

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E RECURSOS NATURAIS



VITÓRIA FABRI DE MOURA

CRESCIMENTO DA MACRÓFITA INVASORA *Hedychium coronarium* J. Koenig
(ZINGIBERACEAE) SOB INFLUÊNCIA DE AGENTES ESTRESSORES E
BIOMASSA SECA DE *Salvinia auriculata* Aubl.

SÃO CARLOS - SP

2025

VITÓRIA FABRI DE MOURA

CRESCIMENTO DA MACRÓFITA INVASORA *Hedychium coronarium* J. Koenig
(ZINGIBERACEAE) SOB INFLUÊNCIA DE AGENTES ESTRESSORES E
BIOMASSA SECA DE *Salvinia auriculata* Aubl.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Ecologia e Recursos Naturais.

Área de concentração: Ecologia e Recursos Naturais.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Marcela Bianchessi da Cunha Santino

SÃO CARLOS - SP

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Vitória Fabri de Moura, realizada em 26/09/2025.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Marcela Bianchessi da Cunha Santino (UFSCar)

Prof. Dr. Irineu Bianchini Junior (UFSCar)

Prof. Dr. Davi Gasparini Fernandes Cunha (EESC/USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais.

AGRADECIMENTOS

Por meio destas palavras, expresso minha gratidão a todos os que participaram, de forma direta ou indireta, na elaboração da presente pesquisa.

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me concedido a oportunidade de crescer e pela inspiração para prosseguir.

À minha querida orientadora, Prof.^a Dr.^a Marcela Bianchessi da Cunha Santino e ao Prof. Dr. Irineu Bianchini Júnior, por todo o carinho e paciência, obrigada pela orientação e exemplo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; processo 131497/2023-5) pelo financiamento por meio da bolsa de estudos e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, meu agradecimento pelo investimento na ciência.

Ao Programa de Pós-graduação em Ecologia e Recursos Naturais - PPGERN - UFSCar, ao Departamento de Hidrobiologia e ao Laboratório de Bioensaios e Modelagem Matemática, pela disponibilização de espaço para o desenvolvimento científico. Aos docentes do Programa, agradeço por todo o ensinamento.

Às amigas do Laboratório de Bioensaios e Modelagem Matemática, agradeço pelo compartilhamento de conhecimentos e por toda a ajuda nas longas jornadas de coleta.

Aos meus amados pais, Nelson e Márcia, cuja dedicação e apoio incondicionais aos meus estudos tornaram possível cada conquista desta trajetória. À minha avó Maria de Lurdes, por todas as palavras de incentivo. À minha irmã Sara, pela amizade e pelo apoio. Ao meu amor, Marco, por todo o companheirismo. Mesmo à distância, se fizeram presentes. E à minha querida amiga Karine, pelo apoio nos dias difíceis.

RESUMO

A poluição hídrica por agentes estressores, como contaminantes emergentes e resíduos agroindustriais, representa um desafio para a ecologia aquática em ambientes urbano-rurais. Esses compostos alteram os ciclos biogeoquímicos, afetam comunidades vegetais e podem favorecer o crescimento de populações de espécies invasoras mais tolerantes ao estresse. Embora as macrófitas desempenhem funções ecológicas fundamentais, como a ciclagem de nutrientes e o fornecimento de habitat, o crescimento descontrolado de macrófitas invasoras, como *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo), suprime espécies nativas e altera a estrutura de ecossistemas ripários. Este trabalho foi estruturado em três capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma revisão integrada sobre água, macrófitas, invasão biológica e poluição, com ênfase nos efeitos do dodecil sulfato de sódio (DSS) e da vinhaça em ambientes aquáticos, bem como nas implicações para a conservação da biodiversidade. No Capítulo 2, foi caracterizada a população de *H. coronarium* no reservatório do Monjolinho (São Carlos, SP), por meio de descritores morfométricos e de relações biomassa-volume, os quais evidenciaram sua plasticidade e capacidade de colonizar ambientes alterados. No Capítulo 3 foi avaliado o crescimento de *H. coronarium* sob exposição controlada ao DSS (0,5 g L⁻¹ e 1,0 g L⁻¹) e à vinhaça (10% e 20%), ambos com e sem biomassa seca de *Salvinia auriculata* como cobertura morta (*mulching*). O DSS não reduziu significativamente a biomassa de *H. coronarium* em relação ao controle, mas a presença de *mulching* de *S. auriculata* alterou as respostas de crescimento, com padrão de resposta hormética. Para a vinhaça, houve redução significativa da biomassa de *H. coronarium* e, na presença de *mulching* de *S. auriculata*, os valores de biomassa se mantiveram próximos aos do controle. Os resultados indicaram que os agentes estressores exerceram pressões negativas sobre o crescimento da *H. coronarium* e que o *mulching* de *S. auriculata* modificou os padrões de crescimento vegetal em condições de estresse químico, evidenciando que poluentes alteram o crescimento dessa invasora e que resíduos vegetais podem interferir nos modos de ação desses agentes nas macrófitas, com implicações para estratégias de manejo e mitigação de impactos em ecossistemas aquáticos.

Palavras-chave: Macrófitas aquáticas. Espécies invasoras. Contaminantes emergentes. Vinhaça. Bioensaios.

ABSTRACT

Water pollution from stressors, such as emerging contaminants and agro-industrial waste, poses a challenge to aquatic ecology in urban-rural environments. These compounds alter biogeochemical cycles, affect plant communities, and can favor the growth of populations of invasive species that are more tolerant to stress. Although macrophytes play fundamental ecological roles, such as nutrient cycling and habitat provision, the uncontrolled growth of invasive macrophytes, such as *Hedychium coronarium*, suppresses native species and alters the structure of riparian ecosystems. This work is structured in three chapters. Chapter 1 presents an integrated review of water, macrophytes, biological invasion, and pollution, with emphasis on the effects of sodium dodecyl sulfate (SDS) and vinasse in aquatic environments, and the implications for biodiversity conservation. In Chapter 2, the population of *H. coronarium* in the Monjolinho reservoir (São Carlos, SP) was characterized using morphometric descriptors and biomass-volume relationships, which highlighted its plasticity and capacity to colonize degraded environments. Chapter 3 evaluated the growth of *H. coronarium* under controlled exposure to SDS (0.5 g L⁻¹ and 1.0 g L⁻¹) and vinasse (10% and 20%), both with and without dry biomass of *Salvinia auriculata* as mulch. DSS did not significantly reduce *H. coronarium* biomass compared to the control, but the presence of *S. auriculata* mulch altered growth responses, with a hormetic pattern. For vinasse, there was a significant reduction in *H. coronarium* biomass, and in the presence of *S. auriculata* mulch, biomass values remained close to those of the control. The results indicate that stressors exerted negative pressures on the growth of *H. coronarium* and that mulching with *S. auriculata* modified plant growth patterns under chemical stress conditions, demonstrating that pollutants alter the growth of this invasive species and that plant residues can interfere with the modes of action of these agents on macrophytes, with implications for management strategies and mitigation of impacts in aquatic ecosystems.

