Habitat Template (SOUTHWOOD, 1977). A premissa desta teoria propõe que variedades, como por exemplo a variedade espacial do habitat físico que influencia na história de vida (trade offs) das espécies (MIATELO, ASSAL, SANTOS, LIMA Jr. 2007). Portanto, os padrões de distribuições das espécies também dependem das variáveis ambientais.

A diversidade beta é uma métrica importante para mensurar essa variação e pode ser particionada em dois componentes diferentes: turnover e aninhamento (BASELGA, 2010). O turnover seria a variação natural que ocorre na composição de espécies em virtude das diferenças que existem entre eles, já o aninhamento ocorre em virtude de uma perda ou ganho de diversidade, onde locais representam apenas um subconjunto das espécies registradas em locais maior biodiversos. A análise da diversidade beta e seus componentes nos permite testar os processos ecológicos que estruturam as comunidades (VILLÉGER; GRENOUILLET; BROSSE, 2013).

Em ambientes aquáticos, as macrófitas representam uma forma de estruturação do ambiente, aumentando a diversidade de habitat, favorecendo a heterogeneidade ambiental e facilitando nichos (DECLERCK et al., 2007; DEOSTI et al., 2021; WARFE; BARMUTA, 2006). Isso porque essas plantas aquáticas são responsáveis por oferecer abrigo e alimento para diversas formas de vida, além de serem grandes produtoras primárias, assim como também favorecem os ecossistemas nas regiões alagadas da Amazônia desempenhando diversas funções (PIEDEDE et al., 2010). As macrófitas aquáticas podem ser influenciadas por interações biológicas, como competição e herbivoria, mas essa comunidade responde principalmente a fatores relacionados às características da água e do substrato, alterando a composição de espécies entre os locais em resposta as propriedades físicas e químicas dos ambientes onde estão (POZZOBOM et al., 2020).

As variáveis ambientais são fatores abióticos que podem explicar a composição e diversidade de espécies em ambientes aquáticos. Para comunidades de macrófitas aquáticas diversos fatores podem influenciar sua distribuição espacial, tais como disponibilidade de nutrientes, oxigênio, disponibilidade de luz entre outras, são variáveis geralmente relacionadas

à distribuição dessa comunidade vegetal. (BARENDREGT e BIO, 2003). A temperatura da água influencia a densidade, viscosidade e movimentos de convecção da água. (PEDROZO e KAPUSTA, 2010). Naturalmente, este parâmetro pode ser afetado pela incidência de luz solar, sombreamento das árvores, profundidade da coluna d'água, além da transferência de calor por radiação, condução e convecção. O aumento da temperatura pode reduzir a quantidade de oxigênio dissolvido na água (ESTEVES et al., 2011). A turbidez pode ser definida como grau de interferência com a passagem da luz através da água, devido à presença de sólidos em suspensão. O aumento da turbidez pode influenciar na penetração de luz nos ambientes aquáticos e conseqüentemente na fotossíntese de plantas aquáticas (PEDROZO e KAPUSTA, 2010). Dentre os gases dissolvidos na água, o oxigênio (O₂) é um dos mais importantes na dinâmica e na caracterização de ecossistemas aquáticos (ESTEVES et al., 2011).

Na Amazônia, rios de água preta tem comumente o pH mais baixo. Os valores mais baixos de pH são encontrados nos corpos d'água localizados na região de sedimentos da Formação Barreiras, da terra firme, que apresentam valores variando entre 4,0 e 5,5. (SIOLI, 1975). O pH está envolvido em diversos processos metabólicos dos organismos aquáticos e é uma das variáveis abióticas importantes na composição das comunidades de plantas aquáticas.

Determinar quais os fatores que são responsáveis pela mudança na composição de espécies de macrófitas aquáticas pode ajudar na compreensão do funcionamento desses ecossistemas e avaliar possíveis riscos a sua conservação. Neste trabalho estudaremos a diversidade beta de macrófitas e seus componentes na Flona de Caxiuanã, na Amazônia Oriental, e investigaremos quais são os fatores ambientais que determinam a mudança na composição de espécies na escala espacial. Testamos a hipótese de que os fatores espaciais como a distância geográfica e os fatores locais (temperatura, turbidez, condutividade, oxigênio dissolvido, profundidade e pH) influenciam a diversidade de macrófitas no Rio Anapu, alterando a diversidade beta total e de seus componentes.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Descrição da área

O estudo foi realizado no baixo Anapu, nas margens direita e esquerda da Baía dos Botos na Floresta Nacional de Caxiuanã, entre os rios Tocantins e Xingu, Amazônia Oriental, nos municípios de Melgaço e Portel (Pará – Brasil; Figura 1). A baía é formada por fraturas que foram alargadas pela erosão das vertentes, aprofundadas pelas sucessivas regressões marinhas e “afogadas” pela subsequente elevação do nível do mar, conhecido como um ambiente de ria fluvial (IBGE, 2017), sofrendo influências diárias da maré e anuais com os períodos de cheia esca da região norte.

