



UFRJ



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE BIODIVERSIDADE E SUSTENTABILIDADE**

MARIA EDUARDA BELMONT ANTUNES

**DINÂMICA NUTRICIONAL NA FISIOLÓGIA DA ISOETACEA *Isoëtes*
*cangae***

MACAÉ – RJ
2024

MARIA EDUARDA BELMONT ANTUNES

**DINÂMICA NUTRICIONAL NA FISIOLOGIA DA ISOETACEA *Isoëtes*
*cangae***

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé, Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade (NUPEM), como requisito à obtenção do grau de bacharel em Ciências Biológicas com ênfase em Meio Ambiente.

Orientador: Dr. Daniel Basílio Zandonadi
Coorientador: Dr. Antônio Jesus Cogo

MACAÉ - RJ
2024

Dedico todo e qualquer sucesso meu aos meus pais, que sob muito sol, me fizeram chegar aqui pela sombra e com água fresca.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela imensurável graça e força divina que me conduziram até aqui, guiando-me em cada passo desta jornada. Em cada momento de incerteza, sua luz me orientou, e em cada conquista, seu amor me sustentou.

A mim mesma, por manter a coragem e a determinação ao longo de cada etapa dessa caminhada. Por acreditar em mim mesma, mesmo quando os obstáculos pareciam grandes demais.

À minha família, especialmente aos meus pais, Fernanda e Eduardo, e à minha mãezinha (Vó Vera), pelo apoio incondicional, pelo incentivo constante e por sempre serem o alicerce fundamental das minhas conquistas e realizações. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio de vocês.

Agradeço ao Professor Dr. Daniel Zandonadi, pela orientação dedicada e pelos ensinamentos preciosos durante este trabalho. Sua confiança no meu potencial, mesmo à distância, foi fundamental para o desenvolvimento deste projeto e para a minha formação acadêmico-científica. Agradeço também ao Dr. Antônio Cogo pela colaboração e contribuição ao longo deste percurso.

Aos amigos do laboratório, meu sincero agradecimento por me acolherem e me acompanharem durante esta jornada, pela parceria nos experimentos, pela colaboração constante e pelos momentos de alegria. Suas contribuições, risadas e companheirismo tornaram os desafios deste trabalho mais leves e significativos.

Aos meus amigos de graduação, meu agradecimento sincero por estarem ao meu lado, compartilhando dificuldades, vitórias e alegrias, tornando essa jornada mais especial.

Agradeço ao meu namorado por seu amor, paciência e apoio, sendo meu apoio emocional, me fortalecendo em todos os momentos.

Aos membros da banca, Dr. Heitor Monteiro Duarte, Dr. José Roberto e Dr. Rodrigo Lemes, sou grata por aceitarem o convite e pelo tempo dedicado à leitura deste projeto.

Agradeço ao Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade – NUPEM e à UFRJ, pelo apoio institucional, e ao corpo docente, que me formaram como bióloga, proporcionando a qualidade e excelência acadêmica que orientaram meu caminho até aqui.

Por fim, agradeço à Fundação COPPETEC pelo fomento à bolsa de iniciação científica.

MARIA EDUARDA BELMONT ANTUNES

DINÂMICA NUTRICIONAL NA FISIOLOGIA DA ISOETACEA *Isoëtes*
cangae

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé, Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade (NUPEM), como requisito à obtenção do grau de bacharel em Ciências Biológicas com ênfase em Meio Ambiente.

Aprovada em Macaé, 18 de novembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Basílio Zandonadi
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Heitor Monteiro Duarte
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. José Roberto da Silva
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

ANTUNES, Maria Eduarda Belmont. **Dinâmica nutricional na fisiologia da Isoetacea *Isoëtes cangae***. Macaé, 2024. Dissertação (Graduação em Ciências Biológicas) – Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2024.

A Isoetacea *Isoëtes cangae* é uma planta aquática endêmica da Amazônia que se encontra listada atualmente como criticamente ameaçada e, portanto, existe uma grande demanda para estratégias para conservação da espécie. Assim, o presente projeto tem como objetivo analisar e descrever os padrões de captação e distribuição dos macros e micronutrientes minerais nos distintos órgãos da licófito aquática *I. cangae*. Para isso, analisamos a liberação de nutrientes do substrato para a água e a captação dos mesmos pela planta. Tais experimentos foram desenvolvidos de maneira semi-controlada em cultivo protegido. Os dados obtidos foram analisados estatisticamente por meio de testes de comparação entre os diferentes tratamentos. Padrões diferenciados de captação e distribuição de macronutrientes e micronutrientes foram encontrados: corno e raiz apresentaram os maiores teores de nutrientes em relação às folhas. Especificamente, as folhas internas, intermediárias e externas apresentaram as maiores acumulações, respectivamente.

Palavras-chave: Carajás; conservação; *Isoëtes*; licófito.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

- Figura 1** - Espécimes de *Isoëtes cangae*. Fonte: a autora..... 4
- Figura 2** - Concentrações adequadas de macronutrientes e micronutrientes. Fonte: adaptado de (SCHULZE et al., 2019)..... 6
- Figura 3** - Classificação dos nutrientes minerais das plantas de acordo com a função bioquímica. Fonte: (Taiz et al., 2017) 7
- Figura 4** - Esquema representando a captação de nutrientes por uma planta. Fonte: a autora. 10
- Figura 5** - Três classes de proteínas de transporte em membranas: canais, carregadores e bombas. (Taiz et al., 2017). 12
- Figura 6** - Imagem aérea do Lago Amendoim, localizado na parte Sul da Serra dos Carajás, Estado do Pará, Brasil (A) *I. cangae* dentro do Lago Amendoim (B) Lago Amendoim. Fonte: imagem adaptada de GUIMARÃES et al. (2023) e PRADO et. al (2023). 13
- Figura 7** - Esquema representativo do ensaio. Montagem de quatro potes de 2L contendo uma mistura de água destilada, substrato comercial e areia na proporção 2:1 conforme Zandonadi et al. (2019). O experimento foi mantido por 18 dias, com coletas de amostras de água realizadas a cada 3 dias para análise posterior da fertilidade. 19
- Figura 8** - Esquema representativo do ensaio. Montagem de vinte potes de 3,5L contendo uma mistura de água destilada, substrato comercial e areia na proporção 2:1 (Zandonadi et al., 2019), com um indivíduo por pote. O experimento foi mantido por 60 dias, com monitoramento semanal para coleta de água. 20
- Figura 9** - Triagem das plantas, com separação das folhas (da esquerda para direita: internas, externas e intermediárias), raiz e cormo..... 21
- Figura 10** - Dinâmica de macronutrientes nutrientes liberados pelo substrato para água durante o período de 18 dias. (Figura 10 - a) liberação de N; (Figura 10 - b) liberação de P; (Figura 10 - c) liberação de K; (Figura 10 - d) liberação de Mg; (Figura 10 - e) liberação de Ca; liberação de S (Figura 10- f). 23
- Figura 11** - Dinâmica de micronutrientes liberados pelo substrato para água durante o período de 18 dias. (Figura 11 - a) liberação de Cu; (Figura 11 - b) liberação de Fe; (Figura 11 - c)

liberação de B; (Figura 11 - d) liberação de Mn; (Figura 11 - e) liberação de Mo; liberação de Zn (Figura 11- f).....	24
Figura 13 - Gráfico de Componentes principais (PCA) da dinâmica de nutrientes liberados pelo substrato para água durante o período de 18 dias.....	26
Figura 14 - Armazenamento dos macronutrientes nas estruturas do corno, raiz, folhas intermediárias, folhas externas e folhas internas da <i>Isoetacea I. cangae</i> , avaliados em 20 plantas. (a) Distribuição do armazenamento de N nos órgãos da planta; (b) Distribuição do armazenamento de P nos órgãos da planta; (c) Distribuição do armazenamento de K nos órgãos da planta; () Distribuição do armazenamento de Ca nos órgãos da planta; (e) Distribuição do armazenamento de Mg nos órgãos da planta e (f) Distribuição do armazenamento de S nos órgãos da planta.	27
Figura 15 - Armazenamento de micronutrientes nas estruturas do corno, raiz, folhas intermediárias, folhas externas e folhas internas da <i>Isoetacea I. cangae</i> . (Figura 15 – a) Distribuição do armazenamento de B nos órgãos da planta; (Figura 15 – b) Distribuição do armazenamento de Cu nos órgãos da planta; (Figura 15 – c) Distribuição do armazenamento de Fe nos órgãos da planta; (Figura 15 – d) Distribuição do armazenamento Mn nos órgãos da planta; (Figura 15 – e) Distribuição do armazenamento de Zn nos órgãos da planta.	28
Figura 16 - Experimento para avaliar a dinâmica de liberação de nutrientes - 20 potes contendo 1 indivíduo de <i>I. cangae</i> cada, substrato Jiffy® e areia.	29
Figura 17 - Fotos dos potes ao longo das semanas do experimento (A) semana 0; (B) Semana 1 - dia da montagem do experimento; (C) Semana 2; (D) Semana 3; (E) Semana 4; (F) Semana 5; (G) Semana 6; (H) Semana 7; (I) Semana 8; (J) Semana 9 - última semana, dia do desmonte do experimento.	30
Figura 18 - Concentração de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) em relação a cada órgão vegetal (corno, raiz, folhas externas, folhas intermediárias e folhas internas). (a) Teor de Nitrogênio (b) Teor de Fósforo (c) Teor de Potássio (d) Teor de Cálcio (e) Teor de Magnésio (f) Teor de Enxofre.	33
Figura 19 - Concentração de micronutrientes em relação a cada órgão vegetal (corno, raiz, folhas externas, folhas intermediárias e folhas internas). (a) Teor de Boro (b) Teor de Cobre (c) Teor de Ferro (d) Teor de Manganês (e) Teor de Zinco.....	35
Figura 20 - Concentração de macronutrientes e micronutrientes em relação a cada órgão vegetal (corno, raiz, folhas externas, folhas intermediárias e folhas internas) apresentadas nas figuras 18 e 19.	36

TABELA

Tabela 1 - Análise nutricional do substrato comercial (Jiffy ®).	17
Tabela 3 - Análise nutricional do substrato pós experimento II.	31
Tabela 4 - Concentrações de carbono nas diferentes frações das substâncias húmicas do substrato do Lago Amendoim, após fracionamento. Os valores apresentados correspondem às frações de ácido fúlvico, ácido húmico e humina.	37

QUADRO

Quadro 1 - Cronograma de atividades	43
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	4
1.1	FOTOSSÍNTESE X NUTRIÇÃO MINERAL	7
1.2	SOLO E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS.....	8
1.3	MECANISMOS DE CAPTAÇÃO E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES	9
1.4	AMBIENTES FERRUGINOSOS E SUAS IMPLICAÇÕES SOBRE OS ORGANISMOS	12
1.5	RELEVÂNCIA.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	17
3.1.1	Análise do substrato comercial utilizado, Jiffy®	17
3.1.2	Experimento I – Dinâmica de Liberação de Nutrientes do Substrato para a Água	18
3.1.3	Experimento II – Dinâmica de Liberação de Nutrientes pelo Substrato e Captação por <i>I. cangae</i>	19
3.2.1	Experimento III– Efeito das Substâncias Húmicas	22
3.3	ANÁLISE DE DADOS	22
4	RESULTADOS.....	23
4.1	LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES DO SUBSTRATO PARA A ÁGUA.....	23
	ANÁLISE NUTRICIONAL DE PLANTAS CONTROLE	26
4.1.1	Distribuição dos Macronutrientes.....	26
4.1.2	Distribuição dos Micronutrientes.....	27
4.2	LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES DO SUBSTRATO E CAPTAÇÃO POR <i>I. cangae</i>	29

4.2.1	Análise do Substrato.....	30
4.2.2	Análise nutricional das plantas	32
4.3	SUBSTÂNCIAS HÚMICAS	36
5	DISCUSSÃO.....	38
	SUBSTÂNCIAS HÚMICAS	40
5.1	40
6	CONCLUSÃO	42
7	CRONOGRAMA	43
8	REFERÊNCIAS	44
	ANEXO I.....	46
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A nutrição é essencial para que os seres vivos possam crescer e desempenhar suas funções fisiológicas. As plantas, organismos autotróficos, utilizam dióxido de carbono (CO_2), luz e água, além de nutrientes minerais, em seus processos de crescimento e desenvolvimento (SCHULZE et al., 2005; RAVEN, 2014). Os nutrientes minerais são elementos inorgânicos que desempenham papéis cruciais na nutrição vegetal, sendo fundamentais na execução de funções fisiológicas, assim como para a realização de reações bioquímicas necessárias ao desenvolvimento e manutenção metabólica das plantas (TAIZ et al., 2017). Na maior parte dos vegetais, esses nutrientes são absorvidos do solo pelos sistemas radiculares, que são essenciais para o processo pelo qual as plantas obtêm e utilizam os nutrientes minerais (TAIZ et al., 2017). Licófitas como a espécie *Isoetes cangae* (Figura 1) têm sido estudadas recentemente quanto sua capacidade de absorção de nutrientes e aspectos básicos da sua ecofisiologia (ZANDONADI et al., 2021; AZZELLA et al., 2024). Apesar dos avanços no entendimento do acúmulo de alguns metais como o Fe em *I. cangae*, ainda não está claro qual o tipo de "prioridade" na absorção de nutrientes minerais, e de sua compartimentalização nessa espécie em condições de cultivo artificial.



Figura 1 - Espécimes de *Isoetes cangae*. Fonte: a autora

A nutrição mineral é definida como o processo pelo qual as plantas obtêm e utilizam os nutrientes minerais. Esse processo abrange desde a absorção dos nutrientes - alguns em maiores quantidades e outros em menores quantidades – até a sua distribuição pelos diferentes tecidos vegetais, assim como sua acumulação e utilização nas funções biológicas (SCHULZE et al., 2005; RAVEN, 2014; TAIZ et al., 2017).

Os nutrientes minerais essenciais são aqueles elementos que fazem parte intrínseca da estrutura ou metabolismo da planta, ou cuja ausência pode causar sérias anormalidades no crescimento e na reprodução, chegando a impossibilitar a planta de completar seu ciclo de vida (TAIZ et al., 2017). Esses elementos, dependendo da concentração necessária nos tecidos vegetais, são classificados em macronutrientes (aproximadamente 1000–15.000 µg/g de peso seco) e micronutrientes (aproximadamente 0,005–100 µg/g de peso seco) (SCHULZE et. al, 2019).

Os macronutrientes (Figura 2) são os elementos essenciais requeridos em maiores concentrações, como Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Magnésio (Mg), Enxofre (S) e Cálcio (Ca). Por outro lado, os micronutrientes (Figura 1), são necessários em concentrações relativamente menores, incluindo Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn), Cobre (Cu), Boro (B); Cloro (Cl) e Molibdênio (Mo) (RAVEN, 2014; TAIZ et al., 2017).