Keywords: Aquatic macrophytes. Invasive species. Emerging contaminants. Vinasse. Bioassays.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- Figura 1 - Parte da população de *Hedychium coronarium* na margem direita do Reservatório do Monjolinho.....36
- Figura 2 - Exemplares adultos de *Hedychium coronarium* coletado.....37
- Figura 3 - Folha de *Hedychium coronarium*.....38
- Figura 4 - Flor de *Hedychium coronarium*.....38
- Figura 5 - Relação linear entre a massa seca (g) e a massa fresca (g) e de amostras de folhas de *Hedychium coronarium* (n=230).....41
- Figura 6 - Relação linear entre a massa seca (g) e a massa fresca (g) e de amostras de caule de *Hedychium coronarium* (n=69).42
- Figura 7 - Relação linear entre o volume (Vol) e a massa seca (MS) de amostras de raiz e rizoma (n=19).43

CAPÍTULO 3

- Figura 1 - Bioensaios do experimento com DSS armazenados em incubadora.....58
- Figura 2 - Bioensaios do experimento com vinhaça armazenados em incubadora.....58
- Figura 3 – Crescimento de *Hedychium coronarium* em meios com dodecil sulfato de sódio (DSS). Em que: os pontos correspondem à média (\pm desvio padrão) dos resultados experimentais e as linhas aos ajustes cinéticos do modelo (resultados teóricos).....63
- Figura 4 - Crescimento de *Hedychium coronarium* em meios com dodecil sulfato de sódio (DSS) e biomassa seca de *Salvinia auriculata*. Em que: os pontos correspondem à média (\pm desvio padrão) dos resultados experimentais e as linhas aos ajustes cinéticos do modelo (resultados teóricos).....67
- Figura 5 – Crescimento de *Hedychium coronarium* em meios com vinhaça. Em que: os pontos correspondem à média (\pm desvio padrão) dos resultados experimentais e as linhas aos ajustes cinéticos do modelo (resultados teóricos).....73
- Figura 6 - Crescimento de *Hedychium coronarium* em meios com vinhaça e biomassa seca de *Salvinia auriculata*. Em que: os pontos correspondem à média (\pm desvio padrão) dos resultados experimentais e as linhas aos ajustes cinéticos do modelo (resultados teóricos).....74
- Figura 7 - Variações dos valores dos coeficientes de crescimento (μ) em função dos valores de referência (μ das culturas controle) e das diferentes condições experimentais.....80

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Valores médios e desvios-padrão das características funcionais (número de folhas, largura e comprimento das folhas e do pseudocaule, biomassas secas e frescas de pseudocaule e folhas, e volume das raízes e rizomas) da população de *Hedychium coronarium* situada na margem direita do reservatório do Monjolinho.....39

Tabela 2 - Variações de massa fresca e seca das folhas de *Hedychium coronarium* em função da área foliar.....40

Tabela 3 - Variações de massa fresca e seca dos caules de *Hedychium coronarium* em função do comprimento.....42

Tabela 4 - Alometria de indivíduos adultos (n = 23) de *Hedychium coronarium* coletados na margem direita do reservatório do Monjolinho (em 13 de março e 9 de setembro de 2024).....44

CAPÍTULO 3

Tabela 1 - Representação do desenho amostral, dos tratamentos e das combinações para o experimento com DSS.....59

Tabela 2 – Representação do desenho amostral, tratamentos e combinações para o experimento com vinhaça.....60

Tabela 3 - Número de folhas por tratamento para o experimento com DSS.....64

Tabela 4 - Parâmetros do crescimento de *Hedychium coronarium* em condições controladas (fotoperíodo, intensidade luminosa e temperatura).....65

Tabela 5 - Valores das análises de parâmetros da vinhaça em solução 20%.....69

Tabela 6 - Dados de análise físico-química de solo coletados na margem do reservatório do Monjolinho (solo e solo + *mulching* de *Salvinia auriculata*).....71

Tabela 7 - Número de folhas por tratamento para o experimento com vinhaça.....75

Tabela 8 - Número de folhas por tratamento para o experimento com vinhaça.....77

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	10
RESUMO	11
1.REVISÃO	13
1.1 PRESSÕES ANTRÓPICAS SOBRE ECOSISTEMAS AQUÁTICOS E A IMPORTÂNCIA DA ÁGUA	13
1.2 SURFACTANTES ANIÔNICOS EM ECOSISTEMAS AQUÁTICOS: DODECIL SULFATO DE SÓDIO	14
1.3 CARACTERÍSTICAS E IMPACTOS AMBIENTAIS DA VINHAÇA	15
1.4 CONTAMINAÇÃO AQUÁTICA E O DESAFIO DA EUTROFIZAÇÃO	15
1.5 MACRÓFITAS INVASORAS E SEUS IMPACTOS EM ECOSISTEMAS AQUÁTICOS	16
1.6 DEFINIÇÕES E CONCEITOS DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS	17
1.7 ORIGEM, CARACTERÍSTICAS E INVASÃO DE <i>Hedychium coronarium</i>	18
1.8 <i>Hedychium coronarium</i> E <i>Salvinia auriculata</i> – RIO MONJOLINHO (SÃO CARLOS, SP)	18
1.9 CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL USO DE <i>Salvinia auriculata</i>	19
1.10 CRESCIMENTO, BIOMASSA E ESTRATÉGIAS FUNCIONAIS DE ESPÉCIES INVASORAS	21
1.11 MODELAGEM DE CRESCIMENTO E BIOENSAIOS COM MACRÓFITAS AQUÁTICAS	22
1.12 HIPÓTESES E OBJETIVOS GERAIS	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
CAPÍTULO 2	30
RESUMO	31
1. INTRODUÇÃO	33
2. MATERIAIS E MÉTODOS	34
2.1 ÁREA DE ESTUDO	34
2.2 DESCRIÇÃO DA <i>Hedychium coronarium</i>	35
2.3 COLETA E MÉTRICAS MORFOLÓGICAS	36
2.4 ANÁLISE DE DADOS	37
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
CAPÍTULO 3	49
RESUMO	50
ABSTRACT	51
1. INTRODUÇÃO	52

2. MATERIAIS E MÉTODOS	55
2.1 ÁREA DE COLETA.....	55
2.2 DESCRIÇÃO DA <i>Hedychium coronarium</i> E <i>Salvinia auriculata</i>	55
2.3 CONCENTRAÇÃO DO DSS.....	56
2.4 CONCENTRAÇÃO DA VINHAÇA.....	56
2.5 MONTAGEM DE BIOENSAIOS E DESENHO EXPERIMENTAL	57
2.4 ANÁLISE DE DESCRITORES MORFOMÉTRICOS	61
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
3.1 RESULTADOS DO EXPERIMENTO COM DSS	62
3.2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO COM VINHAÇA.....	69
3.3 COMPARAÇÕES DE COEFICIENTES DE CRESCIMENTO DOS EXPERIMENTOS	79
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
CONCLUSÕES GERAIS	88
ANEXOS.....	89

CAPÍTULO 1

Macrófitas aquáticas e contaminantes emergentes: uma revisão

RESUMO

Considerando que a conservação dos recursos hídricos é um dos maiores desafios do século XXI, esta revisão aborda a interação entre contaminantes emergentes e o crescimento de macrófitas aquáticas em ambientes aquáticos com pressão antrópica. Os conceitos abordados estão relacionados ao crescimento urbano e industrial, que intensificou as pressões antrópicas sobre os ecossistemas aquáticos, comprometendo a disponibilidade de água potável. Entre os contaminantes emergentes, destacam-se os surfactantes aniônicos, como o dodecil sulfato de sódio (DSS), amplamente utilizado em produtos de limpeza e com potencial de toxicidade para a biota. Somado a isso, resíduos agroindustriais, como a vinhaça, apresentam elevado poder poluente devido à sua elevada carga orgânica e à acidez, podendo causar impactos severos se descartados incorretamente. Ao considerarmos a biota associada aos ambientes aquáticos, temos que as macrófitas aquáticas são organismos fundamentais para a produtividade primária, porém, sob condições de desequilíbrio, comprometem toda a cadeia trófica. Assim, foram abordadas duas espécies de macrófitas, *Hedychium coronarium*, uma planta de origem asiática com alto potencial invasivo e *Salvinia auriculata*, uma Pteridófita flutuante com rápido crescimento vegetativo. Para prever o comportamento desses vegetais, a utilização de modelagem de crescimento e de bioensaios laboratoriais torna-se crucial. Essas ferramentas permitem quantificar o crescimento das macrófitas em diferentes concentrações de poluentes, auxiliando no desenvolvimento de estratégias de manejo e de remediação ambiental.