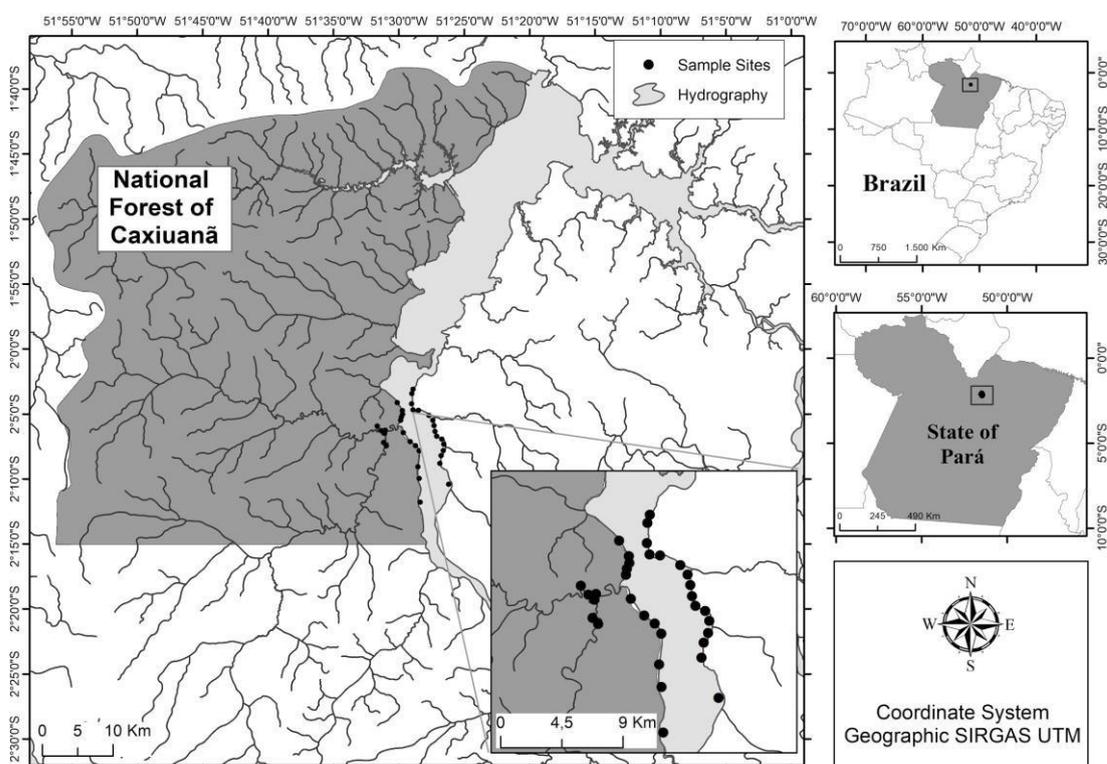


Figura 1: Mapa com os pontos coletados no Rio Anapu, estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil.

Na baía dos Botos, bancos de macrófitas exercem papel importante sobre a diversidade de várias espécies da fauna e flora. A baía dos Botos possui extensas dimensões, com aproximadamente 8 km de largura e 40 km de extensão. Pela classificação climática de Köppen, o clima é do tipo “Am” tropical quente e úmido. A temperatura varia em torno de 26,7° C, com mínimas próximas a 22° C e as máximas próximas a 32° C. As temperaturas médias mais baixas e umidade alta ocorrem nos meses de janeiro a março, as mais quentes e menos úmidas ocorrem entre os meses de outubro, novembro e dezembro (LISBOA, 2002). O Rio Anapu, assim como muitos rios amazônicos possui características dos rios de água preta. A água preta é

extremamente pobre em sais minerais, nutrientes e eletrólitos devido à pouca movimentação e ao suave relevo das suas regiões de origem (LISBOA, 2002). O baixo conteúdo de íons somado à presença das substâncias húmicas confere às águas negras um caráter ácido com valores de pH baixos (entre 4,8 e 5,10).

2.2.2 Amostragem de macrófitas

As amostragens ocorreram no período de setembro a outubro de 2017, onde foram amostrados 45 pontos no rio Anapu. Cada ponto estava a uma distância mínima de 1 km um do outro nas margens direita e esquerda do rio. A composição de espécies (presença e ausência) foi determinada através da observação e registro das espécies. As macrófitas foram inicialmente identificadas no campo, o material não identificado foi coletado e posteriormente identificado por meio de literatura especializada (POTT e POTT, 2000). As espécies foram também classificadas em formas de vida segundo Cook (1996).