Elemento	Simbolo químico	Conteúdo (µg/g de peso)
<i>Macronutrientes</i>		
Nitrogênio	N	15.000
Potássio	K	10.000
Cálcio	Ca	5000
Magnésio	Mg	2000
Fósforo	P	1000
Enxofre	S	
<i>Micronutrientes</i>		
Ferro	Fe	100
Manganês	Mn	50
Zinco	Zn	20
Cobre	Cu	6
Molibdênio	Mo	0.1
Níquel	Ni	0.005
Cloro	Cl	100
Boro	B	20

Figura 2 - Concentrações adequadas de macronutrientes e micronutrientes. Fonte: adaptado de (SCHULZE et al., 2019)

Os macronutrientes e micronutrientes desempenham papéis cruciais em processos fundamentais para o desempenho biológico das plantas (Figura 3). Quando esses nutrientes estão presentes em concentrações inadequadas, podem afetar diversas estruturas e funções da planta, provocando sintomas de deficiência (RAVEN, 2014). Além disso, o acúmulo excessivo de nutrientes pode levar ao surgimento de sintomas prejudiciais, como alterações nos padrões de coloração e pigmentação foliar (RAVEN, 2014; TAIZ et al., 2017). Portanto, a deficiência ou o excesso de um elemento essencial pode resultar em distúrbios metabólicos que afetam o metabolismo e o funcionamento normal da planta (RAVEN, 2014; SCHULZE et al., 2005).

TABELA 5.2 Classificação dos nutrientes minerais das plantas de acordo com a função bioquímica

Nutriente mineral	Funções
Grupo 1	Nutrientes que fazem parte de compostos de carbono
N	Constituinte de aminoácidos, amidas, proteínas, ácidos nucleicos, nucleotídeos, coenzimas, hexosaminas, etc.
S	Componente de cisteína, cistina, metionina. Constituinte de ácido lipoico, coenzima A, tiamina pirofosfato, glutatona, biotina, 5'-adenilil-sulfato e 3'-fosfoadenosina.
Grupo 2	Nutrientes importantes na armazenagem de energia ou na integridade estrutural
P	Componente de açúcares-fosfato, ácidos nucleicos, nucleotídeos, coenzimas, fosfolipídeos, ácido fítico, etc. Tem papel central em reações que envolvem ATP.
Si	Depositado como sílica amorfa em paredes celulares. Contribui para as propriedades mecânicas das paredes celulares, incluindo rigidez e elasticidade.
B	Forma complexo com manitol, manano, ácido polimanurônico e outros constituintes das paredes celulares. Envolvido no alongamento celular e no metabolismo de ácidos nucleicos.
Grupo 3	Nutrientes que permanecem na forma iônica
K	Requerido como cofator de mais de 40 enzimas. Principal cátion no estabelecimento do turgor celular e na manutenção da eletroneutralidade celular.
Ca	Constituinte da lamela média das paredes celulares. Requerido como cofator por algumas enzimas envolvidas na hidrólise de ATP e de fosfolipídeos. Atua como mensageiro secundário na regulação metabólica.
Mg	Requerido por muitas enzimas envolvidas na transferência de fosfatos. Constituinte da molécula de clorofila.
Cl	Requerido para as reações fotossintéticas envolvidas na evolução de O ₂ .
Zn	Constituinte de álcool desidrogenase, desidrogenase glutâmica, anidrase carbônica, etc.
Na	Envolvido na regeneração do fosfoenolpiruvato em plantas C ₄ e CAM (metabolismo ácido das crassuláceas). Substitui o potássio em algumas funções.
Grupo 4	Nutrientes envolvidos em reações redox
Fe	Constituinte de citocromos e ferro-proteínas não heme envolvidas na fotossíntese, na fixação de N ₂ e na respiração.
Mn	Requerido para a atividade de algumas desidrogenases, descarboxilases, quinases, oxidases e peroxidases. Envolvido com outras enzimas ativadas por cátions e na evolução fotossintética de O ₂ .
Cu	Componente de ácido ascórbico oxidase, tirosinase, monoaminoxidase, uricase, citocromo oxidase, fenolase, lacase e plastocianina.
Ni	Constituinte da urease. Em bactérias fixadoras de N ₂ , é constituinte de hidrogenases.
Mo	Constituinte de nitrogenase, nitrato redutase e xantina desidrogenase.

Fonte: De Evans e Sorger, 1966, e Mengel e Kirkby, 2001.

Figura 3 - Classificação dos nutrientes minerais das plantas de acordo com a função bioquímica. Fonte: (Taiz et al., 2017)

1.1 FOTOSSÍNTESE X NUTRIÇÃO MINERAL

A fotossíntese é um processo vital para as plantas, determinando como elas crescem e produzem a energia necessária para seu desenvolvimento e sobrevivência. A presença de certos nutrientes minerais em concentrações adequadas – específicas para cada espécie vegetal – é fundamental para o funcionamento correto das reações fotossintéticas (SCHULZE et al., 2005; TAIZ et al., 2017). A deficiência de qualquer um desses elementos essenciais pode comprometer a eficiência fotossintética da planta, prejudicando seu desenvolvimento. Elementos minerais como Mn, K, Mg, S, Cu, Fe e P desempenham papéis variados, mas significativos, no processo fotossintético.

O Mn atua como ativador enzimático, controlando reações de oxirredução essenciais à fotossíntese, como a fotoxidação da água no fotossistema II. Sua deficiência também

compromete a estrutura dos cloroplastos e, conseqüentemente, a fotossíntese (TAIZ et al., 2017; SANTOS et al., 2021). O K está envolvido na regulação dos processos de translocação de nutrientes, desempenhando um papel crucial na regulação da abertura estomática e na ativação de enzimas (SCHULZE et al., 2005). O Mg é um componente essencial da molécula de clorofila, o pigmento responsável pela absorção da luz durante a fotossíntese. Além disso, o Mg ativa diversas enzimas e contribui para estabilização das membranas celulares nas células vegetais (SCHULZE et al., 2005). O S participa da síntese de aminoácidos, proteínas, enzimas e antioxidantes fundamentais para as reações fotossintéticas (SCHULZE et al., 2005). O Cu é um componente importante de proteínas envolvidas na transferência de elétrons durante a fotossíntese, atuando como ativador da enzima RuBisCO, e na regulação do metabolismo do ferro e na síntese de pigmentos (SANTOS et al., 2021). O Fe é crucial na fotossíntese, estando presente em proteínas nos centros de reação dos fotossistemas, onde ocorrem a absorção da luz e a transferência de elétrons. Além disso, o ferro é um componente essencial para a molécula de clorofila (SANTOS et al., 2021). Para a saúde e sobrevivência das plantas, é fundamental que os nutrientes estejam presentes em concentrações adequadas, específicas para cada espécie vegetal (SCHULZE et al., 2005; RAVEN, 2014; SANTOS et al., 2021).

Além dos elementos mencionados que são cruciais para a fotossíntese, as plantas também necessitam de concentrações adequadas de outros nutrientes. O nitrogênio (N) é essencial como constituinte de vários componentes celulares vegetais, incluindo clorofila e ácidos nucleicos. O fósforo (P) é um componente integral de diversos compostos fundamentais nas células vegetais, como ácidos nucléicos e lipídios de membrana. O potássio (K) desempenha um papel crucial na regulação do potencial osmótico e na ativação de muitas enzimas envolvidas na fotossíntese. O cálcio (Ca), além de sua função estrutural, está também envolvido na sinalização celular. Os micronutrientes, como o zinco (Zn), que é um importante componente de algumas enzimas; o boro (B), que atua no alongamento celular, no metabolismo de ácidos nucléicos e desempenha funções nas membranas celulares; o cloro (Cl), que participa da regulação osmótica e da ativação enzimática; e o molibdênio (Mo), componente estrutural de algumas enzimas, são igualmente necessários em concentrações adequadas (SCHULZE et al., 2005; RAVEN, 2014; TAIZ et al., 2017).

1.2 SOLO E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS

O solo, além de fornecer suporte físico para as plantas, é uma das principais fontes de nutrientes vegetais. O solo também oferece água e um ambiente gasoso essencial para o desenvolvimento do sistema radicular, que é crucial para a absorção dos nutrientes disponíveis. A disponibilidade desses nutrientes varia de acordo com a composição do solo e está associada a fatores específicos do ambiente onde a planta está localizada (SANTOS et al., 2021). Por exemplo, locais ricos em ferro, como os ecossistemas de canga, podem influenciar a dinâmica nutricional das plantas devido à maior disponibilidade desse elemento. No entanto, dependendo das concentrações, o ferro pode ser tóxico para certas espécies (JUCOSKI et al., 2016), mas aparentemente *I. cangae* tolera níveis bastante elevados (ZANDONADI et al., 2021).

A matéria orgânica do solo (MOS) constitui um sistema complexo, dinâmico e historicamente transformativo, formado por componentes vivos e não vivos, resultantes da incorporação de resíduos orgânicos em variados estágios de decomposição, de origem vegetal, animal e microbiana, através da interação de diversos processos (ZANDONADI, 2006; CUNHA et al., 2016). O conteúdo da MOS pode influenciar diretamente várias características que definem a qualidade do solo e contribuem para a produtividade vegetal, como, por exemplo, a disponibilidade de nutrientes (ZANDONADI, 2006). As substâncias húmicas compõem aproximadamente 80% da MOS e estão presentes em diferentes estágios de transformação. Esses compostos podem ser separados em laboratório com base em suas solubilidades em três categorias principais: os ácidos fúlvicos, solúveis em meio aquoso ácido ou básico; os ácidos húmicos, solúveis em meios alcalinos e que coagulam quando esses meios são acidificados; e as húminas, que representam a fração insolúvel ou residual das substâncias húmicas (ZANDONADI, 2006). De acordo com ZANDONADI (2006), esses compostos têm alto potencial bioativo e podem exercer diversos efeitos benéficos nas plantas, como estimular o crescimento vegetal, influenciar positivamente o transporte iônico, a atividade enzimática e fotossintética, e a absorção de nutrientes.

1.3 MECANISMOS DE CAPTAÇÃO E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES

Como mencionado anteriormente, o solo é uma das principais fontes de nutrientes para as plantas. Ele também oferece água e um ambiente gasoso fundamental para o desenvolvimento do sistema radicular, que é crucial para a absorção dos nutrientes disponíveis (Figura 4). A disponibilidade desses nutrientes depende de fatores físicos, químicos e

biológicos do solo, como a textura, o pH, a capacidade de troca catiônica (CTC) e a presença de matéria orgânica, bem como das características morfológicas e fisiológicas das raízes.

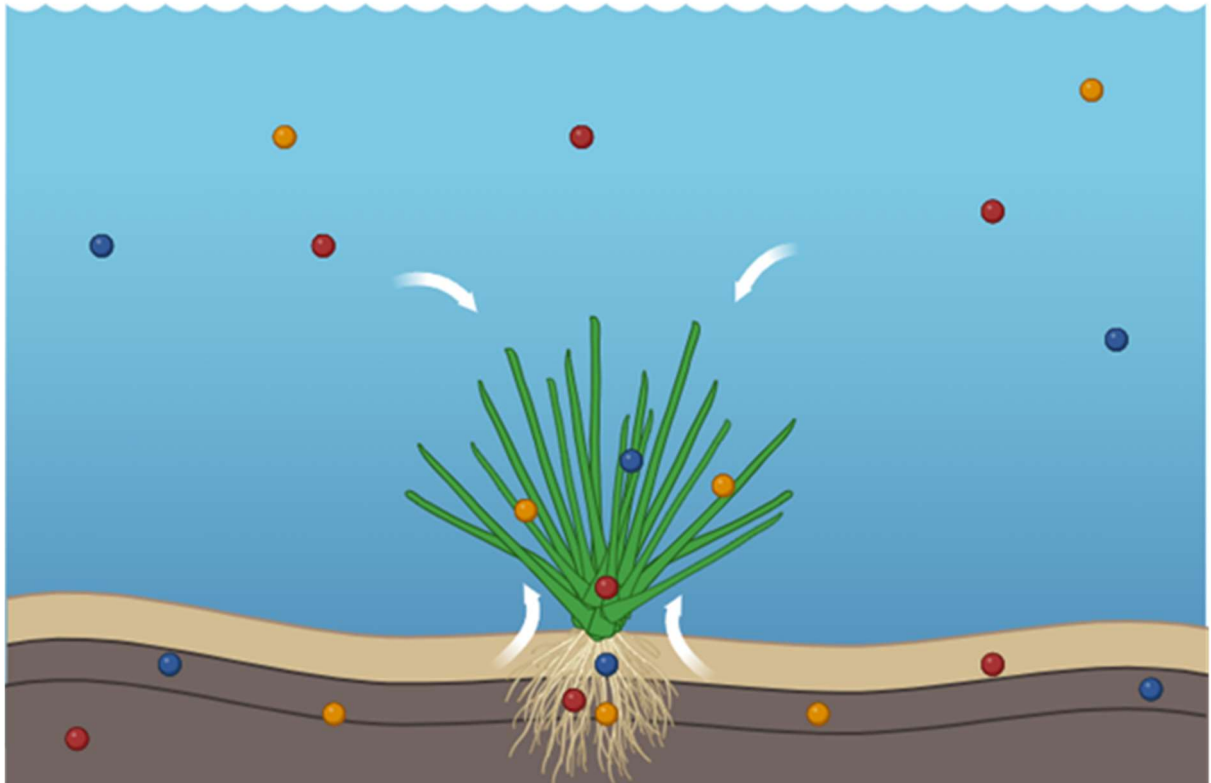


Figura 4 - Esquema representando a captação de nutrientes por uma planta. Fonte: a autora.

As raízes das plantas entram em contato com a solução do solo, da qual retiram nutrientes minerais necessários, por meio de três mecanismos básicos que são responsáveis pelo movimento de íons da solução do solo para a superfície das raízes: fluxo de massa, difusão e interceptação radicular (TAIZ et al., 2017). O fluxo de massa é o processo pelo qual os nutrientes da solução do solo movem-se em direção às raízes, carregados pela água, que se desloca devido a transpiração das folhas. Esse movimento da água cria uma pressão que favorece a entrada de nutrientes, principalmente aqueles que estão em maior concentração na solução do solo. O mecanismo de difusão ocorre quando os nutrientes minerais se movem de uma região de maior concentração para uma de menor concentração. A absorção de nutrientes pelas raízes reduz as concentrações de nutrientes na superfície da raiz, gerando gradientes de concentração na solução do solo próxima a ela. O mecanismo de interceptação radicular envolve o contato direto das raízes com as partículas do solo. As raízes penetram no solo e, por meio de sua estrutura, como pelos radiculares, conseguem absorver os nutrientes diretamente de partículas de solo adjacentes.

A importância relativa de cada um desses mecanismos de movimento dos nutrientes no solo para a planta depende de diversos fatores, como a espécie iônica envolvida, o genótipo da planta, a densidade das raízes e o fluxo de água na planta. Isso significa que a contribuição de cada mecanismo de chegada do nutriente à raiz varia conforme o tipo de nutriente, a espécie e da planta e as condições ambientais do solo e da atmosfera.

Na célula vegetal, a absorção e o transporte de nutrientes são regulados por proteínas de membrana, presentes na membrana celular (Figura 5). A membrana plasmática, tem como principal função formar uma barreira entre o ambiente interno e o externo, além de facilitar e regular continuamente o tráfego de moléculas e íons selecionados para dentro e para fora da célula (TAIZ et al., 2017). As membranas biológicas contêm proteínas de transporte que facilitam a passagem de determinados íons e outras moléculas. As proteínas de transporte podem ser classificadas em três categorias principais de proteínas: canais, carreadoras e bombas (Figura 5) (TAIZ et al., 2017).