Palavras-chave: Macrófita aquática. Contaminantes emergentes. Modelagem matemática.

ABSTRACT

Given that the conservation of water resources is one of the greatest challenges of the 21st century; this review examines the interactions between emerging contaminants and the growth of aquatic macrophytes under anthropogenic pressure. The concepts discussed relate to urban and industrial growth, which have intensified anthropogenic pressures on aquatic ecosystems, thereby compromising the availability of potable water. Among emerging contaminants, anionic surfactants stand out, such as sodium dodecyl sulfate (SDS), which is widely used in cleaning products and has potential toxicity to biota. In addition, agro-industrial residues, such as vinasse, have a high polluting power due to their high organic load and acidity, and can cause severe impacts if disposed of incorrectly. In aquatic environments, aquatic macrophytes are fundamental organisms for primary productivity; however, when out of balance, they compromise the entire trophic chain. Thus, two macrophyte species were addressed: *Hedychium coronarium*, an Asian plant with high invasive potential, and *Salvinia auriculata*, a floating pteridophyte with rapid vegetative growth. To predict the behavior of these plants, growth modeling and laboratory bioassays are crucial. These tools allow quantifying macrophyte growth under different pollutant concentrations, assisting in the development of management and environmental remediation strategies.

Keywords: Aquatic macrophyte. Emerging contaminants. Mathematical modeling.

1 REVISÃO

1.1 PRESSÕES ANTRÓPICAS SOBRE ECOSISTEMAS AQUÁTICOS E A IMPORTÂNCIA DA ÁGUA

A água é um elemento essencial para a manutenção da vida e do funcionamento dos ecossistemas, e sustenta atividades humanas como o abastecimento, a agricultura, a indústria e os serviços de saúde pública. No entanto, a intensificação das atividades antrópicas gera impactos negativos em áreas urbanas e rurais, comprometendo a qualidade dos corpos hídricos e a capacidade desses ambientes de manter a biodiversidade (TUNDISI; TUNDISI, 2008). Entre os principais impactos estão a poluição por contaminantes e a proliferação de espécies exóticas invasoras, processos que interagem entre si e comprometem a integridade ecológica dos ecossistemas aquáticos. As águas continentais são fundamentais tanto para a biodiversidade quanto para o fornecimento de água potável e para outros usos (ODUM; BARRETT, 2005).

A água é um recurso dinâmico cuja qualidade é modificada por processos naturais e antrópicos. Fontes urbanas, como esgoto doméstico, efluentes industriais, e fontes rurais, como fertilizantes, pesticidas e dejetos animais, estão entre os principais responsáveis pela contaminação de corpos hídricos, especialmente em países em desenvolvimento (MORAES; JORDÃO, 2002). Esses contaminantes incluem compostos orgânicos, nutrientes e diversas substâncias químicas que chegam aos sistemas aquáticos por meio do transporte na água, no ar e no solo (FREITAS; ROCHA, 2012). Além de comprometer o consumo humano, podem causar efeitos adversos à saúde, como disfunções neurológicas e hepáticas, danos genotóxicos e ainda favorecer a eutrofização e a perda de biodiversidade aquática (HOUK, 1992). Nos ambientes aquáticos, destacam-se os contaminantes emergentes, um grupo que inclui fármacos, pesticidas, surfactantes aniônicos, microplásticos, nanomateriais e resíduos agroindustriais. Detectados em concentrações crescentes em ambientes aquáticos, geram preocupação por seus efeitos, mesmo em baixos níveis, ainda não regulamentados. Tais substâncias apresentam persistência, potencial de bioacumulação e mecanismos de ação capazes de gerar respostas biológicas não lineares, como a hormese, em que baixas doses estimulam e as concentrações elevadas inibem organismos aquáticos (AGATHOKLEOUS *et al.*, 2019). A presença de contaminantes emergentes em rios e reservatórios compromete

processos ecológicos, afeta os produtores primários e desencadeia efeitos em cascata na cadeia trófica. Além disso, pode favorecer espécies invasoras com maior plasticidade morfofisiológica, em detrimento de nativas mais sensíveis, atuando como filtro ambiental em ecossistemas já degradados (BLANCK, 2002). Esse quadro evidencia a poluição química como uma pressão seletiva sobre a composição e estrutura das comunidades aquáticas, ampliando riscos à biodiversidade e à saúde humana.

1.2 SURFACTANTES ANIÔNICOS EM ECOSSISTEMAS AQUÁTICOS: DODECIL SULFATO DE SÓDIO

Os surfactantes representam uma categoria relevante de poluentes em ambientes aquáticos, introduzidos principalmente por efluentes domésticos e industriais. O uso intensivo de detergentes e produtos de limpeza tem elevado a concentração de surfactantes em corpos d'água (SOUZA, 2006). Entre eles, destaca-se o dodecil sulfato de sódio (DSS), surfactante aniônico amplamente empregado, caracterizado por baixa biodegradabilidade e persistência ambiental, o que dificulta sua remoção em estações de tratamento (CRUZ DE CARVALHO *et al.*, 2022).

Mesmo em baixas concentrações, o DSS pode gerar efeitos subletais em organismos aquáticos, como alterações no crescimento e na fisiologia de produtores primários, afetando a base da cadeia trófica (FREITAS; ROCHA, 2012; CRUZ DE CARVALHO *et al.*, 2022). Além disso, o surfactante modifica a estrutura dos biofilmes microbianos, reduzindo a ciclagem de nutrientes e a diversidade funcional, comprometendo processos como a autotrofia e a decomposição orgânica. Organismos bentônicos também são afetados, como a elevada mortalidade e as anomalias fisiológicas observadas em moluscos expostos ao DSS (GIBSON *et al.*, 2016). Há também relatos de bioacumulação e de impactos indiretos em níveis tróficos superiores, resultando em alterações na comunidade bentônica (SANDBACKA *et al.*, 2000; ROMANELLI *et al.*, 2006).

O lançamento contínuo de surfactantes em sistemas de esgoto urbanos constitui um desafio relevante, pois mesmo após tratamentos convencionais, resíduos de DSS permanecem em concentrações capazes de induzir efeitos crônicos na biota aquática (KIM; PARK, 2021). A baixa biodegradabilidade do DSS e sua tendência de acúmulo na interface água-sedimento resultam em impactos persistentes, como a

alteração da permeabilidade celular e a desestabilização de processos fotossintéticos (FREITAS; ROCHA, 2012; CRUZ DE CARVALHO *et al.*, 2022). As interações com outros contaminantes emergentes, como microplásticos e metais pesados, podem gerar efeitos sinérgicos que ampliam o risco ecotoxicológico em ambientes urbano-rurais (ZENG *et al.*, 2024). Concentrações elevadas também afetam a microbiota em estações de tratamento, comprometendo a degradação da matéria orgânica (BORRELY *et al.*, 2000; ROMANELLI *et al.*, 2006). Em efluentes não tratados, diferentes classes de surfactantes já foram detectadas em concentrações que podem causar toxicidade aguda a organismos aquáticos (ARDAK *et al.*, 2016).