Utilizando uma sonda multiparâmetros, foram mensuradas a temperatura da água (°C), pH, condutividade elétrica (mS cm^{-1}) e oxigênio dissolvido (mg L^{-1}). A transparência da coluna de água (m) foi determinada por meio do disco de Secchi e a zona eufótica (Zeu) calculada como sendo 2,7 vezes a profundidade do disco de Secchi (COLE, 1994). A profundidade máxima (Zmax) foi determinada e a relação Zeu:Zmax usada como medida de disponibilidade luminosa.

2.2.3 Análises de dados

Em nosso estudo cada ponto de amostragem corresponde a uma unidade amostral, totalizando 45 amostras no rio Anapu. Realizamos uma Análise de Componentes Principais (PCA) para verificar a explicação das variáveis ambientais no conjunto de dados. Como método de seleção dos eixos foi usado o critério de Broken Stick.

A diversidade beta total e seus componentes foram calculados seguindo o método proposto por (BASELGA, 2010). Sendo calculados três métricas de dissimilaridade: 1) “jac” - índice de dissimilaridade de Jaccard e representa a variação total de espécies entre as comunidades, 2) “jne” - representa o componente aninhamento que corresponde a perda de espécies em uma comunidade e 3) “jtu” - que representa o componente turnover, ou seja, a substituição de espécies nos ambientes. Para esses cálculos utilizamos uma matriz de presença e ausência e a função ‘beta.div.comp’ do pacote “adespatial” (DRAY et al., 2020). Para analisar quais fatores locais e espaciais influenciam a diversidade beta total e seus componentes, realizamos uma análise de Modelagem de Dissimilaridade Generalizada (GDM) (FERRIER et al., 2007). A GDM é baseada em regressão de matrizes, técnica essa que possibilita relacionar

uma matriz de dissimilaridade com variáveis ambientais e controlar a influência da variação espacial no conjunto de dados. Assim, nesta análise utilizamos as matrizes de diversidade beta total, turnover e aninhamento como variáveis resposta e uma matriz com dados de coordenadas geográficas e variáveis físico-químicas como preditores. Para essa análise foram utilizadas as funções ‘gdm’ e ‘gdm.varImp’ do pacote “gdm”(FITZPATRICK et al., 2020). Todas as análises foram realizadas no programa R (R Core Team2020) e o valor de significância foi considerado $p < 0,05$.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Caracterização das variáveis ambientais

Foi observado um gradiente das variáveis ambientais analisadas entre os pontos do rio Anapu. A turbidez foi a variável que apresentou maior variação, seguida do oxigênio dissolvido (Tabela 1).

Tabela 1: Média \pm desvio padrão, mínimo e máximo das variáveis ambientais analisadas no rio Anapu (Amazônia Oriental):

Variáveis Ambientais	Média \pm Desvio padrão	Mínimo e Máximo
Temperatura (°C)	30,7 \pm 0,95	29,4 – 33,2
pH	5,83 \pm 0,39	4,48 – 6,39
Condutividade (mS/cm)	0,013 \pm 0,004	0,01 – 0,04
Turbidez (NTU)	0,975 \pm 1,93	0 – 7,1
Oxigênio (mg / L)	4,75 \pm 0,98	3,17 – 8,42
Profundidade (m)	0,35 \pm 0,09	0 – 0,55

A Análise de Componentes Principais explicou em seu primeiro eixo 56.5% da variação total dos dados. De acordo com o critério de Broken Stick os dois primeiros eixos foram analisados. As variáveis que mais contribuíram para a formação do primeiro eixo, foram condutividade relacionando positivamente e a profundidade relacionando negativamente. Para o segundo eixo, o pH foi mais relacionando positivamente e a turbidez relacionada negativamente (Tabela 2, Figura 2).

Tabela 2: Variáveis ambientais e suas correlações com os dois primeiros eixos da Análise de Componentes Principais.

	DIM.1	DIM.2
TEMPERATURA	0,758	-0,246
CONDUTIVIDADE	0,805	0,231
TURBIDEZ	0,396	-0,942
OXIGÊNIO	0,565	0,643
PROFUNDIDADE	-0,720	0,104
PH	0,334	0,788
AUTOVALOR	2,414	1,065
BROKEN STICK	2,083	1,053
% EXPLICAÇÃO	36,40	20,1

*Valores em negrito representam as variáveis com maior contribuição na formação dos eixos.