As proteínas do tipo canais e carreadoras podem promover o transporte passivo de um soluto através das membranas, por difusão simples ou difusão facilitada. Os canais, são proteínas transmembrana que funcionam como poros seletivos, pelos quais íons e algumas moléculas podem difundir-se através da membrana. No transporte mediado por proteínas carreadoras a substância transportada se liga inicialmente a um sítio específico na proteína carreadora. Essa necessidade de ligação torna os carreadores altamente seletivos para o substrato a ser transportado. O transporte ativo primário é feito por bombas e emprega energia diretamente, geralmente a partir da hidrólise de ATP, para bombear solutos contra o seu gradiente potencial eletroquímico (TAIZ et al., 2017).

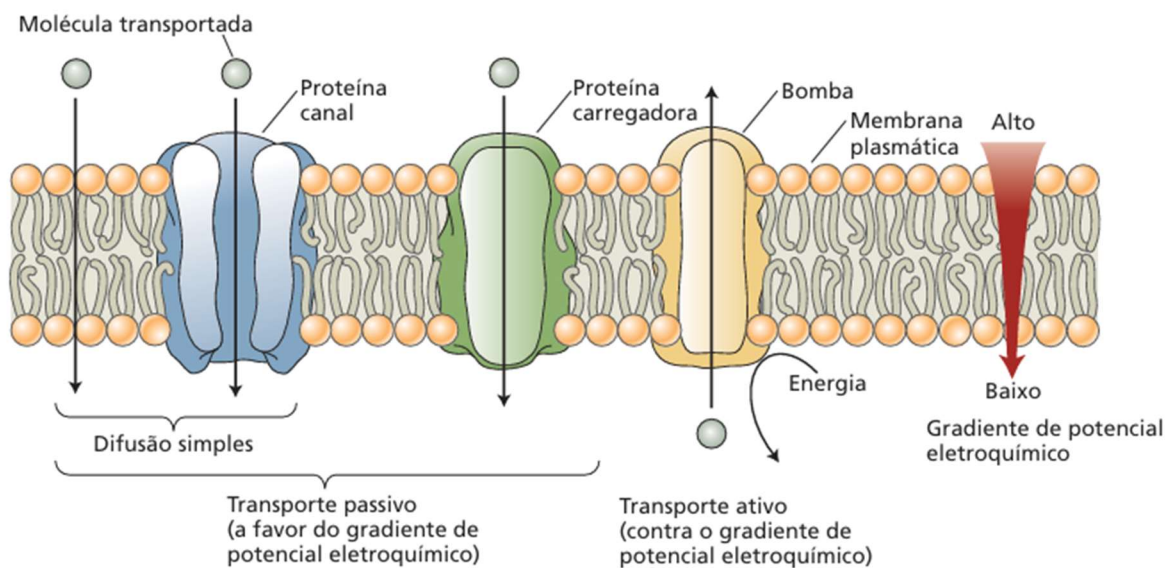


Figura 5 - Três classes de proteínas de transporte em membranas: canais, carregadores e bombas. (Taiz et al., 2017).

1.4 AMBIENTES FERRUGINOSOS E SUAS IMPLICAÇÕES SOBRE OS ORGANISMOS

Cangas, formadas pelo intemperismo de rochas feríferas, são afloramentos que surgiram há milhares de anos como resultado de processos erosivos que enriqueceram o ambiente com ferro (CARMO & JACOBI, 2013; SKIRYCZ et al., 2014). A vegetação associada às cangas apresenta uma alta diversidade, incluindo várias espécies raras, muitas das quais são novas para a ciência (CARMO & JACOBI, 2013). No Brasil, os ecossistemas de canga são tipicamente encontrados no estado de Minas Gerais e em algumas áreas da Amazônia, como na Floresta Nacional de Carajás. *Isoëtes* Linnaeus (1753) é o único gênero vivo atual que descende de uma licófita heterosporada ancestral da família Isoetaceae (CAVALHEIRO-FILHO et al., 2021). Estudos baseados em datação molecular indicam que suas raízes evolutivas remontam ao período Devoniano (DALAPICOLLA et al., 2021). O gênero *Isoëtes* L. é reconhecido como um dos grupos vivos mais antigos das plantas vasculares, tornando-se um grupo-chave para entender a evolução das plantas vasculares (SANTOS et al., 2020; GUIMARÃES et al., 2023). De acordo com Pereira (2017), o gênero *Isoëtes* L. é conhecido por suas características morfológicas relativamente simples, que, embora proporcionem poucos caracteres taxonômicos, são importantes para a identificação das plantas. Além disso, as espécies desse gênero são formadoras de rosetas e podem ser identificadas principalmente por seus esporângios foliares.

Atualmente, o gênero *Isoëtes* inclui aproximadamente 250 espécies de plantas vasculares (GUIMARÃES et al., 2023), encontradas em diversos locais ao redor do mundo e que habitam desde ambientes aquáticos até locais húmidos e anfíbios (PRADO et al., 2023; AZZELLA et al., 2024). Em particular, as espécies de *Isoëtes* possuem uma distribuição geográfica predominantemente restrita, com a América do Sul concentrando a maior diversidade de espécies desse gênero, tornando-se um centro de diversidade (SANTOS et al., 2020). No Brasil, são conhecidas 24 espécies de *Isoëtes*, das quais três ocorrem no estado do Pará, no norte do país (PEREIRA et al., 2017). Recentemente descrita, a espécie *I. cangae* J.B.S. Pereira, Salino & Stützel (PEREIRA et al., 2016) é uma dessas representantes (Figura 6). Trata-se de uma planta aquática classificada como criticamente ameaçada de extinção pela Lista Vermelha da União Internacional para a Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais - IUCN (LANSDOWN, 2019). Esta espécie possui uma ocorrência restrita e exclusiva ao Lago Amendoim (Figura 6), um lago de 1,23 km² com forma alongada, situado na parte sul da Serra dos Carajás, no Parque Nacional da Serra dos Carajás, estado do Pará, e com profundidade de até 4 m (SANTOS et al., 2023). Este lago de altitude está localizado sobre uma crosta ferruginosa, o que contribui para que suas águas sejam oligotróficas e ferruginosas (CALDEIRA et al., 2019).

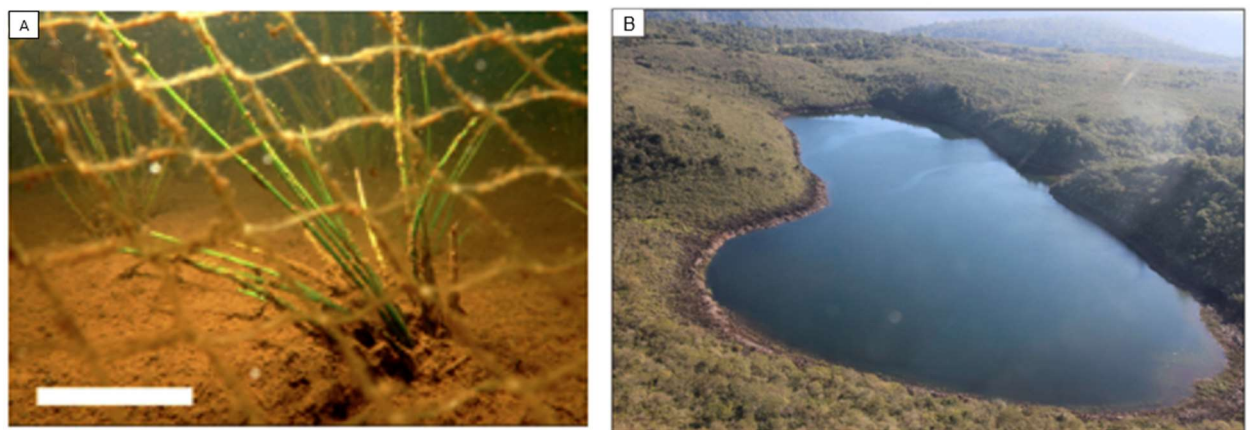


Figura 6 - Imagem aérea do Lago Amendoim, localizado na parte Sul da Serra dos Carajás, Estado do Pará, Brasil (A) *I. cangae* dentro do Lago Amendoim (B) Lago Amendoim. Fonte: imagem adaptada de GUIMARÃES et al. (2023) e PRADO et. al (2023).

Tal ambiente está inserido na fitofisionomia de Canga, que em geral exprime uma série de restrições ao estabelecimento de plantas, principalmente devido à reduzida disponibilidade de nutrientes e à presença de concentrações elevadas de metais potencialmente tóxicos. Esses fatores contribuem para o desenvolvimento de uma flora altamente especializada e adaptada a condições ambientais hostis (CARMO et al., 2012; NUNES et al., 2015). Este é o caso da *I. cangae*, que se encontra em uma área restrita, cercada por minas de ferro e exposta a condições adversas. A espécie tem enfrentado os efeitos negativos associados às mudanças nas condições ambientais, decorrentes principalmente das atividades de exploração mineral (CARMO et al., 2012). Esta atividade tem crescido na região devido às elevadas concentrações de metais de grande interesse. Assim, a licófito tem sofrido com a deterioração da qualidade de seu habitat, principalmente devido à expansão da mineração e às mudanças no ciclo hidroclimatológico da região, causadas pela conversão de áreas de floresta em pastagens (SOUZA-FILHO et al., 2016; PRADO et al., 2023).

Considerando esse cenário, é essencial desenvolver estratégias para a conservação da espécie *I. cangae*, assim como outras espécies do mesmo gênero, enfrenta ameaças. Essas espécies estão sob risco significativo de extinção, principalmente devido à influência negativa das atividades humanas, que resulta na deterioração de habitats e na qualidade da água (LIU et al., 2005; CHEN et al., 2010; ZANDONADI et al., 2021).

1.5 RELEVÂNCIA

Dado que *I. cangae* encontra-se listada como criticamente ameaçada de extinção, há uma necessidade urgente de estratégias eficazes para sua conservação. As características físico-químicas da água representam um ponto relevante para a compreensão das respostas fisiológicas de *I. cangae* e em sua manutenção *ex situ*. A biodisponibilidade de nutrientes é importante para evitar restrições à produtividade das plantas e pode ser essencial para garantir condições adequadas de sobrevivência. Além disso, as variáveis relacionadas à fotobiologia fornecem indicadores diretos da saúde das plantas. Compreender a dinâmica de captação e distribuição dos nutrientes nos diferentes órgãos da planta, bem como seu impacto na fotobiologia, é fundamental para a manutenção das condições necessárias à sobrevivência e conservação de *I. cangae*. Esse conhecimento também pode oferecer *insights* valiosos para a proteção de outras espécies do gênero *Isoetes*, que, assim como *I. cangae*, também estão

ameaçadas. Esses aspectos são fundamentais para entender a interação da planta com o ambiente e para desenvolver estratégias eficazes de preservação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este projeto tem como objetivo principal investigar e descrever a dinâmica nutricional e os efeitos de substâncias húmicas na licófito *I. cangae*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a captação de macro (N, P, K, Mg, S e Ca) e micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Cl e Mo) nos órgãos vegetais;
- Determinar a liberação de nutrientes no substrato e na água ao longo do tempo;
- Analisar os efeitos das substâncias húmicas sobre o crescimento da planta.

Para alcançar esses objetivos, foram realizadas análises dos parâmetros fotossintéticos, dos parâmetros físico-químicos da água e das características nutricionais do substrato, da água e dos diferentes órgãos vegetais em um sistema semi-controlado. O cultivo *ex situ* da espécie seguiu o protocolo de ZANDONADI (2021), já utilizado em laboratório para o cultivo de *I. cangae*, com o intuito de coletar esses dados. Além disso, a realização de testes relacionados aos padrões de dinâmica de nutrientes e análises fotobiológicas contribui para o entendimento dos aspectos fisiológicos de *I. cangae* e para o sucesso nas tentativas de cultivo *ex situ*.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi um estudo experimental e analítico descritivo, que incluiu atividades de monitoramento e a realização de dois ensaios experimentais. O objetivo principal foi analisar e descrever a dinâmica nutricional nos órgãos de *I. cangae*, além de investigar a influência das substâncias húmicas na biologia da planta. As atividades de monitoramento foram realizadas no Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade (NUPEM/UFRJ), enquanto as demais análises foram conduzidas tanto no Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade (NUPEM/UFRJ) quanto, em parte, no Laboratório Brasileiro de Análises Ambientais e Agrícolas (LABRAS). Para montagem dos experimentos, foram utilizadas plantas adultas cultivadas de maneira *ex situ*, em piscinas monitoradas pelo grupo de pesquisa no NUPEM/UFRJ.

3.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

3.1.1 Análise do substrato comercial utilizado, Jiffy®

O substrato comercial utilizado para montagem dos experimentos, Jiffy®, foi avaliado (Tabela 1). Sua análise nutricional demonstrou resultados esperados, com teores adequados para o cultivo de plantas, como já esperado. Visto que, é um substrato mundialmente utilizado para o cultivo de plantas comerciais.

Tabela 1 - Análise nutricional do substrato comercial (Jiffy®).

Categoria	Parâmetro	Valor	Unidade
Macronutrientes	Total N	1,38	%
	P	38,25	ppm
	K	44,5	ppm
	Ca	29,8	ppm
	Mg	14,9	ppm
	S	43,02	ppm
Micronutrientes	Na	23,1	ppm
	B	6,33	ppm
	Cu	0,02	ppm
	Fe	0,76	ppm
	Mn	0,1	ppm
	Zn	0,04	ppm
Outros Parâmetros	Humidade (65 °C)	36,01	%
	Matéria Orgânica	67,19	%
	Cinzas	32,81	%
	Condutividade	0,52	dS/m
	pH	6,3	-
	Carbono Orgânico (OC)	32,54	%
	Relação C/N	24	-
	Densidade	0,21	g/cm ³

3.1.2 Experimento I – Dinâmica de Liberação de Nutrientes do Substrato para a Água

O objetivo principal deste experimento foi analisar a dinâmica de liberação de nutrientes do substrato utilizado para o cultivo de *I. cangae*. Foram utilizados quatro potes, cada um contendo uma mistura de substrato (Jiffy®) e areia na proporção de 2:1, além de 2L de água destilada. Durante um período de 18 dias, amostras de água foram coletadas a cada 3 dias para análise dos macronutrientes e micronutrientes presentes (Figura 7).



Figura 7 - Esquema representativo do ensaio. Montagem de quatro potes de 2L contendo uma mistura de água destilada, substrato comercial e areia na proporção 2:1 conforme Zandonadi et al. (2019). O experimento foi mantido por 18 dias, com coletas de amostras de água realizadas a cada 3 dias para análise posterior da fertilidade.

3.1.3 Experimento II – Dinâmica de Liberação de Nutrientes pelo Substrato e Captação por *I. cangae*

O segundo experimento teve como objetivo analisar a dinâmica de liberação de nutrientes pelo substrato e a subsequente captação desses nutrientes por *I. cangae*. Foram utilizados 20 potes, cada um contendo uma mistura de substrato (Jiffy®) e areia na proporção de 2:1, preenchidos com 3,5 L de água destilada (Figura 8). Amostras compostas de água foram coletadas semanalmente para análise de macro e micronutrientes ao longo de 60 dias, foram coletadas 20 ml de água de cada pote. Além disso, amostras do substrato também serão coletadas para análise nutricional. O substrato foi colocado em placas de Petri, seco em estufa a 50°C por uma semana e, em seguida, enviado para o laboratório de análises.