1.3 CARACTERÍSTICAS E IMPACTOS AMBIENTAIS DA VINHAÇA

No Brasil, as pressões ambientais se intensificam devido à expansão agrícola em larga escala, especialmente na produção de cana-de-açúcar, o que posiciona o país como líder global na produção de açúcar e etanol (AMORIM *et al.*, 2007). Como biocombustível, tem sido amplamente utilizado, porém, ainda há preocupações quanto a potenciais impactos ambientais (CHERUBIN *et al.*, 2015). Esse setor gera grandes volumes de resíduos, destacando-se a vinhaça, subproduto obtido em proporção de 10 a 15 litros para cada litro de etanol (SILVA *et al.*, 2007). A vinhaça apresenta alta carga orgânica, elevada demanda química de oxigênio e demanda bioquímica de oxigênio (DQO e DBO), pH baixo e efeito corrosivo, características que podem levar depleção de oxigênio dissolvido e alterações nos ciclos biogeoquímicos de corpos hídricos quando descartada inadequadamente (CETESB, 2012).

Embora seja utilizada na fertilização e irrigação de canaviais, conforme as regulamentações da Norma Técnica P 4.231/2005 (CETESB, 2015), essa prática pode provocar impactos ambientais, como a lixiviação de metais para águas subterrâneas, salinização e desequilíbrio de nutrientes do solo, além de alterações químicas que comprometem a qualidade ambiental (CETESB, 2012; CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013). Esses efeitos reforçam a necessidade de estratégias de manejo sustentável e de controle do uso e do descarte da vinhaça em regiões de produção sucroalcooleira.

1.4 CONTAMINAÇÃO AQUÁTICA E O DESAFIO DA EUTROFIZAÇÃO

A introdução de efluentes orgânicos de alta carga poluidora, como a vinhaça, e de contaminantes emergentes, como surfactantes aniônicos, exerce pressão sobre a qualidade da água, alterando os ciclos biogeoquímicos e o equilíbrio trófico (YING, 2006; CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013). Esses compostos aumentam a disponibilidade de nutrientes e influenciam a relação entre produtores primários e decompositores, induzindo processos de eutrofização, reconhecidos como uma das principais ameaças à integridade dos ambientes aquáticos (SMITH; SCHINDLER, 2009).

A eutrofização resulta do enriquecimento de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, oriundos de matéria orgânica proveniente de efluentes domésticos, industriais e agrícolas, promovendo a proliferação excessiva de algas e macrófitas aquáticas e alterando o funcionamento dos sistemas hídricos (SMITH *et al.*, 2006). No Brasil, práticas agrícolas em Áreas de Preservação Permanente (APPs), o lançamento de esgoto sem tratamento adequado e o carreamento de fertilizantes estão entre as principais causas desse enriquecimento artificial (AGEVAP, 2012). As consequências incluem a proliferação de macrófitas e algas, redução do oxigênio dissolvido, mortalidade de organismos aquáticos, diminuição do volume útil dos corpos hídricos e produção de toxinas por cianobactérias, com riscos à saúde humana (AZEVEDO *et al.*, 2002). Globalmente, cerca de 54% dos lagos e reservatórios da Ásia e 41% da América do Sul encontram-se eutrofizados (NYENJE *et al.*, 2010). No Brasil, o processo é considerado um dos principais desafios para a qualidade da água em rios urbanos e rurais (BARRETO *et al.*, 2013).

1.5 MACRÓFITAS INVASORAS E SEUS IMPACTOS EM ECOSISTEMAS AQUÁTICOS

As espécies invasoras são reconhecidas como um dos principais vetores de alteração da biodiversidade aquática em escala global. São organismos capazes de se estabelecer fora de seu habitat de origem, reproduzir e expandir-se em ecossistemas naturais ou antrópicos, causando impactos ecológicos, econômicos e sociais (MATOS; PIVELLO, 2009). Caracterizam-se por elevada reprodução e dispersão, associadas à plasticidade fenotípica, o que lhes permite ocupar diferentes condições ambientais. Nos ecossistemas aquáticos, modificam a estrutura e a dinâmica das comunidades, alterando fluxos de energia, ciclos biogeoquímicos e

serviços ecossistêmicos, além de promoverem homogeneização biótica (VITOUSEK *et al.*, 1997; STRAYER, 2010).

As macrófitas invasoras são, normalmente, bioindicadoras de ambientes eutrofizados e degradados, expandindo-se em áreas enriquecidas por nutrientes e reduzindo a disponibilidade de recursos para nativas, além dos efeitos ecológicos, comprometem usos múltiplos da água, como abastecimento, recreação e geração de energia, o que reforça a necessidade de estudos sobre seus mecanismos de colonização e estratégias de manejo (THOMAZ *et al.*, 2007).

1.6 DEFINIÇÕES E CONCEITOS DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS

Para Cook *et al.*, (1974), macrófitas aquáticas são plantas de diversos grupos taxonômicos, incluindo *Charophyta*, *Bryophyta*, *Pteridophyta* e *Spermatophyta*, que são visíveis a olho nu, cujas partes fotossintéticas permanecem submersas ou flutuantes durante certo período do ano. Irgang & Gastal (1996), por sua vez, ampliaram esse conceito ao incluir espécies de ambientes salobros e marinhos, reconhecendo a transição entre ambientes de água doce, salobra e salgada.

Nas últimas décadas, definições mais abrangentes de macrófitas aquáticas foram propostas. Chambers *et al.* (2008) as definem como organismos fotossintéticos visíveis a olho nu, que crescem submersos de forma periódica ou permanente, flutuantes ou emergentes, incluindo macroalgas, criptógamas e plantas vasculares. Essa abordagem destaca o papel funcional das macrófitas em ecossistemas aquáticos de diferentes regiões biogeográficas. De forma semelhante, a *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos as descreve como plantas que crescem nas ou próximas à água, como *Typha*, *Hydrilla*, *Eichhornia* e *Lemna*, ressaltando funções como abrigo para fauna aquática e sensibilidade a alterações ambientais (EPA, 2025).

As macrófitas ocupam uma ampla variedade de habitats, de lagos e rios a áreas alagadas temporárias. Chambers *et al.* (2008) estimam a existência de aproximadamente 2.600 espécies vasculares distribuídas em mais de 400 gêneros, com maior diversidade em regiões tropicais, onde exercem funções essenciais nos ciclos de nutrientes, na estruturação de habitats e na manutenção da biodiversidade faunística. (ROQUE *et al.*, 2025).

1.7 ORIGEM, CARACTERÍSTICAS E INVASÃO DE *Hedychium coronarium*

Hedychium coronarium J. Koenig (lírio-do-brejo) é uma macrófita invasora no Brasil, originária da Ásia, amplamente distribuída em ecossistemas ripários brasileiros, com ocorrência associada a ambientes perturbados e próximos a centros urbanos (BELLINI; BECKER, 2021). A espécie apresenta adaptações anatômicas como aerênquima lacunar, que possibilita manutenção do metabolismo em solos saturados (CASTRO *et al.*, 2021) o que contribui para sua capacidade invasora.