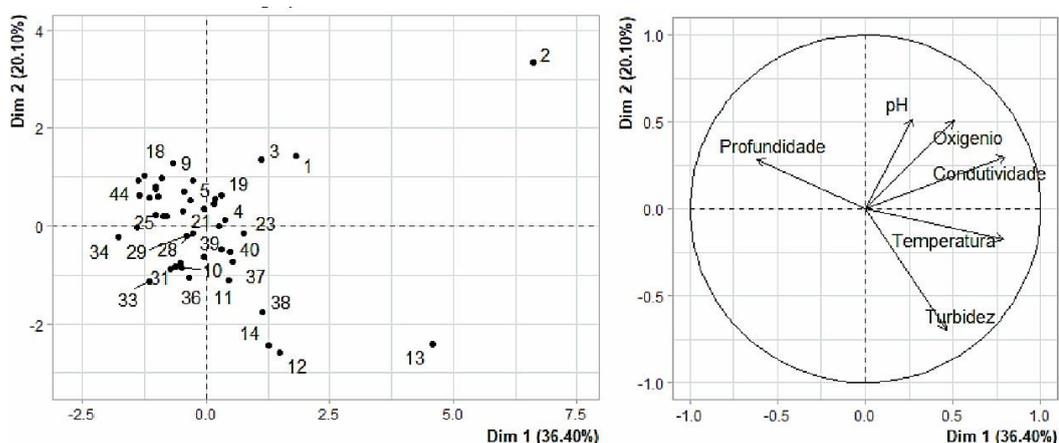


Figura 2 - Ordenação das variáveis ambientais por pontos de coleta pela Análise de Componentes Principais (PCA).

2.3.2 Caracterização da comunidade

Foram identificadas 16 espécies de macrófitas aquáticas e 13 famílias botânicas como descrito na tabela 3. Os grupos morfológicos mais frequentes foram espécies flutuantes livres (7ssp), seguidos de emergentes (3 spp.). Contudo foram identificadas espécies enraizadas com folhas flutuantes (2 spp.), submersas (2 spp.), epífitas (1 spp.) e lianas (1 spp.). A diversidade beta total de macrófitas foi de 0,29. O componente turnover teve maior contribuição com 0,18 (62,07 %) e o componente aninhamento foi de 0,11 (37,93 %).

Tabela 3: Lista de espécies de macrófitas aquáticas.

Família	Espécie	Grupo morfológico
Poaceae	<i>Paspalum</i> sp	Emergente
Cyperaceae	<i>Oxycaryum cubense</i> (Poepp. & Kunth)	Epífita
Araceae	<i>Pistia stratiotes</i> (L.)	Flutuante livre
	<i>Salvinia auriculata</i> (Aubl)	Flutuante livre
Salviniaceae	<i>Salvinia minima</i> (Baker)	Flutuante livre
	<i>Salvinia biloba</i> (Raddi)	Flutuante livre
Pontederiaceae	<i>Eichornia crassipes</i> (Mart.)	Flutuante livre
	<i>Eichornia azurea</i> (Sw.) Kunth	Enraizada com folha flutuante
Hydrocharitaceae	<i>Limnobium laevigatum</i> (Humb. & Bonpl.)	Flutuante livre
Azollaceae	<i>Azolla</i> sp.	Flutuante livre
Fabaceae	<i>Vigna</i> sp.	Emergente
Ceratophyllaceae	<i>Ceratophyllum</i> sp.	Submersa
		Enraizada com
Nymphaeaceae	<i>Nymphaea amazonum</i> (Mart. & Zucc.)	folha flutuante
Cabombaceae	<i>Cabomba furcata</i> (Shult. & Shult. F.)	Submersa
Convolvulaceae	<i>Ipomoea</i> cf. <i>asarifolia</i> Desr	Liana
	<i>Alternanthera philoxeroides</i> (Mart.)	Emergente
Amaranthaceae	Griseb.	

Fonte: ECOPRO

Figura 3: Diversidade beta total taxonômica particionada em turnover e aninhamento.

2.3.3 Relação da diversidade beta total e seus componentes com as variáveis ambientais

O modelo de regressão da GDM explicou 25,51% ($p < 0,001$) da variação da diversidade beta total. De todas as variáveis testadas, apenas a distância geográfica entre os pontos (55,36%, $p = 0,01$) e a condutividade (12,23%, $p = 0,01$) influenciaram significativamente a diversidade beta total. A inclinação da reta mostrou que um pequeno incremento na condutividade já foi suficiente para aumentar a diversidade beta total e depois houve uma estabilização (Figura 3a).