A captação de nutrientes pela planta foi monitorada em 20 indivíduos adultos de *I. cangae* (um indivíduo por pote), cultivados nas condições descritas por um período de 60 dias. Ao final dos experimentos, as plantas foram coletadas e tiveram suas folhas, raízes e cormos separados. As folhas foram classificadas em três grupos de acordo com a idade, considerando a posição ocupada pela folha na roseta: internas, intermediárias e senescentes. Folhas externas foram consideradas mais senescentes, enquanto as internas foram mais jovens. Após a triagem foram mantidas por uma semana em estufa a uma temperatura de 50°C para secagem. As amostras devidamente identificadas foram enviadas para o laboratório LABRAS a fim de se obter as concentrações de macro e micronutrientes.

Por se tratar de uma planta endêmica restrita, em que o cultivo *ex situ* foi utilizado estrategicamente para seu desenvolvimento. Devido a essa limitação, não foi possível realizar

replicatas para este experimento. A quantidade de massa vegetal necessária para realização de análises replicadas não seria suficiente, o que representou um ponto crítico para análise nutricional, inviabilizando a execução de replicatas. Assim, optou-se por realizar as análises nutricionais a partir de amostras compostas, de modo a obter a massa vegetal necessária para compor a massa vegetal necessária para análise do cormo, das raízes e das folhas internas, externas e intermediárias.



Figura 8 - Esquema representativo do ensaio. Montagem de vinte potes de 3,5L contendo uma mistura de água destilada, substrato comercial e areia na proporção 2:1 (Zandonadi et al., 2019), com um indivíduo por pote. O experimento foi mantido por 60 dias, com monitoramento semanal para coleta de água.



Figura 9 - Triagem das plantas, com separação das folhas (da esquerda para direita: internas, externas e intermediárias), raiz e corno.

3.2.1 Experimento III– Efeito das Substâncias Húmicas

O efeito bioativo das substâncias húmicas sobre a dinâmica nutricional e fotobiológica das plantas foi avaliado por meio de um ensaio de dose-resposta. Neste experimento, 15 plantas de *I. cangae*, com dois meses de idade, foram transferidas para potes contendo uma mistura de substrato (Jiffy®) e areia na proporção de 2:1, com adição de 1 litro de água destilada. As substâncias húmicas foram extraídas do sedimento do Lago Amendoim seguindo o protocolo desenvolvido por Benites et al. (2003), que apresenta um procedimento simplificado para extração e fracionamento quantitativo de substância húmicas do solo, e adicionadas à água dos potes em concentrações crescentes. O ensaio foi conduzido em triplicata.

Após dois meses, foi aferido o número total de folhas e o tamanho da maior folha de cada planta. Além disso, ao final do experimento, foi realizado o monitoramento da fotobiologia das plantas e coletadas amostras de água, substrato e plantas para análise nutricional, seguindo a metodologia previamente descrita.

3.3 ANÁLISE DE DADOS

Para a análise dos dados coletados, foram utilizadas técnicas de Estatística Descritiva e Inferencial. Inicialmente, gráficos básicos e tabelas foram empregados para organizar, resumir e visualizar os dados de maneira clara e compreensível. Embora não sejam realizados testes estatísticos formais para análise de todos os experimentos devido à limitação de replicatas, a análise descritiva fornecerá uma visão geral das distribuições dos dados, como médias e desvios padrão, para o experimento I. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada no Rstudio® através da função `prcomp`, utilizada para identificar padrões e reduzir a dimensionalidade dos dados. A análise descritiva fornece uma visão geral das distribuições dos dados do experimento II, além disso, explora diferentes modelos gráficos como gráfico radar produzido no Rstudio® para comparação da distribuição dos diferentes nutrientes nos tecidos vegetais. Os resultados obtidos serão interpretados e extrapolados com base nos conhecimentos preestabelecidos da fisiologia vegetal e nutrição mineral para fornecer explicações e inferências sobre a dinâmica nutricional da *I. cangae*.

4 RESULTADOS

4.1 LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES DO SUBSTRATO PARA A ÁGUA

Durante o Experimento I, que visou analisar a dinâmica de liberação de nutrientes do substrato para a água, sem a presença de plantas, foram observados valores crescentes de concentração de nutrientes ao longo dos 18 dias do experimento. Quanto aos macronutrientes, o cálcio (Ca) foi o nutriente com maior liberação, atingindo um valor máximo superior a 40 mg/L no último dia do experimento (Figura 10 – e), com um aumento constante ao longo do período. Em contraste, o nitrogênio (N) apresentou as menores concentrações de liberação, com valores próximos a 5 mg/L nos dias finais (Figura 10 – a). Os nutrientes fósforo (P), potássio (K) e magnésio (Mg) apresentaram concentrações médias de liberação, variando entre 20 e 30 mg/L ao longo do experimento (Figuras 10 – b, c e d).

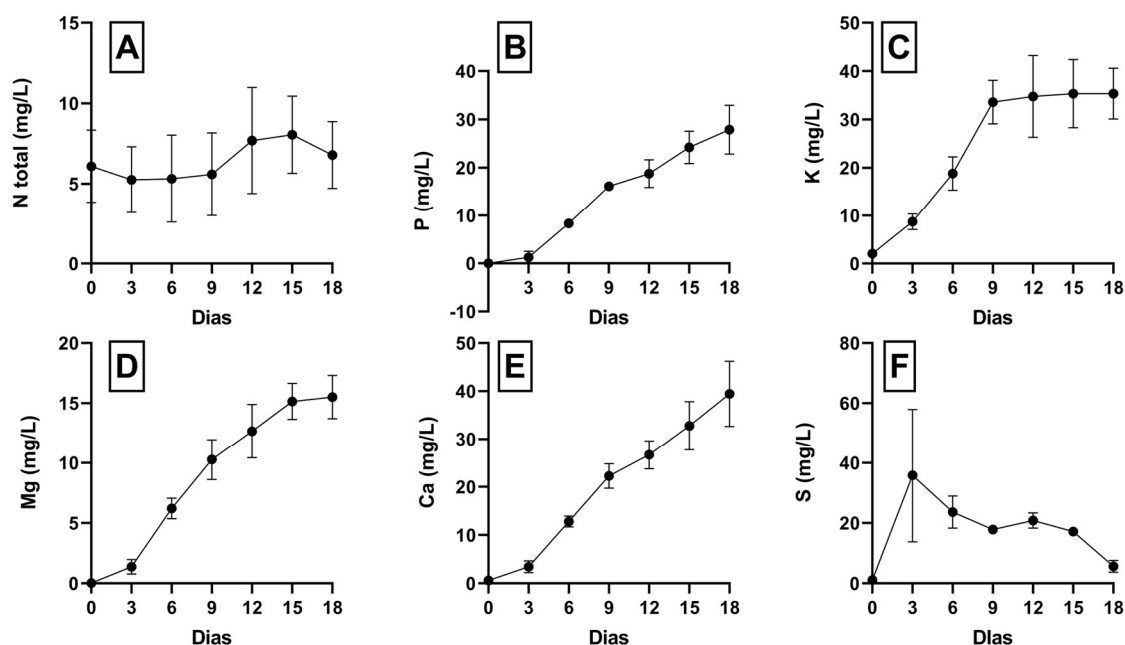


Figura 10 - Dinâmica de macronutrientes liberados pelo substrato para água durante o período de 18 dias. (Figura 10 - a) liberação de N; (Figura 10 - b) liberação de P; (Figura 10 - c) liberação de K; (Figura 10 - d) liberação de Mg; (Figura 10 - e) liberação de Ca; liberação de S (Figura 10- f).

Os micronutrientes apresentaram concentrações inferiores às dos macronutrientes na água ao longo do experimento, visto que micronutrientes em geral apresentam-se em menores concentrações relativas. O ferro (Fe) foi o micronutriente com os maiores teores, com uma

concentração média de 1,5 mg/L no último dia de coleta. Em contraste, o cobre (Cu) foi o micronutriente com as menores concentrações, estabilizando-se em uma média de 0,01 mg/L no último dia. O zinco (Zn) mostrou um aumento gradual, alcançando concentração superior a 0,04 mg/L no último dia do experimento. O manganês (Mn) manteve concentração próximas de 0,10 mg/L nos últimos dias, enquanto o molibdênio (Mo) registrou uma concentração média de 0,12 mg/L nesse período.

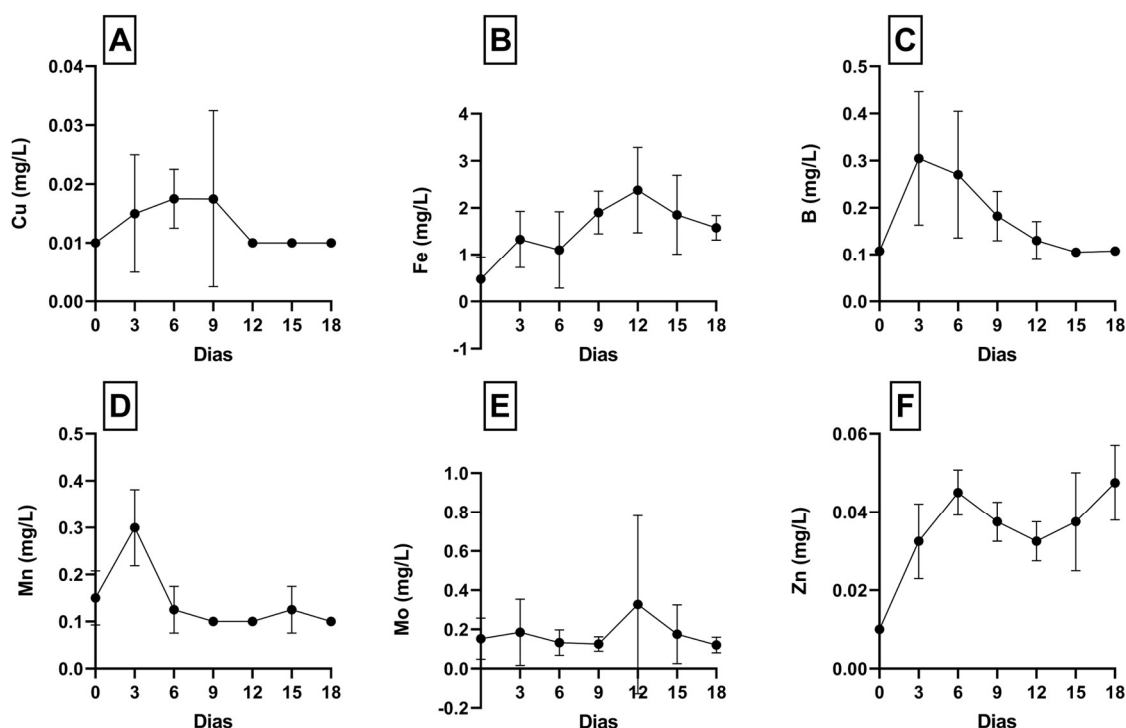


Figura 11 - Dinâmica de micronutrientes liberados pelo substrato para água durante o período de 18 dias. (Figura 11 - a) liberação de Cu; (Figura 11 - b) liberação de Fe; (Figura 11 - c) liberação de B; (Figura 11 - d) liberação de Mn; (Figura 11 - e) liberação de Mo; liberação de Zn (Figura 11- f).

A variação das condições de liberação de nutrientes do substrato para água dos potes também foi avaliada por meio de uma análise de componentes principais (PCA). A PCA foi utilizada para avaliar a variação das variáveis nutricionais e físico-químicas ao longo dos 18 dias de experimento. O primeiro componente principal (PC1) explicou 56,2% da variância total, enquanto o segundo componente principal (PC2) contribuiu com 27,1%, totalizando 83,3% da variância explicada pelos dois primeiros eixos. Esses resultados indicam que as variáveis avaliadas apresentam uma forte associação com os dois primeiros componentes.

O PC1 foi composto pelas variáveis NO_3 (0.33), P (0.29), K (0.32), Ca (0.30), Mg (0.31), Fe (0.31), e N total (0.20), que apresentaram os maiores pesos positivos. Por outro lado, Cu (-0.28), Zn (-0.26), B (-0.31), Co (-0.27) e Mo (-0.13) apresentaram pesos negativos. As variáveis Mn (0.04), S (0.06), pH (0.15) e CE (0.14) tiveram pesos mais baixos, mas ainda assim influenciaram o primeiro componente.

O PC2 foi composto principalmente pelas variáveis Mn (-0.41), S (-0.44) que apresentaram as maiores cargas negativas, e Zn (0.29), que teve uma carga positiva relevante. Além disso, P (0.20), Ca (0.16), Mg (0.15), Cu (0.26), B (0.18), Co (0.15), Mo (0.23), pH (0.36), CE (0.26) e N total (0.30) também influenciaram o segundo componente com pesos positivos. As variáveis NO_3 (0.03) e Fe (-0.07) tiveram menor contribuição para o PC2.

No “biplot” (Figura 13), observa-se uma separação clara entre os dias de coleta, indicando uma dinâmica temporal na distribuição dos nutrientes e fatores físico-químicos. Os dias iniciais (Dia 0 e Dia 3) estão mais associados a valores positivos de PC2, refletindo maior influência de nutrientes como Cu, Zn e B. Por outro lado, os dias finais (Dia 15 e Dia 18) estão associados a valores positivos de PC1, indicando relação com pH, condutividade elétrica (CE) e nitrogênio total (N total).

As cargas dos componentes principais reforçam essas observações. O PC1 foi fortemente correlacionado positivamente com pH (0.15), CE (0.14) e N total (0.20), enquanto nutrientes como Cu (-0.28), Zn (-0.26) e B (-0.31) apresentaram correlação negativa. No PC2, observou-se uma forte correlação negativa com Mn (-0.41) e S (-0.44) e positiva com pH (0.36), destacando uma variação contrastante entre esses elementos ao longo do tempo.

Esses resultados sugerem que as condições de liberação de nutrientes e fatores ambientais variaram ao longo dos 18 dias, o que pode influenciar diretamente os processos de absorção e disponibilidade de nutrientes para as plantas em cultivo artificial. Na prática, não há necessidade de reposição de nutrientes em períodos menores do que os 18 dias, o que acarretaria provavelmente em um excesso de minerais no sistema, prejudicando o crescimento vegetal.