Os impactos de grandes populações de *H. coronarium* incluem alteração da dinâmica hídrica e da composição da biodiversidade local. Bancos monoespecíficos reduzem a evapotranspiração em comparação à vegetação nativa, o que afeta o balanço hídrico em florestas ribeirinhas (VERGNE *et al.*, 2023). Sua dominância também modifica as comunidades de insetos e inibe o estabelecimento de espécies nativas, promovendo a simplificação estrutural e a perda de diversidade (COSTA *et al.*, 2019). Introduzida no Brasil provavelmente no século XIX como planta ornamental (SOARES; BARRETO, 2008), *H. coronarium* exemplifica o processo descrito por Elton em 1958 (RICHARDSON; PYSEK, 2007), no qual as invasões biológicas representam ameaças crescentes à biodiversidade.

Compreender o histórico de introdução e as condições que favoreceram a expansão de espécies invasoras reforça a necessidade de desenvolver estratégias de manejo integradas que conciliem a conservação da biodiversidade e na mitigação da invasão. Schneider *et al.* (2024) argumentam que o crescimento exacerbado de macrófitas aquáticas (invasoras ou não) não deve ser visto como a causa raiz do problema ambiental, mas sim o sintoma de alterações na qualidade da água, geralmente associadas à eutrofização ou mudanças hidrológicas, tal visão sugere que o manejo adequado deve focar nas fontes de cargas de poluição, nutrientes ou mudanças ecossistêmicas.

1.8 *Hedychium coronarium* E *Salvinia auriculata* – RIO MONJOLINHO (SÃO CARLOS, SP)

A presença de *Hedychium coronarium* nas margens do rio Monjolinho (São Carlos, SP) exemplifica como ambientes urbanos e agrícolas degradados favorecem a invasão de espécies. Viana (2005) registrou extensas formações monoespecíficas da espécie em trechos próximos à sua foz, associadas à supressão da vegetação

ciliar decorrente de obras de contenção de enchentes, à limpeza das margens e à expansão urbana. Essa dinâmica reduziu a riqueza de espécies aquáticas locais, embora trechos mais conservados ainda mantenham maior heterogeneidade e diversidade, sugerindo que a restauração da vegetação ripária possa mitigar os impactos da invasão.

Outra espécie presente na bacia do rio Monjolinho é a *Salvinia auriculata* Aubl. (*Salviniaceae*), que é uma macrófita flutuante livre, comum em ambientes tropicais. Possui tricomas hidrofóbicos que conferem flutuabilidade e estruturas semelhantes às raízes, auxiliando na absorção de nutrientes (POTT; POTT, 2000). Apresenta taxa alta de crescimento vegetativo e de propagação clonal, com rápidas formações na superfície da água. Além de servir de substrato e abrigo para invertebrados e larvas de peixes, pode atuar como forragem, devido ao teor proteico de cerca de 12%, sendo consumida por peixes e capivaras (HENRY-SILVA; CAMARGO, 2006).

1.9 CARACTERÍSTICAS E POTENCIAL USO DE *Salvinia auriculata*

Do ponto de vista aplicado, *S. auriculata* tem despertado interesse como ferramenta de manejo ambiental. Estudos apontam sua utilização em sistemas de fitorremediação, devido à capacidade de absorção de nutrientes e metais pesados, o que contribui para a depuração de efluentes urbanos e industriais (POTT; POTT, 2000; HENRY-SILVA; CAMARGO, 2006). Além disso, o uso de sua biomassa seca como cobertura morta (*mulching*) em sistemas agrícolas e hortícolas tem se mostrado promissor, promovendo melhorias na fertilidade do solo, aumento da disponibilidade de matéria orgânica e supressão de brotamentos de plantas indesejáveis. A distribuição global de *S. auriculata* evidencia sua plasticidade ecológica e sua capacidade de colonização em diferentes condições ambientais. Espécie originária da América do Sul tropical, essa macrófita flutuante livre expandiu-se por diversos ambientes aquáticos da América Central e do Sul, sendo registrada desde Cuba até o Paraguai, além de estar presente em praticamente todas as regiões do Brasil (POTT; POTT, 2000). Essa ampla dispersão é facilitada pela propagação vegetativa e pela formação de esporos, que asseguram sua permanência mesmo em condições sazonais adversas.

Sua elevada taxa de crescimento e o potencial de formar extensas coberturas superficiais fazem com que seja considerada uma planta pioneira em ambientes

eutrofizados ou perturbados, frequentemente dominando lagoas, reservatórios e áreas alagáveis (LORENZI, 2008; CEMIG, 2021). A elevada formação de biomassa pode reduzir a penetração da luz solar e comprometer os processos fotossintéticos na coluna d'água, alterando a dinâmica metabólica das comunidades aquáticas e promovendo condições de anoxia. Por outro lado, desempenha funções ecológicas relevantes, como a provisão de habitat para organismos aquáticos, além de forrageio para capivaras, peixes e aves (POTT; POTT, 2000). *S. auriculata* possui também valor como bioindicador de poluição e como espécie promissora para sistemas de fitorremediação, devido à sua sensibilidade a contaminantes e à capacidade de acumular nutrientes e metais pesados (LEWIS, 1995; GARDNER; AL-HAMDANI, 1997).

Macrófitas possuem capacidade elevada em remover nutrientes e poluentes da coluna d'água, podendo reduzir, conseqüentemente a eutrofização, aumentando a melhora da qualidade ambiental (KADLEC; WALLACE, 2009). Além da absorção de nitrogênio e fósforo em quantidades elevadas, essas plantas também contribuem para a remoção de metais e de contaminantes emergentes, atuando como biofiltros naturais. A elevada produção de biomassa decorrente dessa dinâmica confere ainda valor econômico ao seu manejo, podendo ser aproveitada para fins de bioenergia, fertilização de solos e cobertura do solo em sistemas agrícolas (POTT; POTT, 2000). Dessa forma, as funções ecossistêmicas desempenhadas pelas macrófitas revelam sua importância não apenas ecológica, mas também para estratégias de manejo sustentável de águas e resíduos. Nesse contexto, o aproveitamento da biomassa de macrófitas aquáticas como cobertura morta (*mulching*) representa uma alternativa sustentável que alia o manejo ambiental a ganhos agrônômicos. Estudos demonstram que a aplicação de biomassa de espécies como *Eichhornia crassipes* em áreas agrícolas promove não apenas a reciclagem de nutrientes, mas também a melhoria da estrutura do solo e da retenção hídrica, o que favorece o crescimento vegetal sob condições de estresse hídrico (BALASUBRAMANIAN *et al.*, 2013). De forma complementar, revisões recentes destacam o potencial de diferentes macrófitas de água doce na agricultura sustentável e no tratamento de resíduos, seja pela aplicação direta da biomassa, compostagem ou transformação em *biochar* (MAJEED *et al.*, 2025), na qual, *biochar* é identificado como um material sólido rico em carbono preparado a partir de resíduos orgânicos, como resíduos agrícolas e lodos de esgotos,

com destaque para avaliação de seu uso como condicionador de solos e ferramenta para mitigação de impactos ambientais (WANG; WANG, 2019).