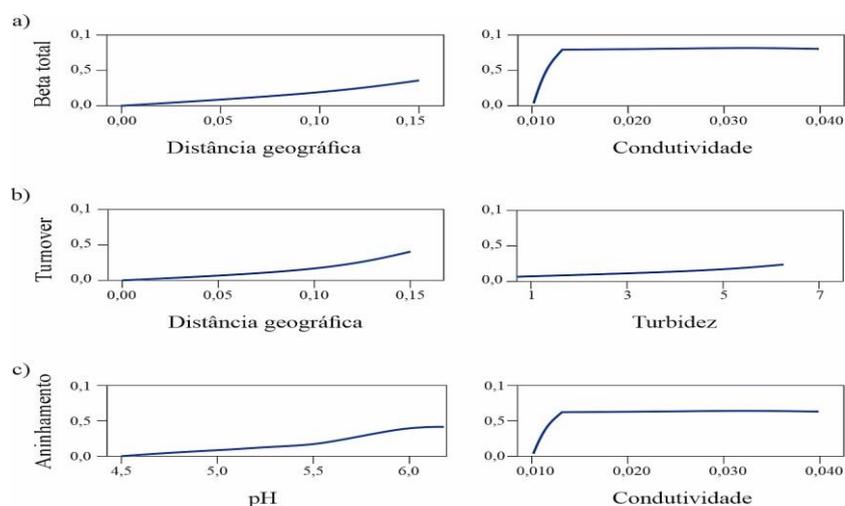


Figura 3: Partição da diversidade beta na comunidade de macrófitas: (a) Diversidade beta total; (b) Turnover e (c) Aninhamento.

Todas as variáveis explicaram 6,53% ($p < 0,001$) da variação do turnover no modelo da GDM, sendo que dessa porcentagem a distância geográfica explicou 12,23% e a turbidez 5,35% e foram as únicas com valores significativos ($p=0,01$). O incremento do turnover em relação a turbidez se deu a partir de 5, com uma relação positiva e tendência crescente (Figura 3b). Já para o aninhamento, o modelo da GDM explicou 16,63% ($p < 0,001$) da sua variação, sendo que esse componente foi significativamente relacionado com a condutividade (71,21%, $p=0,01$) e com o pH (20,17%, $p=0,01$). Um pH a partir de 5,0 levou a um incremento no aninhamento levando a uma heterogeneização da comunidade, porém após 6,0 houve uma tendência de estabilização, enquanto um pequeno incremento na condutividade foi suficiente para aumentar o aninhamento que depois estabilizou (Figura 3c).

2.4 DISCUSSÃO

As espécies de macrófitas aquáticas são indicadoras das condições ambientais respondendo as variações físico-químicas através da mudança na composição de espécies entre os locais, o que leva a uma maior diversidade beta (AKASAKA et al., 2010; MORMUL et al., 2015; POZZOBOM et al., 2020). Essa mudança pode ser devido a substituição das espécies (turnover) ou a perda e ganho de espécies (aninhamento). No nosso trabalho foi observado valores de diversidade beta com maior contribuição da substituição de espécies. Além disso, a distância geográfica entre os pontos, a condutividade elétrica, turbidez e pH foram responsáveis por estruturar a comunidade de macrófitas, o que corrobora com nossa hipótese. Dessa forma o que está causando a variação da heterogeneidade de composição de macrófitas é o aumento da distância geográfica e a turbidez. Por outro lado, o que provoca um aumento da similaridade ou perda de diversidade é o aumento do pH indo em direção de águas mais básicas e valores baixos de condutividade.

Uma maior distância entre os pontos induziu maior diversidade beta total e maior turnover, o que é esperado quando se analisa diversidade beta (AMARAL; BOMFIM; LANSAC-TÔHA, 2022; PELÁEZ; PAVANELLI, 2019). Isso porque um maior gradiente espacial leva a maior heterogeneidade ambiental, i.e., maior variação das características locais e consequentemente maior disponibilidade de diferentes nichos (HEINO; MELO; BINI, 2015; STEIN; GERSTNER; KREFT, 2014). Enquanto que, uma maior disponibilidade de nichos induz maior ocorrência de espécies e a uma diferença na composição entre locais (STEIN; GERSTNER; KREFT, 2014), como observado. Além disso, maiores distâncias também podem criar dificuldades ou barreiras para a dispersão das espécies e, portanto, também contribuir para a diminuição da similaridade de composição. Isso ocorre porque maior a distância geográfica existente entre dois pontos, menor a dispersão entre esses locais.

A condutividade elétrica foi outro fator que influenciou a diversidade beta total e o aninhamento. A condutividade representa a quantidade de íons na água, sendo relacionada à presença de macronutrientes, substâncias húmicas (em baixo pH (< 5)) e processos de decomposição (ESTEVES, 2011). Em ambientes pobres de nutrientes como o rio de água preta estudado, a condutividade pode representar uma fonte de nutrientes essenciais (mesmo que em pouca quantidade) para o desenvolvimento das espécies de macrófitas o que pode ter levado a maiores valores de diversidade beta. Outros estudos reforçam nossos resultados, mostrando que a condutividade elétrica influencia a ocorrência de macrófitas (LOLIS et al., 2020; PEREIRA

et al., 2012). Porém vale ressaltar que em nosso estudo, baixo valores de condutividade, provocaram um aninhamento da comunidade, representando que a variação da diversidade beta foi causada, porque muitos locais com baixos valores de condutividade representam apenas subconjuntos de diversidade daqueles locais com maior condutividade.