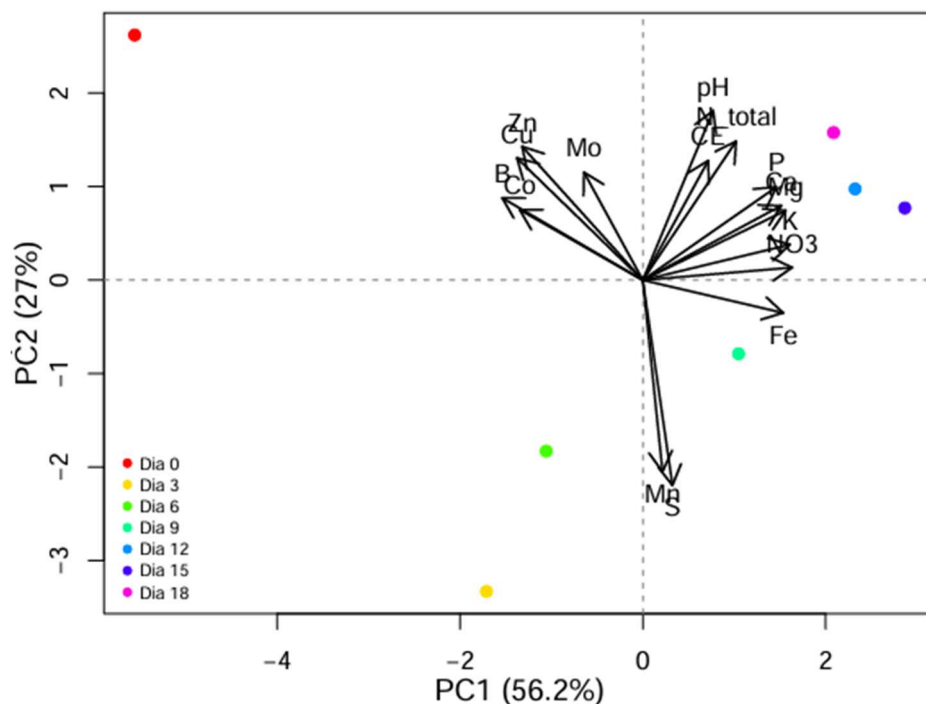


Figura 12 - Gráfico de Componentes principais (PCA) da dinâmica de nutrientes liberados pelo substrato para água durante o período de 18 dias.

4.2 TEOR DE NUTRIENTES EM *I. cangae*

4.2.1 Distribuição dos Macronutrientes

Na análise da distribuição dos macronutrientes nas plantas controle, provenientes da piscina que forneceu os indivíduos para os demais experimentos, observou-se uma variação nas concentrações de nutrientes ao longo das diferentes partes da planta, incluindo corno, raiz, folhas intermediárias, folhas externas e folhas internas (Figura 13). A concentração de nitrogênio (N) foi relativamente uniforme em todas as regiões. Em contraste, o fósforo (P) foi armazenado em maior quantidade na raiz, com uma concentração de 17,1 g/kg. O potássio (K) apresentou maiores concentrações nas folhas, com uma média de 37,57 g/kg, em comparação com as outras regiões. O cálcio (Ca) foi principalmente concentrado na raiz, com uma concentração de 10,1 g/kg. Por outro lado, o magnésio (Mg) e o enxofre (S) foram os nutrientes armazenados em menores quantidades.

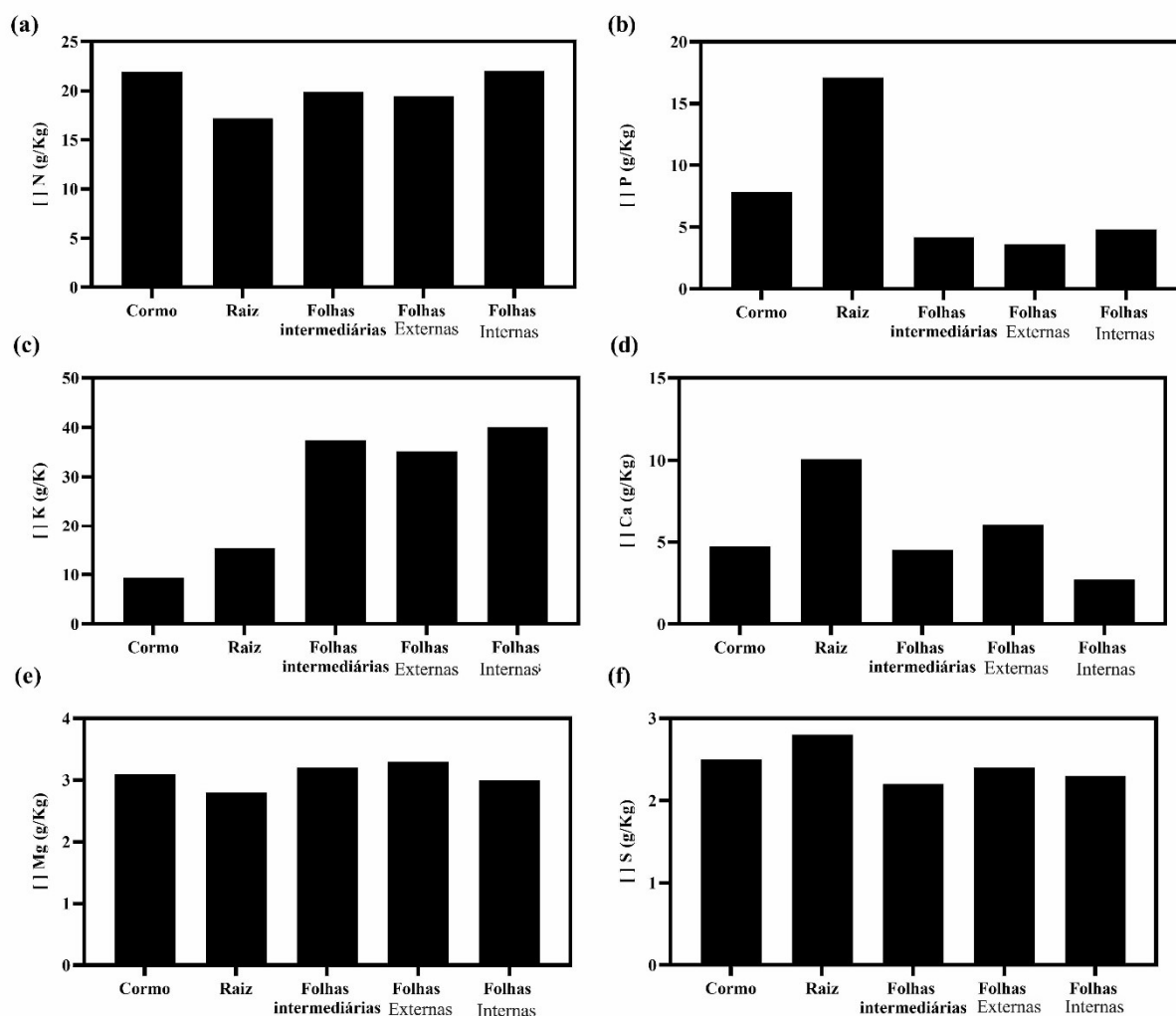


Figura 13 - Armazenamento dos macronutrientes nas estruturas do cormo, raiz, folhas intermediárias, folhas externas e folhas internas da *Isoetaceae I. cangae*, avaliados em 20 plantas. (a) Distribuição do armazenamento de N nos órgãos da planta; (b) Distribuição do armazenamento de P nos órgãos da planta; (c) Distribuição do armazenamento de K nos órgãos da planta; (d) Distribuição do armazenamento de Ca nos órgãos da planta; (e) Distribuição do armazenamento de Mg nos órgãos da planta e (f) Distribuição do armazenamento de S nos órgãos da planta.

4.2.2 Distribuição dos Micronutrientes

A distribuição dos micronutrientes nas diferentes regiões da planta revelou possíveis variações (Figura 6). O ferro (Fe) foi predominantemente armazenado na raiz, com uma concentração de 35.146,6 mg/kg, seguido pelo cormo e folhas externas com concentrações de 12.272,30 mg/kg e 6.434,02 mg/kg, respectivamente. As folhas internas apresentaram a menor concentração de Fe, com 1.287,64 mg/kg.

O cobre (Cu) foi o micronutriente menos armazenado em comparação com os outros, com a maior quantidade acumulada na raiz, com uma concentração de 24,35 mg/kg.

O boro (B) teve o maior armazenamento na raiz, com 59,62 mg/kg, seguido pelas folhas externas (35,85 mg/kg), intermediárias (27,53 mg/kg), internas (24,04 mg/kg), e pelo corno (23,44 mg/kg).

O manganês (Mn) foi armazenado em maior quantidade nas folhas externas (9.971,59 mg/kg), seguido pelas folhas intermediárias (6.665,35 mg/kg), raiz (4.943,14 mg/kg), corno (1.639,90 mg/kg) e folhas internas (1.503,95 mg/kg).

O zinco (Zn) apresentou a maior concentração na raiz (83,80 mg/kg) e nas folhas externas (59,44 mg/kg), seguido pelas folhas intermediárias (44,58 mg/kg), internas (32,49 mg/kg) e pelo corno (33,20 mg/kg).

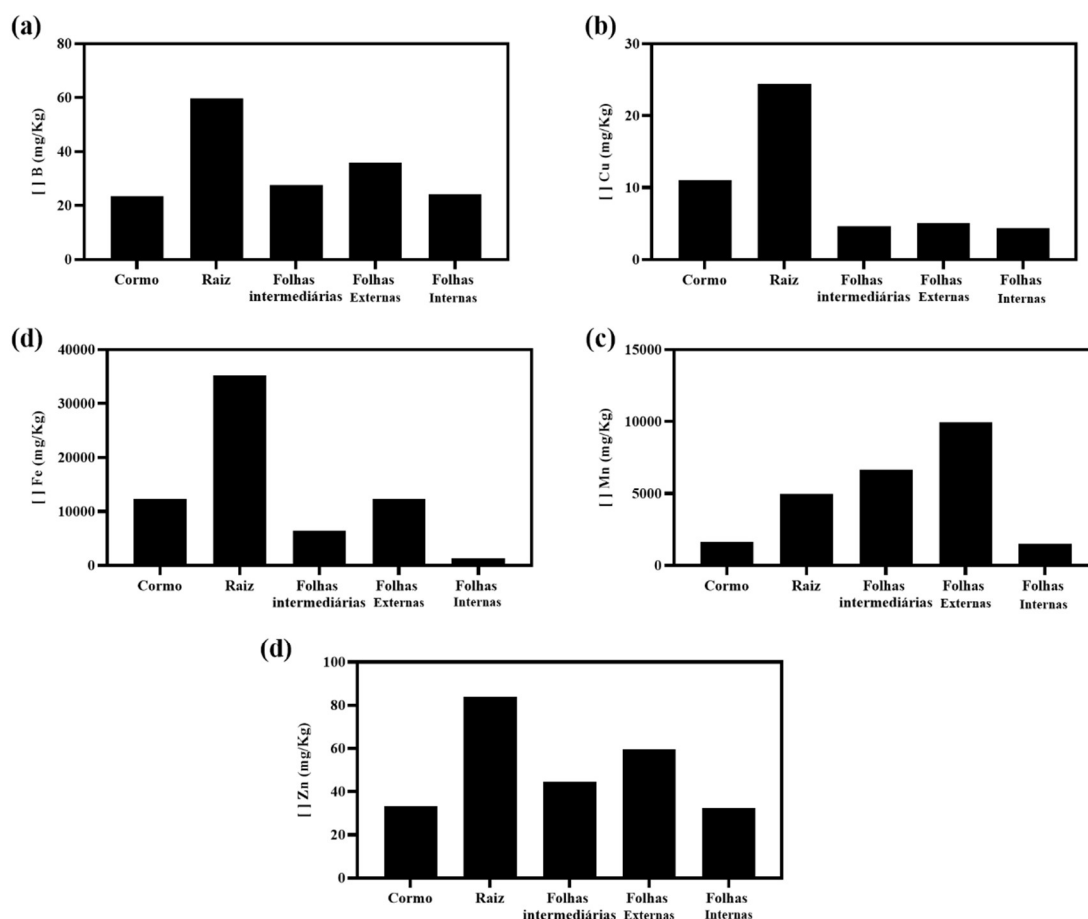


Figura 14 - Armazenamento de micronutrientes nas estruturas do corno, raiz, folhas intermediárias, folhas externas e folhas internas da *Isoetaceae I. cangae*. (Figura 15 – a) Distribuição do armazenamento de B nos órgãos da planta; (Figura 15 – b) Distribuição do armazenamento de Cu nos órgãos da planta; (Figura 15 – c) Distribuição do armazenamento de Fe nos órgãos da planta; (Figura 15 – d) Distribuição

do armazenamento Mn nos órgãos da planta; (Figura 15 – e) Distribuição do armazenamento de Zn nos órgãos da planta.

4.3 LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES DO SUBSTRATO E CAPTAÇÃO POR *I. cangae*

Durante o ensaio do Experimento II (Figura 16), que teve como objetivo identificar a dinâmica de liberação de nutrientes pelo substrato e a captação por *I. cangae*, observou-se que a água nos potes se tornou gradativamente mais turva e alterou sua coloração ao longo das semanas, especialmente até o final do segundo mês (Figura 17).



Figura 15 - Experimento para avaliar a dinâmica de liberação de nutrientes - 20 potes contendo 1 indivíduo de *I. cangae* cada, substrato Jiffy® e areia.

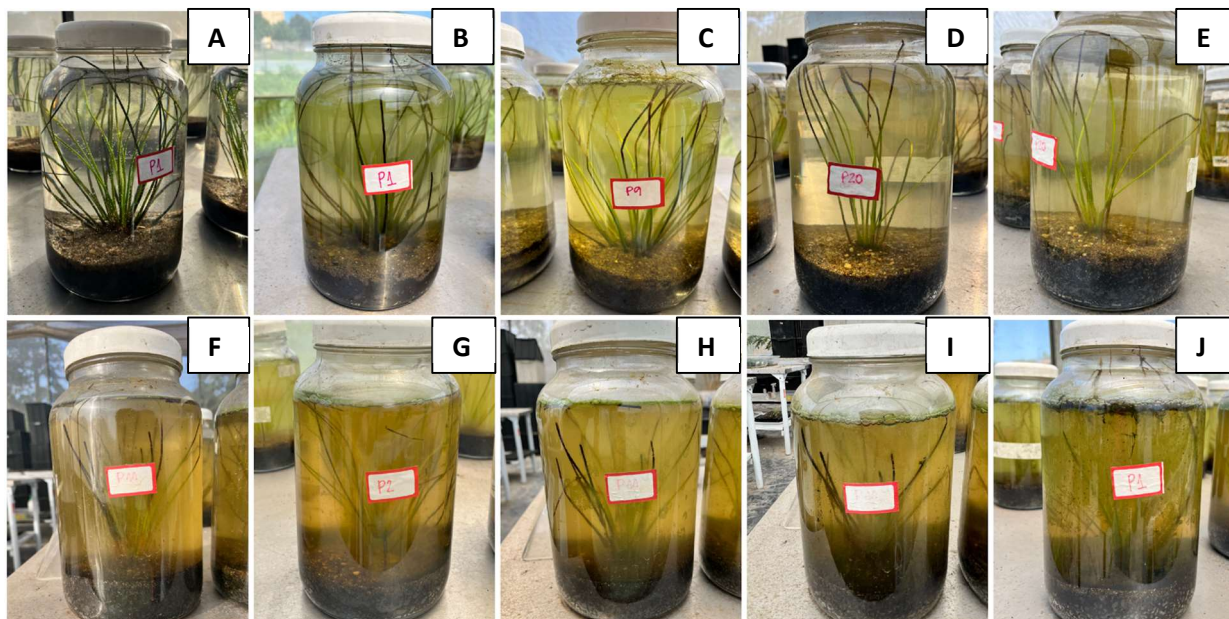


Figura 16 - Fotos dos potes ao longo das semanas do experimento (A) semana 0; (B) Semana 1 - dia da montagem do experimento; (C) Semana 2; (D) Semana 3; (E) Semana 4; (F) Semana 5; (G) Semana 6; (H) Semana 7; (I) Semana 8; (J) Semana 9 - última semana, dia do desmonte do experimento.