1.10 CRESCIMENTO, BIOMASSA E ESTRATÉGIAS FUNCIONAIS DE ESPÉCIES INVASORAS

A quantificação de biomassa e a avaliação de parâmetros de crescimento têm sido utilizadas como abordagens essenciais para compreender o sucesso ecológico de espécies invasoras. James e Drenovsky (2007) destacam que plantas invasoras frequentemente exibem taxas relativas de crescimento mais elevadas do que as espécies nativas, reflexo de estratégias funcionais, como maior área foliar e relações mais favoráveis entre a área foliar e a biomassa. Esses atributos favorecem o rápido acúmulo de biomassa e a dominância em ambientes degradados. Nesse contexto, a mensuração dos parâmetros morfológicos de *H. coronarium* e sua conversão em biomassa permitem avaliar se a espécie atende a padrões compatíveis com esse perfil funcional de invasão.

Complementarmente, Zhao *et al.* (2021) enfatizam que a plasticidade na alocação de biomassa é um mecanismo-chave para o sucesso de invasores. Essas espécies podem alterar dinamicamente o investimento de recursos entre folhas, caules e raízes, conforme a densidade populacional e as condições ambientais. Essa flexibilidade maximiza a sobrevivência em ambientes heterogêneos e aumenta a competitividade frente a espécies nativas. Assim, ao se avaliar a biomassa acumulada de *H. coronarium* em diferentes tratamentos, incluindo agentes estressores químicos e a aplicação de biomassa seca de *Salvinia auriculata*, torna-se possível compreender como a espécie ajusta sua estratégia de alocação de recursos em diferentes cenários de estresse ambiental.

Gao *et al.* (2020) ressaltaram que a disponibilidade espacial e temporal de nutrientes influencia diretamente o crescimento e a produção de biomassa de espécies invasoras, favorecendo sua competitividade. O estudo demonstrou que a biomassa aérea é um indicador para prever o potencial de invasão e os impactos ecológicos decorrentes da presença dessas plantas em diferentes ecossistemas. A conversão dos parâmetros de crescimento em biomassa seca acumulada constitui, portanto, uma métrica robusta para interpretar o comportamento de *H. coronarium* sob condições experimentais. Além disso, fornece suporte quantitativo aos modelos

matemáticos utilizados para projetar sua dinâmica em ecossistemas contaminados por vinhaça e por surfactantes, como o dodecil sulfato de sódio.

1.11 MODELAGEM DE CRESCIMENTO E BIOENSAIOS COM MACRÓFITAS AQUÁTICAS

A modelagem matemática é uma ferramenta aplicada para quantificar padrões de crescimento e projetar dinâmicas populacionais na ecologia de macrófitas. Em plantas aquáticas, parâmetros como o tempo de duplicação (t_d) e a taxa intrínseca de crescimento (μ) têm sido empregados no ajuste de curvas de biomassa para descrever respostas a fatores ambientais (THOMAZ; BINI, 2003; BIANCHINI JR. *et al.*, 2015). A adoção de modelos que considerem a distribuição dos dados, a relevância ecológica dos efeitos e a transparência metodológica é fundamental para assegurar a replicabilidade e a robustez analítica (POPOVIC *et al.*, 2024). No caso de *H. coronarium*, a replicação em tratamentos com estressores e controles permite inferências consistentes sobre as taxas de crescimento e os efeitos da cobertura com *S. auriculata*.

O uso de bioensaios mostra-se essencial, pois permite avaliar mudanças ambientais em organismos vivos em condições controladas. Bioensaios com macrófitas são amplamente utilizados em análises de impactos relacionados às águas continentais, como bioindicadores ou em testes de crescimento (POWELL *et al.*, 1996).

1.12 HIPÓTESES E OBJETIVOS GERAIS

O estudo do crescimento de *H. coronarium* sob diferentes estressores permite avaliar sua persistência em ambientes degradados. Ambientalmente, surfactantes como o dodecil sulfato de sódio (DSS) e a vinhaça são relevantes por sua liberação contínua em corpos hídricos, produzindo respostas que variam de estímulo a inibição do crescimento (AGATHOKLEOUS *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2024). Dessa forma, a pesquisa parte das hipóteses gerais de que (i) DSS e vinhaça atuam como estressores capazes de reduzir o crescimento de *H. coronarium* e (ii) a biomassa seca de *S. auriculata*, como cobertura morta, altera os efeitos desses estressores sobre o crescimento de *H. coronarium*. Assim, espera-se que o estudo evidencie diferenças

nos valores de crescimento entre os tratamentos, permitindo avaliar a sensibilidade da espécie aos efeitos dos agentes estressores.

Assim, os objetivos gerais da pesquisa foram caracterizar a população de *H. coronarium* na região litorânea do reservatório do Monjolinho (SP) e avaliar seu crescimento em laboratório sob exposição ao DSS e à vinhaça, com e sem biomassa seca de *S. auriculata* como cobertura morta (*mulching*). Os resultados contribuem para ações de conservação dos corpos hídricos ao fornecer dados sobre os efeitos da poluição sobre espécies invasoras, destacando a importância de alternativas de manejo ecológico para ecossistemas aquáticos impactados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGATHOKLEOUS, E.; MITSUTOSHI, K.; CALABRESE, E. J. Hormesis: a compelling platform for sophisticated plant science. **Trends in Plant Science**, v. 24, n. 4, p. 318–327, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.01.004>.

AGEVAP – AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL. **Estudos para identificação, localização e quantificação das causas da proliferação de plantas aquáticas, principalmente macrófitas, ao longo da calha do Rio Paraíba do Sul, inclusive braços mortos, reservatórios e afluentes: relatório de prognóstico**. São José dos Campos: AGEVAP, 2012. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/downloads%202012/Prognostico-macrofitas.pdf>. Acesso em: jun. 2025.

AMORIM, F. A. M. de; AMORIM, J. N.; BRITTO, W. S. Custos de irrigação na cana-de-açúcar: um estudo realizado com os diversos sistemas de irrigação em Juazeiro-BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 14., 2007, João Pessoa. **Anais [...]**. São Leopoldo: ABC, 2007. Disponível em: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/147>. Acesso em: mai. 2025.

ARDAK, K.; DROGUI, P.; DAGHRIR, R. Surfactants in aquatic and terrestrial environment: occurrence, behavior, and treatment processes. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 23, n. 4, p. 3195–3216, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5803-x>.

AZEVEDO, S. M. F. O.; CARMICHAEL, W. W.; JOCHIMSEN, E. M.; RINEHART, K. L.; LAU, S.; SHAW, G. R.; EAGLESHAM, G. K. Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru—Brazil. **Toxicology**, v. 181-182, p.441-446, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(02\)00491-2](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(02)00491-2).

BALASUBRAMANIAN, D.; ARUNACHALAM, K.; ARUNACHALAM, A.; DAS, A. K. Effect of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) mulch on soil microbial properties in lowland rainfed rice-based agricultural system in Northeast India. **Agricultural Research**, v. 2, p. 246-257, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40003-013-0073-7>.

BARRETO, L. V.; BARROS, F. M.; BONOMO, P.; ROCHA, F. A.; AMORIM, J. S. Eutrofização em rios brasileiros. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, p. 2165–2179, 2013.

BELLINI, G.; BECKER, F. G. Riparian degradation, stream position in watershed, and proximity to towns facilitate invasion by *Hedychium coronarium*. **Aquatic Invasions**, v. 16, n. 1, p. 11-27, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3391/ai.2021.16.1.02>.