A turbidez está relacionada a partículas presentes na água e altera a entrada de luz na coluna d'água (ESTEVEVES, 2011). A luz é um fator limitante para diversas espécies de plantas, incluindo as macrófitas, o que pode levar a alterações na composição dessas espécies (POZZOBOM et al., 2020), como observado. Uma baixa turbidez favorece o desenvolvimento de espécies submersas (PEREIRA et al., 2012), enquanto que uma maior turbidez pode excluir espécies de macrófitas submersas e dar espaço para espécies flutuantes, emergentes e anfíbias (PEREIRA et al., 2012). No nosso estudo a turbidez da água levou a uma maior substituição de espécies (turnover), demonstrando o favorecimento de diferentes espécies no gradiente de turbidez analisado.

Outra variável que influenciou o aninhamento de espécies (perda e ganho) foi o pH. Nosso sistema de estudo (rio Anapu), possui baixo conteúdo de íons somado a presença das substâncias húmicas, o que confere as suas águas pretas um caráter ácido com valores de pH baixos (entre 4,8 e 5,10). O pH está envolvido em diversas reações metabólicas nos ecossistemas aquáticos (ESTEVEVES, 2011) e pode agir como um filtro selecionando espécies que possuam resistência àquelas condições, sejam elas extremas ou amenas. Logo, um gradiente de pH, pode de fato induzir a perda ou ganho de espécies dependendo das características intrínsecas dessas espécies, se elas são capazes de realizar suas funções metabólicas naquelas condições, isso foi o que possivelmente ocorreu nos ambientes estudados, apenas espécies resistentes a baixo/alto pH se desenvolveram, gerando diferença na composição entre os locais. Observamos que quando o pH aumenta, acima de 5 se direcionando a águas mais básicas, ocorre um maior aninhamento das comunidades, o que pode contribuir para uma diminuição da biodiversidade do local amostrado.

Os componentes da diversidade beta (turnover e aninhamento) podem ser influenciados tanto por processos estocásticos quanto determinísticos (BASELGA; BONTHOUX; BALENT, 2015). No nosso estudo diversos fatores locais influenciaram a estrutura da comunidade de macrófitas, demonstrando que possivelmente processos de nicho (determinísticos) estavam agindo e alterando a composição de espécies. No entanto, a baixa explicação dos modelos, especialmente do turnover, pode também demonstrar a influência

de processos estocásticos agindo (deriva ecológica e/ou limitação na dispersão). Além disso, outros fatores como a interação biológica também são conhecidos por afetarem o padrão de coocorrências das espécies e em razão disso, afetar também os padrões de biodiversidade (MICHELAN et al. 2018). No entanto, não podemos deixar de mencionar que outras métricas não mensuradas em nosso estudo também podem ser importantes para a comunidade de macrófitas e poderia explicar esse baixo valor de explicação.

2.5. CONCLUSÃO

Nosso trabalho traz novas informações sobre os padrões de diversidade de macrófitas em ecossistemas amazônicos e especialmente em rios de água preta. Vimos no nosso estudo a importância das variáveis ambientais como distância geográfica e a condutividade elétrica para diversidade beta de macrófitas aquáticas na região da baía dos Botos (Amazônia Oriental). Além de auxiliar no melhor entendimento de processos que estruturam a mudança na composição de espécies de macrófitas nesses ambientes (turnover e aninhamento), o que pode ser levando em consideração em estudos futuros que abordem conservação. Como possíveis sugestões para novos estudos, sugerimos inserir interações ecológicas entre as espécies e a inserção de outras métricas ambientais, buscando reduzir a porcentagem de variação da diversidade beta que não foi explicada com a aplicação da Modelagem de Dissimilaridade Generalizada (GDM).