4.3.1 Análise do Substrato

Após os dois meses de experimento, os potes foram desmontados, e parte do substrato foi coletado em triplicata de amostra composta. As amostras submetidas a análises químicas de suas composições e disponibilidade de nutrientes indicaram (Tabela 1) que, em relação aos macronutrientes, o teor de Nitrogênio total foi de 0,20%. A concentração de fósforo (P) disponível foi de 31,63 mg dm⁻³, enquanto o K apresentou uma concentração de 0,10 cmol dm⁻³, o S 5,40 mg dm⁻³, o Ca 3,0 cmol dm⁻³ e o Mg 1,03 cmol dm⁻³. O valor H+Al igual a 1,60 cmol dm⁻³, indicando uma acidez potencialmente moderada do substrato.

No que diz respeito aos micronutrientes, o Fe apresentou maior concentração, com 182,67 mg dm⁻³, seguido pelo Mn, com 35,30 mg dm⁻³. As concentrações dos demais micronutrientes variaram entre 0,20 e 2,0 mg dm⁻³: B com 0,2 mg dm⁻³, Cu com 0,43 mg dm⁻³ e Zn com 2,03 mg dm⁻³.

As análises da composição do substrato mostraram um teor de matéria orgânica de 0,20 dag/kg, carbono orgânico de 2,17 dag/kg, soma das bases e t de 4,14 cmol/dm³, capacidade de troca catiônica (T) de 5,74 cmol dm⁻³ e uma saturação de 72,0%. O pH do substrato em água (H₂O) foi de 5,77, enquanto o pH em CaCl₂ foi de 5,17.

Tabela 2 - Análise nutricional do substrato pós experimento II.

Macronutrientes			
Nitrogênio Total (%)	0,20	±	0,11
Fósforo disponível (mg dm ⁻³)	31,63	±	6,75
Potássio (mg dm ⁻³)	38,33	±	8,08
Potássio (cmolc dm ⁻³)	0,10	±	0,02
Enxofre (mg dm ⁻³)	5,40	±	1,01
Cálcio (cmolc dm ⁻³)	3,00	±	0,52
Magnésio (cmolc dm ⁻³)	1,03	±	0,15
H+Al (cmolc dm ⁻³)	1,60	±	0,10
Micronutrientes (mg/Kg)			
Boro (mg dm ⁻³)	0,20	±	0,02
Cobre DTPA (mg dm ⁻³)	0,43	±	0,06
Ferro DTPA (mg dm ⁻³)	182,67	±	23,71
Manganês DTPA (mg dm ⁻³)	35,30	±	4,76
Zinco DTPA (mg dm ⁻³)	2,03	±	0,38
Análise dos substratos			
Matéria Orgânica (dag kg ⁻¹)	3,70	±	0,36
Carbono Orgânico (dag kg ⁻¹)	2,17	±	0,21
Soma das bases (cmolc dm ⁻³)	4,14	±	0,68
T (cmolc dm ⁻³)	5,74	±	0,59
t (cmolc dm ⁻³)	4,14	±	0,68
Saturação de bases (%)	72,00	±	4,58
Relações entre as bases			
Ca/Mg	2,90	±	0,17
Ca/K	30,77	±	4,63
Mg/K	10,70	±	1,22
Ca+Mg/K	41,43	±	5,85
Ca/T	52,00	±	4,00
Mg/T	18,33	±	0,58
K/T	2,00	±	0,00
H+Al/T	28,00	±	4,58
Ca+Mg/T	70,33	±	4,51
Ca+Mg+K/T	72,00	±	4,58
pH			
pH H ₂ O	5,77	±	0,15
pH CaCl ₂	5,17	±	0,06

4.3.2 Análise nutricional das plantas

4.3.2.1 Distribuição de Macronutrientes

Na análise da distribuição dos macronutrientes nos tecidos vegetais, foi observado uma variação nas concentrações de nutrientes ao longo das diferentes partes da planta, incluindo corno, raiz, folhas intermediárias, folhas externas e folhas internas. O Nitrogênio (N) foi o macronutriente mais armazenado, observou-se maior teor na raiz e (31,2 g/kg) e no corno (28,1 g/kg), em comparação com as folhas. Entre as folhas, as mais internas apresentaram o maior armazenamento (27,1 g/kg), seguidas pelas folhas intermediárias (25,3 g/kg) e externas (23,7 g/kg) (Figura 9 – a). O Fósforo (P) foi encontrado em concentrações mais altas na raiz (9,1 g/kg) e no corno (8,9 g/kg). Em relação as folhas, dentre as folhas, as internas apresentaram a maior concentração (7,7 g/kg), seguidas pelas intermediárias (6,7 g/kg) e externas (4,2 g/kg) (Figura 9 – b). O Potássio (K) apresentou maiores concentrações no corno (10,9 g/kg) e na raiz (9,1 g/kg). Nas folhas, as internas (7,7 g/kg) e intermediárias (6,7 g/kg) apresentaram maiores teores de K em comparação com as folhas externas (4,2 g/kg) (Figura 9 – c). O Cálcio (Ca) foi acumulado em maiores teores na raiz (8,8 g/kg), seguida pelas folhas externas (6,7 g/kg) e o corno (5,9 g/kg). As folhas internas (3,3 g/kg) e intermediárias (4,0 g/kg) apresentaram menores concentrações do elemento (Figura 9 – d). O Magnésio (Mg) foi mais acumulado pelas folhas, com destaque para as folhas intermediárias (5,7 g/kg), seguidas pelas folhas internas (4,7 g/kg) e externas (3,6 g/kg). O corno (3,4 g/kg) e a raiz (1,6 g/kg) apresentaram menores concentrações de Mg (Figura 9 – e). Já o Enxofre (S), foi o elemento que apresentou as menores concentrações, sendo que, os maiores teores de S foram encontrados na raiz (4,1 g/kg) e no corno (3,5 g/kg), enquanto as folhas, incluindo internas (2,4 g/kg), intermediárias (2,4 g/kg) e externas (2,2 g/kg), apresentaram menores concentrações (Figura 9 – f).

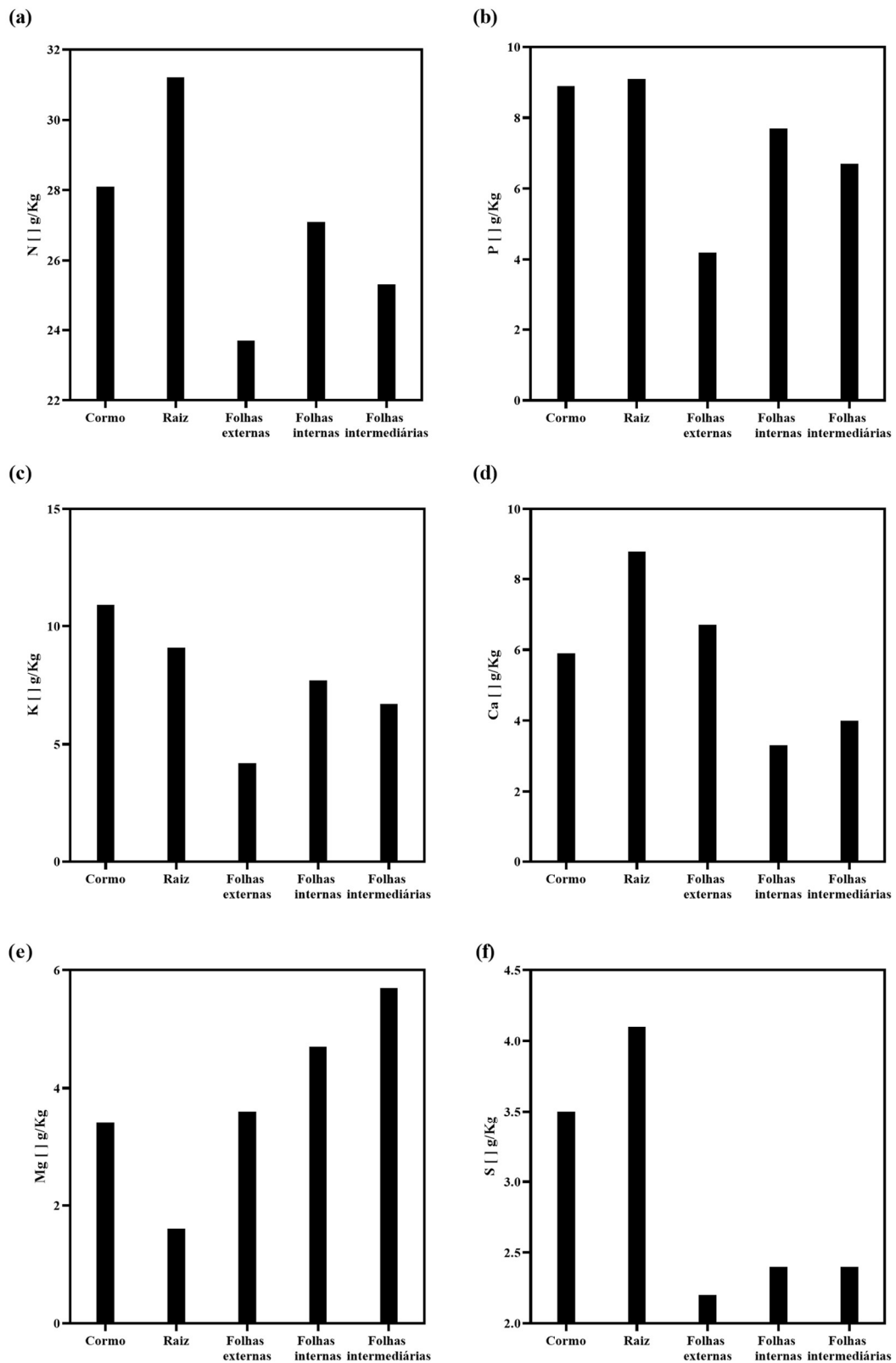


Figura 17 - Concentração de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) em relação a cada órgão vegetal (cormo, raiz, folhas externas, folhas intermediárias e folhas internas). (a) Teor de Nitrogênio (b) Teor de Fósforo (c) Teor de Potássio (d) Teor de Cálcio (e) Teor de Magnésio (f) Teor de Enxofre.

4.3.2.2 Distribuição de Micronutrientes

A distribuição dos micronutrientes nas diferentes regiões da planta revelou variações significativas. O Fe foi o micronutriente mais acumulado, com concentrações mais elevadas na raiz (17.792 mg/kg) e no corno (14.043 mg/kg). Entre as folhas, as externas apresentaram a maior acumulação (2.225 mg/kg), seguidas pelas internas (228 mg/kg) e intermediárias (187 mg/kg) (Figura 10 – c). O B foi predominantemente acumulado nas folhas internas (82 mg/kg), seguido pela raiz (48 mg/kg), folhas intermediárias (40 mg/kg), folhas externas (27 mg/kg) e corno (20 mg/kg) (Figura 10 – a). O Cu apresentou maiores concentrações nas folhas internas (38 mg/kg), seguido pela raiz (24 mg/kg), corno (19 mg/kg), folhas intermediárias (13 mg/kg) e folhas externas (9 mg/kg) (Figura 10 – b). O Mn foi mais acumulado no corno (2.568 mg/kg), seguido pela raiz (2.158 mg/kg) e folhas externas (1.706 mg/kg). As folhas intermediárias (790 mg/kg) e internas (624 mg/kg) apresentaram menores concentrações (Figura 10 – d). Enquanto o Zn foi mais acumulado na raiz (104 mg/kg), seguido pelas folhas internas (65 mg/kg), corno (62 mg/kg), folhas intermediárias (59 mg/kg) e folhas externas (54 mg/kg) (Figura 10 – e).

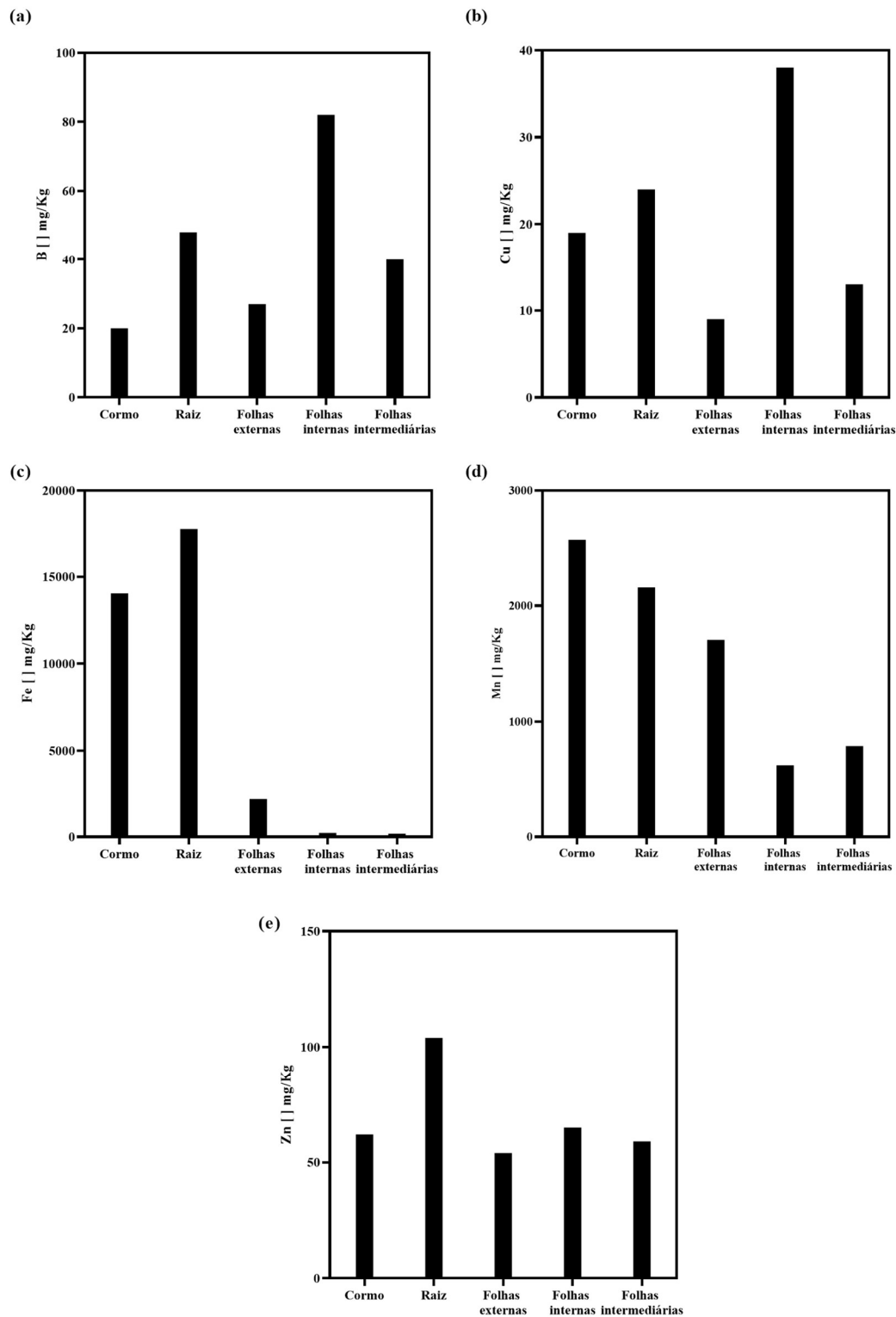


Figura 18 - Concentração de micronutrientes em relação a cada órgão vegetal (cormo, raiz, folhas externas, folhas intermediárias e folhas internas). (a) Teor de Boro (b) Teor de Cobre (c) Teor de Ferro (d) Teor de Manganês (e) Teor de Zinco.