BIANCHINI JR., I.; CUNHA-SANTINO, M. B.; MILAN, J. A. M.; RODRIGUES, C. J.; DIAS, J. H. P. Model parameterization for the growth of three submerged aquatic macrophytes. **Journal of Aquatic Plant Management**, v. 53, p. 64–73, 2015.

BLANCK, H. A critical review of procedures and approaches used for assessing pollution-induced community tolerance (PICT) in biotic communities. **Human and Ecological Risk Assessment**, v. 8, p. 1003-1034, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1080/1080-700291905792>.

BORRELY, S. I.; SAMPA, M. H. O.; PEDROSO, C. B.; OIKAWA, H.; SILVEIRA, C. G.; CHERBAKIAN, C. G.; SANTOS, M. C. F. Radiation processing of wastewater evaluated by toxicity assays. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 57, p. 507-511, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(99\)00418-1](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00418-1).

CASTRO, W. A. C.; ALMEIDA, R. V.; XAVIER, R. O.; ARDUIN, M.; MOYA, H. M.; MATOS, D. M. S. Response of rhizomes of the invasive *Hedychium coronarium* J. König (Zingiberaceae) to different soil moisture conditions. **Acta Botanica Brasilica**, v. 35, p. 122–125, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-33062020abb0343>.

CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Macrófitas Aquáticas: caracterização e importância em reservatórios hidrelétricos**. Belo Horizonte: CEMIG, 2021. 96 p. <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2021/03/livro-macrofitas-cemig-2021.pdf>. Acesso em: mai. 2025.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Considerações sobre a aplicação de vinhaça no solo agrícola do Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2012. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/items/8b7a154f-7fe6-4748-b92c-3555e1ea02a3>. Acesso em: mai. 2025.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma Técnica P4.231: vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. São Paulo: CETESB, 2015. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2024/09/Norma-Tecnica-Cetesb-P4.231-Vinhaca-Criterios-e-procedimentos-para-aplicacao-no-solo-agricola.pdf>. Acesso em: mai. 2025.

CHAMBERS, P. A.; LACOUL, P.; MURPHY, K. J.; THOMAZ, S. M. Global diversity of aquatic macrophytes in freshwater. **Hydrobiologia**, v. 595, p. 9–26, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9154-6>.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. C. P.; OLIVEIRA, D. M. S.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C.; ANDREW, C. Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils—

Effects of land use change on soil chemical attributes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 211, p. 173-184, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.006>.

CHRISTOFOLETTI, C. A.; ESCHER, J. P.; CORREIA, J. F. U. M.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, n. 12, p. 2752–2761, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>.

COOK, C. D. K.; GUT, B. J.; RIX, E. M.; SCHNELLER, J. **Water Plants of the World: a manual for the identification of the genera of freshwater macrophytes**. The Hague: Dr. W. Junk, 1974.

COSTA, R. O.; BATISTELI, A. F.; ESPINDOLA, E. L. G.; MATOS, D. M. S. Invasive *Hedychium coronarium* inhibits native seedling growth through belowground competition. **Flora**, v. 261, art. 151479, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.151479>.

CRUZ DE CARVALHO, R.; FEIJÃO, E.; MATOS, A. R.; CABRITA, M. T.; UTKIN, A. B.; NOVAIS, S. C.; LEMOS, M. F. L.; CAÇADOR, I.; MARQUES, J. C.; REIS-SANTOS, P. Ecotoxicological effects of the anionic surfactant sodium dodecyl sulfate (sds) in two marine primary producers: *Phaeodactylum tricornutum* and *Ulva lactuca*. **Toxics**, v. 10, n. 12, art.780, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics10120780>.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **What are macrophytes?** [S. I.]: EPA, [s. d.]. Disponível em: <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-macrophytes>. Acesso em: dez. 2025.

FREITAS, E. C.; ROCHA, O. Acute and chronic effects of atrazine and sodium dodecyl sulfate on the tropical freshwater cladoceran *Pseudosida ramosa*. **Ecotoxicology**, v. 21, p. 1347–1357, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-012-0888-1>.

GAO, F. L.; HE, Q-S.; ZHANG, Y-D.; HOU, J-H.; YU, F-H. Effects of soil nutrient heterogeneity on the growth and invasion success of alien plants: a multi-species study. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 8, art. 619861, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.619861>.

GARDNER, C. R.; AL-HAMDANI, S. H. Interactive effects of aluminum and humic substances on *Salvinia auriculata*. **Journal of Aquatic Plant Management**, v. 35, p. 30-34, 1997.

GIBSON, K. J.; MILLER, J. M.; JOHNSON, P. D.; STEWART, P. M. Toxicity of sodium dodecyl sulfate to federally threatened and petitioned freshwater mollusk species. **Freshwater Mollusk Biology and Conservation**, v. 19, p. 29–35, 2016. DOI: <https://doi.org/10.31931/fmbc.v19i1.2016.29-35>.

HENRY-SILVA, G. G.; CAMARGO, A. F. M. Efficiency of aquatic macrophytes to treat Nile tilapia pond effluents. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 5, p. 433-438, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000500003>.

HOUK, V. S. The genotoxicity of industrial wastes and effluents. **Mutation Research/Reviews in Genetic Toxicology**, v. 277, p. 91–138, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0165-1110\(92\)90001-p](https://doi.org/10.1016/0165-1110(92)90001-p).

IRGANG, B. E.; GASTAL JR., C. V. S. **Macrófitas aquáticas da planície costeira do RS**. Porto Alegre: CPG-Botânica/UFRGS, 1996. 290 p.

JAMES, J. J.; DRENOVSKY, R. E. A basis for relative growth rate differences between native and invasive forb seedlings. **Rangeland Ecology & Management**, v. 60, p. 395–400, 2007. DOI: [https://doi.org/10.2111/1551-5028\(2007\)60\[395:ABFRGR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2111/1551-5028(2007)60[395:ABFRGR]2.0.CO;2).

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. **Treatment Wetlands**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

KIM, S.; PARK, C. Potential of ceramic ultrafiltration membranes for the treatment of anionic surfactants in laundry wastewater for greywater reuse. **Journal of Water Process Engineering**, v. 44, 102373, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102373>.

LEWIS, M. A. Use of freshwater plants for phytotoxicity testing: a review. **Environmental Pollution**, v. 87, n. 3, p. 319–336, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)p4164-j](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)p4164-j).

LI, X.; SHEN, X.; JIANG, W.; XI, Y.; LI, S. Comprehensive review of emerging contaminants: detection technologies, environmental impact, and management strategies. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 278, 116420, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420>.

LORENZI, H. **Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas**. 4. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2008.

MAJEED, L. R.; SHARMA, D.; RAUTELA, K. S. S.; KUMAR, M. Sustainable agriculture, aquaculture and phytoremediation through freshwater macrophytes: a comprehensive review of mineral uptake, soil health, and water quality dynamics. **Discover Water**, v. 5, art. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00188-5>.

MATOS, D. M. S.; PIVELLO, V. R. O impacto das plantas invasoras nos recursos naturais de ambientes terrestres: alguns casos brasileiros. **Ciência e Cultura**, v. 61, n. 1, p. 27–30, 2009.

MORAES, D. S. de L.; JORDÃO, B. Q. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. **Revista de Saúde Pública**, v. 36, n. 3, p. 370–374, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-89102002000300018>.

NYENJE, P. M.; FOPPEN, J. W.; UHLENBROOK, S.; KULABAKO, R.; MUWANGA, A. Eutrophication and nutrient release in urban areas of sub-Saharan Africa: A review. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 3, p. 447–455, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.020>.