REFERÊNCIAS

- AKASAKA, M.; TAKAMURA, N.; MITSUHASHI, H.; KADONO, Y. Effects of land use on aquatic macrophyte diversity and water quality of ponds. **Freshwater Biology**, [S. l.], v. 55, p. 909–922, 2010.
- AMARAL, Diogo C.; BOMFIM, Francieli F.; LANSAC-TÔHA, Fábio A. Environmental heterogeneity drives the distribution of copepods (Crustacea: Copepoda) in the Amazon, Araguaia, Pantanal, and Upper Paraná floodplains. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S. l.], v. 94, n. 2, 2022. ISSN: 16782690. DOI: 10.1590/0001-3765202220191260.
- BASELGA, Andrés. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. **Global Ecology and Biogeography**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 134–143, 2010. ISSN: 1466822X. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2009.00490.x.
- BASELGA, Andrés; BONTHOUX, Sébastien; BALENT, Gérard. Temporal beta diversity of bird assemblages in agricultural landscapes: Land cover change vs. stochastic processes. **PLoS ONE**, [S. l.], v. 10, n. 5, 2015. ISSN: 19326203. DOI: 10.1371/journal.pone.0127913.
- BARENDREGT, Aat; BIO, Ana M. F. 2003. Relevant variables to predict macrophytes communities in running waters. *Ecological Modelling*, 160: 205 – 217.
- CADOTTE, Marc W.; CARSCADDEN, Kelly; MIROTCHEV, Nicholas. Beyond species: Functional diversity and the maintenance of ecological processes and services. **Journal of Applied Ecology**, [S. l.], v. 48, n. 5, p. 1079–1087, 2011. ISSN: 00218901. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2011.02048.x.
- CASTELLO, L.; MACEDO, M. N. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. **Global Change Biology**, [S. l.], v. 22, p. 990–1007, 2016.
- CHASE, Jonathan M.; MYERS, Jonathan A. Disentangling the importance of ecological niches from stochastic processes across scales. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [S. l.], v. 366, n. 1576, p. 2351–2363, 2011. ISSN: 09628436. DOI: 10.1098/rstb.2011.0063.
- COLE, Gerald A., 1994. Textbook of limnology. Illinois: Waveland Press.
- COOK, Christopher. D. K.. Aquatic plant book. Amsterdam & New York: SPB Academic Publ.1996. 288 p.
- DE PAIVA, Carina Kaory Sasahara; FARIA, Ana Paula Justino; CALVÃO, Lenize Batista; JUIEN, Leandro. The anthropic gradient determines the taxonomic diversity of aquatic insects in Amazonian streams. **Hydrobiologia**, [S. l.], v. 848, n. 5, p. 1073–1085, 2021. ISSN: 15735117. DOI: 10.1007/s10750-021-04515-y.
- DECLERCK, S.; VANDERSTUKKEN, M.; PALS, A.; MUYLAERT, K.; DE MEESTER, L. Plankton Biodiversity Along a Gradient of Productivity and Its Mediation By Macrophytes. **Ecology**, [S. l.], v. 88, n. 9, p. 2199–2210, 2007. ISSN: 0012-9658. ISBN: 0012-9658. DOI: 10.2307/27651359.
- DEOSTI, Sabrina; BOMFIM, Francieli de Fátima; LANSAC-TÔHA, Fernando Miranda; QUIRINO, Bárbara Angélio; BONECKER, Claudia Costa; LANSAC-TÔHA, Fábio Amodêo.

Zooplankton taxonomic and functional structure is determined by macrophytes and fish predation in a Neotropical river. **Hydrobiologia**, [S. l.], v. 848, n. 7, p. 1475–1490, 2021. ISSN: 15735117. DOI: 10.1007/s10750-021-04527-8.

DÍAZ, Sandra. Does Biodiversity Matter to Terrestrial Ecosystem Processes and Services? [S. l.], n. July, p. 165–167, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-19016-2_31.

DRAY, Stéphane et al. **adespatial: Multivariate Multiscale Spatial Analysis**. 2020.

ESTEVEZ, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 3rd ed. ed., Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

FARES, Ana Luísa B.; CALVÃO, Lenize Batista; TORRES, Naiara Raiol; GURGEL, Ely Simone C.; MICHELAN, Thaísa Sala. Environmental factors affect macrophyte diversity on Amazonian aquatic ecosystems inserted in an anthropogenic landscape. **Ecological Indicators**, [S. l.], v. 113, p. 106231, 2020. ISSN: 1470160X. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106231. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106231>.

FERRIER, S.; MANION, G.; ELITH, J.; RICHARDSON, K. Using generalized dissimilarity modelling to analyse and predict patterns of beta diversity in regional biodiversity assessment. **Diversity and distributions**, [S. l.], v. 13, p. 252–264, 2007.

FITZPATRICK, Matthew C.; MOKANY, Karel; MANION, Glenn; LISK, Matthew; FERRIER, Simon; NIETO-LUGILDE, Diego. **Generalized Dissimilarity Modeling (GDM) in R**. 2020.

GARDNER, Toby A. et al. A social and ecological assessment of tropical land uses at multiple scales: The Sustainable Amazon Network. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [S. l.], v. 368, n. 1619, 2013. ISSN: 14712970. DOI: 10.1098/rstb.2012.0166.

HEINO, J.; MELO, A. S.; SIQUEIRA, T.; SOININEN, J.; VALANKO, S.; BINI, L. M. Metacommunity organisation, spatial extent and dispersal in aquatic systems: patterns, processes and prospects. **Freshwater Biology**, [S. l.], v. 60, p. 845–869, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/fwb.12533>.

HEINO, Jani; MELO, Adriano S.; BINI, Luis M. Reconceptualising the beta diversity-environmental heterogeneity relationship in running water systems. **Freshwater Biology**, [S. l.], v. 60, n. 2, p. 223–235, 2015. ISSN: 13652427. DOI: 10.1111/fwb.12502.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2017. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/21255-analfabetismo-cai-em-2017-mas-segureza-acima-da-meta-para-2015>. Acesso em: 9 jun. 2019.