A análise gráfica em forma de diagrama de radar (Figura 20) apresenta a concentração de macro e micronutrientes em diferentes partes da planta *Isoëtes cangae*: cormo, raiz, folhas externas, internas e intermediárias. Observa-se que o nitrogênio (N) foi o nutriente com as maiores concentrações em todas as partes analisadas, destacando-se no cormo. Por outro lado, nutrientes como zinco (Zn) e cobre (Cu) apresentaram as menores concentrações, com valores homogêneos entre as diferentes partes da planta.

Os macros e micronutrientes cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) exibiram concentrações mais elevadas nas raízes em relação às folhas, enquanto o cormo mostrou concentrações intermediárias. As folhas, particularmente as externas, apresentaram maior variação na distribuição dos micronutrientes ferro (Fe), manganês (Mn) e boro (B), com valores levemente superiores em comparação às folhas internas e intermediárias.

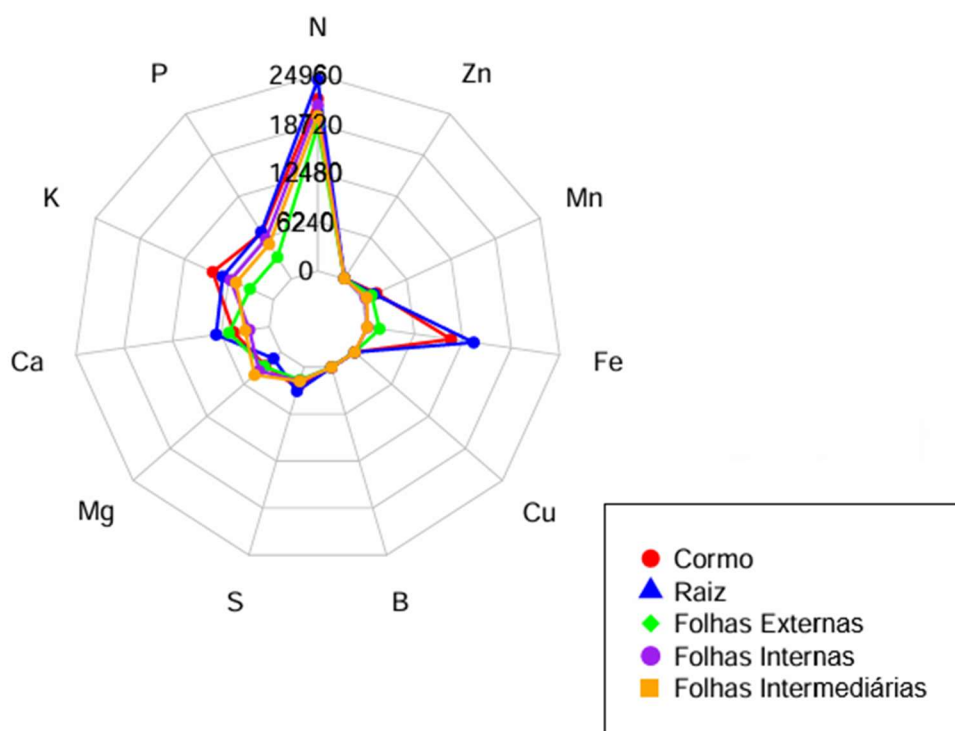


Figura 19 - Concentração de macronutrientes e micronutrientes em relação a cada órgão vegetal (cormo, raiz, folhas externas, folhas intermediárias e folhas internas) apresentadas nas figuras 18 e 19.

4.4 SUBSTÂNCIAS HÚMICAS

A extração e o fracionamento quantitativo das substâncias húmicas foram realizadas no substrato oriundo do Lago Amendoim, entretanto, devido a problemas técnicos, não foi possível realizar a caracterização e a aplicação das substâncias. A extração e o fracionamento das substâncias húmicas do substrato do Lago Amendoim revelaram as concentrações de carbono nas diferentes frações, conforme apresentado na Tabela 4. A amostra apresentou um conteúdo total de carbono de 37,56 mg/g. As frações de substâncias húmicas foram compostas por 14,92% de ácido fúlvico, 18,83% de ácido húmico e 66,24% de humina, refletindo a predominância da fração de humina no substrato.

Amostra	% de Carbono nas frações			
	Carbono Total mg/g	Ácido fúlvico %	Ácido húmico %	Humina %
Amendoim	37,56	14,9219	18,8334	66,2447

Tabela 3 - Concentrações de carbono nas diferentes frações das substâncias húmicas do substrato do Lago Amendoim, após fracionamento. Os valores apresentados correspondem às frações de ácido fúlvico, ácido húmico e humina.

5 DISCUSSÃO

Os aspectos nutricionais de uma espécie são fundamentais para sua sobrevivência, uma vez que estão diretamente relacionados à manutenção de funções fisiológicas essenciais. Este trabalho teve como interesse principal estudar a dinâmica nutricional na fisiologia de *Isoëtes cangae*, identificar e descrever seus padrões de captação e absorção de nutrientes em condição artificial, visando contribuir para estratégias que garantam a conservação da espécie. Apesar da biodisponibilidade de nutrientes ser crucial para evitar restrições ambientais à produtividade vegetal, estudos específicos com *Isoëtes* ainda são escassos, evidenciando a relevância desta pesquisa.

Apesar das diferenças entre as condições artificiais e o ambiente natural de *Isoëtes cangae*, como o pH mais elevado (6,3) no substrato comercial em relação ao sedimento ácido encontrado no ambiente natural (4,9), essas variações não parecem ter comprometido o cultivo e desenvolvimento da espécie. O pH mais ácido encontrado no sedimento do Lago Amendoim, habitat de *I. cangae* está relacionado com a crosta laterítica, rica em ferro tipicamente encontrada em áreas naturais de canga (PRADO et al., 2023). A boa capacidade de adaptação a diferentes condições de cultivo foi corroborada por estudos anteriores, que também relataram o sucesso do cultivo e aclimatação de *Isoëtes cangae* (CALDEIRA et al., 2023). Além disso, outras espécies de *Isoëtes* também são frequentemente associadas a habitats com sedimentos de pH baixo, como *I. dixitei* na Índia e *I. echinospora* e *I. lacustris* na República Tcheca (SUDOVÁ et al., 2011; YADAV et al., 2015 *apud* ZANDONADI et al., 2020). Essas espécies habitam ambientes em que nutrientes minerais e orgânicos apresentam concentrações variáveis, refletindo o material de origem do substrato e as condições climáticas locais (CALDEIRA et al., 2023).

No experimento I, onde foi avaliada a dinâmica de liberação de nutrientes do substrato para água ao longo de 18 dias, indicaram uma liberação progressiva de nutrientes ao longo do tempo. Entre os macronutrientes, a liberação de cálcio (Ca) foi a mais expressiva, concentrações superiores a 40 mg/L no último dia, possivelmente devido à alta matéria orgânica do substrato, que facilita sua dissociação em meio aquoso. Por outro lado, a liberação de nitrogênio (N) foi mais restrita, com valores próximos de 5 mg/L, o que sugere uma maior complexidade na liberação desse nutriente. Isso pode ser atribuído à forma em que o N se encontra no substrato, possivelmente mais ligado a compostos orgânicos, dificultando sua disponibilidade imediata. Outros macronutrientes, como fósforo (P), potássio (K) e magnésio (Mg), apresentaram

concentrações médias de liberação, respectivamente, refletindo a solubilidade desses nutrientes no substrato. A liberação de micronutrientes foi inferior, com destaque para o ferro (Fe), que apresentou as maiores concentrações, enquanto o cobre (Cu) apresentou as menores concentrações, o que pode estar relacionado à sua baixa mobilidade no substrato.

A análise de componentes principais, evidenciou uma forte associação entre as variáveis nutricionais e físico-químicas, corroborando as alterações na dinâmica de liberação de nutrientes ao longo do experimento. A separação clara entre os dias de coleta no biplot sugere que fatores como pH e condutividade elétrica influenciaram significativamente essas condições, destacando a importância dessas variáveis na manutenção da disponibilidade de nutrientes no sistema.

O experimento II, que avaliou a dinâmica de liberação de nutrientes pelo substrato e captação por *I. cangae*. A análise nutricional das plantas controle e das plantas após o experimento II, que avaliou a dinâmica de liberação de nutrientes pelo substrato e captação por *I. cangae*, que revelou padrões diferenciados de absorção e acúmulo de nutrientes entre os órgãos da planta. A raiz e o corno foram as regiões de maior acúmulo de nutrientes em comparação com as folhas. Entre estas, as folhas internas acumularam maiores teores, seguidas pelas folhas intermediárias e externas, que apresentaram os menores teores. Esse padrão reflete estratégias fisiológicas distintas de armazenamento e mobilização de nutrientes, essenciais para a sobrevivência.

Esses resultados estão alinhados com o conceito de alocação prioritária de nutrientes para tecidos em crescimento, mais fotosinteticamente ativos e com maior demanda metabólica, em contraste com tecidos mais velhos, que eventualmente entraram em senescência e, portanto, não necessitam dos mesmos teores nutricionais. Além disso, em ambientes oligotróficos, onde a disponibilidade de nutrientes é limitada, essa mobilização eficiente garante que os recursos sejam direcionados para estruturas que oferecem maior retorno funcional, como crescimento vegetativo e reprodutivo. Essa estratégia é essencial para a sobrevivência em habitats onde os nutrientes não estão prontamente disponíveis.

Entre os macronutrientes, os mais acumulados foram o nitrogênio (N), com 31,2 g/kg na raiz e 28,1 g/kg no corno; o fósforo (P), com 9,1 g/kg na raiz e 8,9 g/kg no corno; e o potássio (K), com 10,9 g/kg no corno e 9,1 g/kg na raiz. Esses nutrientes são essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Quanto aos micronutrientes, a raiz e o corno destacaram-se pelo acúmulo de ferro (Fe; 17.792 mg/kg na raiz e 14.043 mg/kg no corno), manganês (Mn; 2.568 mg/kg no corno) e zinco (Zn; 104 mg/kg na raiz).

I. cangae em seu ambiente natural apresenta em suas folhas teores médios de 2,8% de N e 1,7% de P em condições naturais (CALDEIRA et al., 2023). Esses valores são superiores aos observados em folhas de *I. lacustris* em lagos oligotróficos da Europa, que apresentam 1,8–2,6% de N e 0,02–0,26% de P (Richardson et al., 1984; Gacia e Ballesteros, 1994; Christensen et al., 1998 *apud* Zandonadi et al, 2020).

As folhas internas apresentaram os maiores teores de N (27,1 g/kg), P (7,7 g/kg) e K (7,7 g/kg), além de magnésio (Mg), essencial para a fotossíntese, com maior concentração nas folhas intermediárias (5,7 g/kg) e internas (4,7 g/kg) em comparação às externas (3,6 g/kg). Esses resultados ressaltam o papel diferencial dos órgãos de *I. cangae* na captação e armazenamento de nutrientes, refletindo adaptações evolutivas cruciais para a sobrevivência em ambientes com baixa disponibilidade de nutrientes.

5.1 SUBSTÂNCIAS HÚMICAS

A extração e o fracionamento das substâncias húmicas do substrato do Lago Amendoim revelaram um conteúdo total de carbono de 37,56 mg/g, o que é indicativo de um substrato relativamente rico em matéria orgânica. Essa riqueza em carbono pode ser interpretada como um fator positivo para a sustentação de uma atividade biológica significativa no sedimento, pois substâncias húmicas, como ácidos fúlvico e húmico, são fundamentais na promoção da solubilidade de nutrientes (principalmente os cátions divalentes como Fe, Mn e Cu) e no aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) do substrato, o que contribui diretamente para a maior disponibilidade de nutrientes. Em ambientes oligotróficos sazonais, como o Lago Amendoim, onde a limitação de nutrientes é um desafio que varia com época do ano, a presença dessas substâncias supostamente favorece a sobrevivência das plantas, garantindo um fornecimento gradual e eficiente de recursos essenciais. Acredita-se que boa parte desse carbono depositado no fundo do Lago possa ser oriundo de deposições provenientes de água de coloração escura de alagado sazonal, que durante épocas chuvosas extravasam para o Lago Amendoim (SANTOS et al., 2023).

As frações de substâncias húmicas encontradas no substrato foram compostas por 14,92% de ácido fúlvico, 18,83% de ácido húmico e 66,24% de humina, com destaque para a predominância da humina. Por ser uma substância mais estável e resistente à decomposição microbiana, a humina pode atuar como uma reserva duradoura de carbono no substrato, permitindo a liberação gradual de nutrientes ao longo do tempo. Essa estabilidade pode ser

particularmente benéfica para *I. cangae*, que habita ambientes com baixa disponibilidade de nutrientes, onde a presença de compostos mais duráveis permite que a planta tenha acesso gradual a recursos essenciais. Além disso, a maior estabilidade da humina pode contribuir para a manutenção de um ambiente adequado para a atividade biológica no substrato, favorecendo o desenvolvimento de microorganismos benéficos que interagem com as raízes da planta.

Por outro lado, a menor proporção de ácido fúlvico e ácido húmico, que são compostos “mais solúveis e biodegradáveis” em comparação às huminas, sugere que o substrato no Lago Amendoim pode liberar nutrientes de forma mais lenta e gradual. Esse padrão de liberação controlada é vantajoso em ecossistemas onde a disponibilidade de nutrientes é naturalmente restrita, permitindo que as plantas se beneficiem de um fornecimento constante e prolongado de recursos. É importante ressaltar que a origem exata do Carbono das substâncias húmicas estudadas não está elucidada.

Esses resultados são promissores para a continuidade do estudo, que, devido a problemas técnicos, não pôde ser totalmente realizado neste trabalho. Para os próximos passos, será importante realizar um experimento de dose-resposta para avaliar os efeitos bioativos dos ácidos húmicos extraídos do sedimento do Lago Amendoim. A interação entre essas frações de substâncias húmicas e os nutrientes no substrato pode potencialmente melhorar a absorção de macronutrientes e micronutrientes.

6 CONCLUSÃO

Este estudo contribuiu para o entendimento da dinâmica nutricional de *Isoëtes cangae*, evidenciando importantes adaptações fisiológicas e padrões de captação e armazenamento de nutrientes. As análises realizadas demonstraram que o substrato comercial Jiffy® forneceu condições adequadas para o desenvolvimento da espécie, com níveis satisfatórios de macro e micronutrientes, matéria orgânica e carbono orgânico. Apesar de diferenças no pH em relação ao habitat natural, a espécie mostrou elevada capacidade de adaptação a condições artificiais.