LEGENDRE, Pierre; CÁCERES, Miquel De. Beta diversity as the variance of community data: dissimilarity coefficients and partitioning. **Ecology Letters**, [S. l.], v. 16, p. 951–963, 2013.

LIMA, Myllena; FIRMINO, Viviane Caetano; DE PAIVA, Carina Kaory Sasahara; JUEN, Leandro; BRASIL, Leandro Schlemmer. **Land use changes disrupt streams and affect the functional feeding groups of aquatic insects in the Amazon**. **Journal of Insect Conservation** Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022. (2) ISSN: 15729753. DOI: 10.1007/s10841-022-00375-6.

LISBOA, P. L. B. **Caxiuanã: populações tradicionais, meio físico e diversidade biológica**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, 2002. 2013 p.

LOLIS, Lucas Assumpção; ALVES, Diego Corrêa; FAN, Shufeng; LV, Tian; YANG, Lei; LI, Yang; LIU, Chunhua; YU, Dan; THOMAZ, Sidinei Magela. Negative correlations between native macrophyte diversity and water hyacinth abundance are stronger in its introduced than in its native range. **Diversity and Distributions**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 242–253, 2020. ISSN: 14724642. DOI: 10.1111/ddi.13014.

MAGURRAN, Anne. **Measuring Biological Diversity**. Malden, USA: Blackwell Science Ltd, a Blackwell Publishing company, 2004. 215 p.

POTT, Vali Joana; POTT, Arnildo. **Plantas aquáticas do Pantanal**. Brasília: EMBRAPA Comunicação para transferência de Tecnologia, 2000.

POZZOBOM, Uly Mattilde; HEINO, Jani; BRITO, Maiara; LANDEIRO, Victor Lemes. Untangling the determinants of macrophyte beta diversity in tropical floodplain lakes : insights from ecological uniqueness and species contributions. **Aquatic Sciences**, [S. l.], v. 82, n. 3, p. 56–67, 2020. ISSN: 1420-9055. ISBN: 0123456789. DOI: 10.1007/s00027-020-00730-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00027-020-00730-2>.

MICHELAN Thaísa S, THOMAZ Sidinei M, BANDO Fabielle M and BINI Luis M (2018) Competitive Effects Hinder the Recolonization of Native Species in Environments Densely Occupied by One Invasive Exotic Species. *Front. Plant Sci.* 9:1261. doi: 10.3389/fpls.2018.01261

MONTAG, L. F. A.; FREITAS, T. M. S.; WOSIACKI, W. B.; BARTHEM, R. B. Os peixes da Floresta Nacional de Caxiuanã (municípios de Melgaço e Portel, Pará - Brasil). **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 11–34, 2008.

MORMUL, Roger Paulo; ESTEVES, Francisco de Assis; FARJALLA, Vinicius Fortes; BOZELLI, Reinaldo Luiz. Space and seasonality effects on the aquatic macrophyte community of temporary Neotropical upland lakes. **Aquatic Botany**, [S. l.], v. 126, p. 54–59, 2015. ISSN: 03043770. DOI: 10.1016/j.aquabot.2015.06.007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquabot.2015.06.007>.

PELÁEZ, Oscar; PAVANELLI, Carla Simone. Environmental heterogeneity and dispersal limitation explain different aspects of β -diversity in Neotropical fish assemblages. **Freshwater Biology**, [S. l.], v. 64, n. 3, p. 497–505, 2019. ISSN: 13652427. DOI: 10.1111/fwb.13237.

PEREIRA, Sabrina Amaral; TRINDADE, Cláudio Rossano Trindade; ALBERTONI, Edélti Faria; PALMA-SILVA, Cleber. Macrófitas aquáticas como indicadores da qualidade da água em pequenos lagos rasos subtropicais, Sul do Brasil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 52–63, 2012. ISSN: 01026712. DOI: 10.1590/S2179-975X2012005000026.

PIEIDADE, Maria Teresa Fernandez; JUNK, Wolfgang; D'ÂNGELO, Sammya Agra; WITTMANN, Florian; SCHÖNGART, Jochen; BARBOSA, Keillah Mara do Nascimento; LOPES, Aline. Aquatic herbaceous plants of the Amazon floodplains: state of the art and research needed. **Acta Limnologica Brasiliensia**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 165–178, 2010.

R. R Core Team: **A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria. 2020.

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

VILLÉGER, Sébastien; GRENOUILLET, Gaël; BROSSE, Sébastien. Decomposing functional β -diversity reveals that low functional β -diversity is driven by low functional turnover in European fish assemblages. **Global Ecology and Biogeography**, [*S. l.*], v. 22, n. 6, p. 671–681, 2013. ISSN: 1466822X. DOI: 10.1111/geb.12021.

WARFE, D. M.; BARMUTA, L. A. Habitat structural complexity mediates food web dynamics in a freshwater macrophyte community. **Oecologia**, [*S. l.*], v. 150, p. 141–154, 2006.