Os experimentos realizados indicaram que o substrato liberou nutrientes de forma progressiva ao longo dos dias, com destaque para o cálcio, enquanto o nitrogênio apresentou liberação mais limitada. A análise de componentes principais reforçou a influência de variáveis físico-químicas, como pH e condutividade elétrica, na dinâmica de liberação de nutrientes, que covariaram.

A distribuição diferenciada de nutrientes nos órgãos de *I. cangae* revelou estratégias específicas de armazenamento e utilização. A raiz e o corno foram identificados como os principais locais de acúmulo de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, enquanto as folhas internas e intermediárias concentram nutrientes relacionados à fotossíntese, como magnésio. Essas estratégias refletem a capacidade da espécie de otimizar a utilização de recursos em ambientes com baixa disponibilidade de nutrientes.

O conhecimento sobre a dinâmica nutricional em *I. cangae*, pode desempenhar um papel fundamental na compreensão da capacidade adaptativa desta espécie em condições controladas e naturais e podem ser importantes para nortear ações de conservação para a espécie e suas congêneres.

No anexo I está o manuscrito em processo de submissão abarcando os resultados apresentados aqui.

7 CRONOGRAMA

Quadro 1- Cronograma de atividades

	ATIVIDADES/ETAPAS	SEMESTRE			
		2023.1	2023.2	2024.1	2024.2
1	Revisão bibliográfica	X	X	X	X
2	Amostragens	X	X	X	
3	Análises e discussão de dados		X	X	
4	Realização de experimentos	X	X	X	
5	Participação em eventos científicas		X	X	X
6	Entrega do Projeto A	X			
7	Entrega do Projeto B		X		
8	Entrega do Projeto C				X
9	Defesa do TCC				X

Fonte: a autora.

8 REFERÊNCIAS

- Azzella, M.M., Vecchia, A.D., Abeli, T., Alahuhta, J., Amoroso, V.B., Ballesteros, E., Bertrin, V., Brunton, D., Bobrov, A.A., Caldeira, C. and Ceschin, S., 2024. Global assessment of aquatic Isoëtes species ecology. **Freshwater Biology**, 69(10), pp.1420-1437.
- BENITES, V. de M.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. de A. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2003. 7 p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 16). Disponível em: Embrapa.
- CALDEIRA, C. F. et al. 2019. Sporeling regeneration and ex situ growth of *Isoëtes cangae* (Isoetaceae): Initial steps towards the conservation of a rare Amazonian quillwort. – **Aquat Bot** 152: 51-58.
- CARMO, FF do et al. Cangas: ilhas de ferro estratégicas para a conservação. **Ciência Hoje**, v. 295, n. 50, p. 48-53, 2012.
- CARMO, Flávio Fonseca do; JACOBI, Claudia Maria. A vegetação de canga no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: caracterização e contexto fitogeográfico. **Rodriguésia**, v. 64, p. 527-541, 2013.
- CAVALHEIRO-FILHO, Sergio L. et al. Morphological plasticity in the endemic *Isoëtes* species from Serra dos Carajás, Amazonia, Brazil. **American Fern Journal**, v. 111, n. 3, p. 174-195, 2021.
- CHEN, Yuan-Yuan et al. Genetic diversity and population structure of the endangered alpine quillwort *Isoetes hypsophila* Hand-Mazz. revealed by AFLP markers. **Plant Systematics and Evolution**, v. 290, p. 127-139, 2010.
- CUNHA, T. J. DA; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. (2016). **Matéria orgânica do solo**. Embrapa Semiárido-Capítulo em livro científico (ALICE).
- DALAPICOLLA, Jeronymo et al. Conservation implications of genetic structure in the narrowest endemic quillwort from the Eastern Amazon. **Ecology and Evolution**, v. 11, n. 15, p. 10119-10132, 2021.
- GUIMARÃES, José Tasso Felix et al. Late Quaternary *Isoëtes* megaspores as a proxy for paleolimnological studies of the southeastern Amazonia. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 125, p. 104312, 2023.
- JUCOSKI, Gládis de Oliveira et al. Excess iron on growth and mineral composition in *Eugenia uniflora* L. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, p. 720-728, 2016.
- LANSDOWN, R.. *Isoetes cangae*. **The IUCN Red List of Threatened Species 2019**, v. 8235, 2019.
- LIU, Xing; WANG, Jing-Yuan; WANG, Qing-Feng. Current status and conservation

strategies for Isoetes in China: a case study for the conservation of threatened aquatic plants. **Oryx**, v. 39, n. 3, p. 335-338, 2005.

NUNES, Jaqueline A. et al. Soil-vegetation relationships on a banded ironstone 'island', Carajás Plateau, Brazilian Eastern Amazonia. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, p. 2097-2110, 2015.

PEREIRA, Jovani B. De S. et al. Two new species of Isoetes (Isoetaceae) from northern Brazil. **Phytotaxa**, v. 272, n. 2, p. 141–148-141–148, 2016.

PEREIRA, Jovani B.; ARRUDA, André Jardim; SALINO, Alexandre. Flora of the cangas of Serra dos Carajás, Pará, Brazil: Isoetaceae. **Rodriguésia**, v. 68, p. 853-857, 2017.

PRADO, Luis AS et al. Environmental characterization of an Amazonian lake for Isoetes cangae translocation. **Plant Ecology**, p. 1-10, 2023.

RAVEN, **Biologia vegetal**. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2014.

SANTOS, Fernanda Dias Dos et al. Fatores que afetam a disponibilidade de micronutrientes no solo. **Tecno-Lógica**, v. 25, n. 2, 2021.

SANTOS, Mirella Pupo; ARAUJO, João V. S. Rabelo; LOPES, Arthur V. Sant'anna; et al. The genetic diversity and population structure of two endemic Amazonian quillwort (Isoetes L.) species. **PeerJ**, v. 8, p. e10274, 2020. Disponível em: <<https://peerj.com/articles/10274>>. Acesso em: 6 ago. 2024.

SCHULZE, Ernst-Detlef, BECK, Erwin, MÜLLER-HOHENSTEIN, Klaus. **Plant Ecology**. Springer Science & Business Media, 2005.

SKIRYCZ, Aleksandra et al. Canga biodiversity, a matter of mining. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 653, 2014.

SOUZA-FILHO, Pedro Walfir M. et al. Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **Journal of environmental management**, v. 167, p. 175-184, 2016.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

ZANDONADI, D. B. **Bioatividade de substâncias húmicas: promoção do desenvolvimento radicular e atividade das bombas de H⁺** Campos dos Goytacazes: UENF. 2006. Dissertação mestrado.

ZANDONADI, Daniel Basílio et al. Ecophysiology of two endemic Amazon quillworts. **Aquatic Botany**, v. 170, p. 103350, 2021.

ANEXO I

Manuscript – Journal of Experimental Botany

DINÂMICA NUTRICIONAL EM *ISOËTES CANGAE*, UMA LICÓFITA ENDÊMICA DA AMAZÔNIA

*Maria Eduarda Belmont Antunes¹, Daniel Basílio Zandonadi¹.

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro.

*e-mail: belmont.madu@gmail.com

RESUMO (250 PALAVRAS)

Isoëtes cangae é uma licófito aquática endêmica e restrita da Amazônia. Este estudo investigou a dinâmica de liberação de nutrientes pelo substrato e a captação pelos órgãos vegetativos de *I. cangae* em condições semi-controladas, utilizando recipientes contendo água destilada, substrato comercial e areia para monitorar a liberação de macronutrientes e micronutrientes e determinar os padrões de acúmulo nos órgãos vegetais. A liberação de nutrientes do substrato foi monitorada por 18 dias, enquanto a captação pelos tecidos vegetais foi avaliada após 60 dias. Análises estatísticas descritivas e técnicas multivariadas foram aplicadas para interpretar os dados. Os resultados revelaram que raízes e cormos acumulam maior quantidade de nutrientes essenciais, como N, P e K, enquanto folhas internas demonstraram altos teores de Mg, relacionado à fotossíntese. Com destaque para alta acumulação ferro nos tecidos da planta. A análise estatística destacou padrões temporais de liberação e acúmulo, reforçando a adaptação da espécie a ambientes oligotróficos. Esses achados fornecem suporte para estratégias de conservação *ex situ* e manejo de habitats.

Palavras-chave (4-6 palavras-chave): *Isoëtes*, conservação, nutrientes, Amazônia.

INTRODUÇÃO

Isoëtes cangae J.B.S. Pereira, Salino & Stützel é uma licófito aquática endêmica da Amazônia. Esta espécie possui uma ocorrência restrita e exclusiva ao Lago Amendoim, um lago de 1,23 km² com forma alongada, situado na parte sul da Serra dos Carajás, no Parque Nacional da Serra dos Carajás, estado do Pará, e com profundidade de até 4 m (SANTOS et. al, 2020). Este lago de altitude está localizado sobre uma crosta ferruginosa, inserido na fitofisionomia de Canga, que contribui para que suas águas sejam oligotróficas e ferruginosas, com reduzida disponibilidade de nutrientes e à presença de concentrações elevadas de metais potencialmente tóxicos (CALDEIRA et. al, 2019). Esses fatores contribuem para o desenvolvimento de uma flora altamente especializada e adaptada a condições ambientais hostis (CARMO et al., 2012; NUNES et al., 2015). Atualmente *I. cangae* encontra-se classificada

como criticamente ameaçada pela Lista Vermelha da IUCN (LANSDOWN, 2019). A espécie tem enfrentado os efeitos negativos associados às mudanças nas condições ambientais, decorrentes principalmente das atividades de exploração mineral (CARMO et al., 2012). Esta atividade tem crescido na região devido às elevadas concentrações de metais de grande interesse. Assim, a licófito tem sofrido com a deterioração da qualidade de seu habitat, principalmente devido à expansão da mineração e às mudanças no ciclo hidroclimatológico da região, causadas pela conversão de áreas de floresta em pastagens (SOUZA-FILHO et al., 2016; PRADO et al., 2023). Considerando esse cenário, é essencial desenvolver estratégias para a conservação da espécie *Isoetes cangae*, que assim como outras espécies do mesmo gênero, enfrenta ameaças. Essas espécies estão sob risco significativo de extinção, principalmente devido à influência negativa das atividades humanas, que resulta na deterioração de habitats e na qualidade da água (LIU et al., 2005; CHEN et al., 2010; ZANDONADI et al., 2021).

Nutrientes minerais são essenciais para processos fisiológicos das plantas, incluindo fotossíntese, crescimento e metabolismo energético. A compreensão dos padrões de captação e distribuição de macronutrientes (N, P, K, Mg, Ca, S) e micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B) nos diferentes órgãos vegetativos é crucial para entender a fisiologia de *I. cangae* e planejar esforços de conservação.

Este estudo visa descrever a dinâmica de liberação de nutrientes do substrato e sua captação pelos diferentes órgãos vegetais de *I. cangae* em condições semi-controladas, contribuindo para estratégias de manejo ex situ e preservação da espécie.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados em condições semi-controladas, utilizando recipientes de vidro contendo uma mistura de água destilada, substrato comercial (Jiffy®) e areia na proporção de 2:1. Inicialmente, foram preparados quatro potes contendo apenas a mistura de substrato e areia para monitorar a liberação de nutrientes do substrato para a água ao longo de 18 dias. Durante esse período, amostras de água foram coletadas a cada 3 dias para analisar as concentrações de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu e B). Em um segundo ensaio, vinte plantas adultas de *I. cangae* foram cultivadas individualmente em potes contendo a mesma mistura de substrato e areia, por um período de 60 dias. Ao final do experimento, as plantas foram triadas em raízes, cormos e folhas (internas, intermediárias e externas), que foram secas e submetidas à análise nutricional.

Análises Estatísticas

Os dados foram analisados utilizando estatística descritiva e análise de componentes principais (PCA) para identificar padrões de liberação e acúmulo de nutrientes

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados revelaram uma dinâmica complexa de liberação de nutrientes do substrato para a água. Entre os macronutrientes, o cálcio (Ca) foi o mais abundantemente liberado, seguido pelo fósforo (P) e potássio (K), enquanto o nitrogênio (N) apresentou concentrações menores ao longo do experimento. O ferro (Fe) foi o micronutriente mais prevalente na água, destacando-se por sua alta disponibilidade inicial e estabilização ao final dos 18 dias. A análise de PCA indicou que fatores como pH e condutividade elétrica influenciaram significativamente a dinâmica de liberação.

A captação de nutrientes pelos órgãos vegetativos revelou padrões específicos de armazenamento. Raízes e cormos apresentaram concentrações mais elevadas de nutrientes essenciais, como N, P, K e Fe, em comparação às folhas. Este padrão reflete a função de armazenamento a longo prazo desempenhada por essas estruturas subterrâneas. Por outro lado, as folhas internas destacaram-se pelo acúmulo de magnésio (Mg), elemento associado diretamente à fotossíntese e ao metabolismo ativo.

Esses resultados têm implicações significativas para a conservação de *I. cangae*. A habilidade da espécie em capturar e armazenar eficientemente nutrientes demonstra sua adaptação a ambientes oligotróficos e fornece subsídios para o desenvolvimento de protocolos de conservação *ex situ*. Além disso, a compreensão das interações entre os fatores ambientais e a fisiologia da planta pode auxiliar na restauração de habitats naturais degradados.

REFERÊNCIAS

- CALDEIRA, C. F. et al. 2019. Sporeling regeneration and ex situ growth of *Isoetes cangae* (Isoetaceae): Initial steps towards the conservation of a rare Amazonian quillwort. – **Aquat Bot** 152: 51-58.
- CARMO, FF do et al. Cangas: ilhas de ferro estratégicas para a conservação. **Ciência Hoje**, v. 295, n. 50, p. 48-53, 2012.
- CHEN, Yuan-Yuan et al. Genetic diversity and population structure of the endangered alpine quillwort *Isoetes hypsophila* Hand-Mazz. revealed by AFLP markers. **Plant Systematics and Evolution**, v. 290, p. 127-139, 2010.
- LANSDOWN, R.. *Isoetes cangae*. **The IUCN Red List of Threatened Species 2019**, v. 8235, 2019.
- LIU, Xing; WANG, Jing-Yuan; WANG, Qing-Feng. Current status and conservation strategies for *Isoetes* in China: a case study for the conservation of threatened aquatic plants. **Oryx**, v. 39, n. 3, p. 335-338, 2005.
- NUNES, Jaquelina A. et al. Soil-vegetation relationships on a banded ironstone 'island', Carajás Plateau, Brazilian Eastern Amazonia. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, p. 2097-2110, 2015.
- PRADO, Luis AS et al. Environmental characterization of an Amazonian lake for *Isoetes cangae* translocation. **Plant Ecology**, p. 1-10, 2023.
- SANTOS, Mirella Pupo; ARAUJO, João V. S. Rabelo; LOPES, Arthur V. Sant'anna; et al. The genetic diversity and population structure of two endemic Amazonian quillwort (*Isoetes* L.) species. **PeerJ**, v. 8, p. e10274, 2020. Disponível em: <<https://peerj.com/articles/10274>>. Acesso em: 6 ago. 2024.
- SOUZA-FILHO, Pedro Walfir M. et al. Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **Journal of environmental management**, v. 167, p. 175-184, 2016.
- ZANDONADI, Daniel Basílio et al. Ecophysiology of two endemic Amazon quillworts. **Aquatic Botany**, v. 170, p. 103350, 2021.