ODUM, E. P.; BARRETT, G. W. **Fundamentals of Ecology**. 5. ed. Belmont: Thomson Brooks/Cole, 2005.

POPOVIC, G.; MASON, T. J.; DROBNIK, S. M.; MARQUES, T. A.; POTTS, J.; JOO, R.; ALTWEGG, R.; BURNS, C. C. I.; McMCARTHY, M. A.; JOHNSTON, A.; NAKAGAWA, S.; McMILLAN, L.; WUNDERLICH, A.; MAIR, M.; MARTÍNEZ-LANFRANCO, J. A.; LAGISZ, M.; POTTIER, P. Four principles for improved statistical ecology. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 15, n. 2, p. 266-281, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14270>.

POTT, V. J.; POTT, A. **Plantas aquáticas do Pantanal**. 1. ed. Corumbá: EMBRAPA, 2000.

POWELL, R. L.; KIMERLE, R. A.; MOSER, E. M. Development of a plant bioassay to assess toxicity of chemical stressors to emergent macrophytes. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 15, p. 1570-1576, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5620150921>.

RICHARDSON, D. M.; PYSEK, P. Elton, C. S. 1958. The ecology of invasions by animals and plants. London: Methuen. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 31, n. 6, p. 659-666, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133307087089>.

ROMANELLI, M. F.; SILVA, G. P.; BORRELY, S. I. Redução da toxicidade do surfactante LAS tratado com feixe de elétrons. **Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology**, v. 1, n. 2, p. 103-107, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5132/jbse.2006.02.002>.

ROQUE, B. F.; SAULINO, H. H. L.; DENOBILE, C.; BOSCHI, R. S.; RUFFINO, P. H. P.; PIVELLO, V. R.; MATOS, D. M. S. Citizen science contribution in recording the invasive species *Hedychium coronarium* in the state of São Paulo, Brazil. **Biota Neotropica**, v. 25, n. 2, e20241679, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2024-1679>.

SANDBACKA, M.; CHRISTIANSON, I.; ISOMAA, B. The acute toxicity of surfactants on fish cells, *Daphnia magna* and fish-a comparative study. **Toxicology in Vitro**, v. 14, n. 1, p. 61-68, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0887-2333\(99\)00083-1](https://doi.org/10.1016/s0887-2333(99)00083-1).

SCHNEIDER, S. C.; COETZEE, J. A.; GALVANESE, E. F.; HARPENSLAGER, S. F.; HILT, S.; IMMERZEEL, B.; KOHLER, J.; MISTELI, B.; MOTITSOE, S. N.; PADIAL, A. A.; PETRUZZELLA, A.; SCHECHNER, A.; THIÉBAUT, G.; THIEMER, K.; VERMAAT, J. E. Causes of macrophyte mass development and management recommendations. **Science of the Total Environment**, v. 931, 172960, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172960>.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000100014>.

SMITH, V. H.; JOYE, S. B.; HOWARTH, R. W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. **Limnology and Oceanography**, v. 51, n. 1, p. 351–355, 2006. DOI: https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351.

SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: where do we go from here? **Trends in Ecology & Evolution**, v. 24, n. 4, p. 201–207, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>.

SOARES, D. J.; BARRETO, R. W. Fungal pathogens of the invasive riparian weed *Hedychium coronarium* from Brazil and their potential for biological control. **Fungal Diversity**, v. 28, p. 85–96, 2008.

SOUZA, A. G. **Ensaio de biodegradação de surfactantes em resíduos industriais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2006.

STRAYER, D. L. Alien species in fresh waters: ecological effects, interactions with other stressors, and prospects for the future. **Freshwater Biology**, v. 55, p. 152–174, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02380.x>.

THOMAZ, S. M.; BINI, L. M. **Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas**. Maringá: Eduem, 2003.

THOMAZ, S. M.; BINI, L. M.; BOZELLI, R. L. Floods increase similarity among aquatic habitats in river-floodplain systems. **Hydrobiologia**, v. 579, n. 1, p. 1–13, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0285-y>.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
VERGNE, D. D. C.; ROSALEM, L. M. P.; WENDLAND, E. C.; ANACHE, J. A. A.; SILVA, M. C. M.; BOSCHI, R. S.; MATOS, D. M. S. Experimental study on potential influence of the invasive *Hedychium coronarium* J. König on the evapotranspiration of riparian plant community. **Plants**, v. 12, n. 9, art. 1746, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12091746>.

VIANA, S. M. **Riqueza e distribuição de macrófitas aquáticas no rio Monjolinho e tributários (São Carlos, SP) e análise de sua relação com variáveis físicas e químicas**. 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H. A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J. M. Human domination of Earth's ecosystems. **Science**, v. 277, n. 5325, p. 494–499, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.494>.

WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1002-1022, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>.

YING, G. G. Fate, behavior and effects of surfactants and their degradation products in the environment. **Environment International**, v. 32, n. 3, p. 417-431, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.07.004>.

ZENG, L.; ZHU, Q.; LI, C.; YE, C. The effects of low concentrations and long-term contamination by sodium dodecyl sulfate on the structure and function of bacterial communities in the lake–terrestrial ecotone. **Microorganisms**, v. 12, n. 11, art. 2330, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12112330>.

ZHAO, W.; LIU, T.; LIU, Y.; WANG, H.; WANG, R.; MA, Q.; DONG, H.; BI, X. The significance of biomass allocation to population growth of the invasive species *Ambrosia artemisiifolia* and *Ambrosia trifida* with different densities. **BMC Ecology and Evolution**, v. 21, art. 175, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12862-021-01908-4>.

CAPÍTULO 2

Descrição morfológica da população de *Hedychium coronarium* J. Koenig
(ZINGIBERACEAE)

RESUMO

A expansão de espécies invasoras em ambientes aquáticos e ripários representa um fator de alteração ecológica, com a supressão de espécies nativas e a modificação da estrutura das comunidades aquáticas. No Brasil, *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo) apresenta-se como invasor, tendo sido registrado em diferentes condições ambientais no estado de São Paulo. Este capítulo analisou descritores morfométricos e observações de uma população natural de *H. coronarium* na margem direita do reservatório do Monjolinho (São Carlos, SP). Foram avaliados vinte e três indivíduos adultos, com mensuração de altura, número de folhas, dimensões foliares, largura de sombra, volume de rizomas e raízes, além da massa fresca e seca de folhas e de pseudocaulés. Também foram analisados 230 discos foliares padronizados, segmentos de pseudocaulés, rizomas e raízes para estimar a biomassa. Os indivíduos apresentaram média de 13 folhas, com comprimento médio de 32,8 cm e largura média de 6,9 cm, além de pseudocaulés de 135,9 cm. A relação entre massa fresca e massa seca indicou elevada hidratação tecidual; a fração de água tecidual nas folhas foi de 70,3% e de 88,9% no pseudocaulé. A biomassa subterrânea correspondeu a 53% da biomassa total, evidenciando a predominância de estruturas de reserva e de propagação. Observou-se também heterogeneidade estrutural de rizomas e raízes, o que sugere estratégias de alocação diferenciada de biomassa. Esses resultados corroboram padrões descritos para a espécie em outros ecossistemas ripários, destacando sua plasticidade morfológica e a capacidade de ocupar áreas sombreadas e impactadas. Os dados obtidos serviram de base para estimativas de biomassa e para a parametrização dos modelos cinéticos aplicados a bioensaios laboratoriais, em testes de crescimento sob influência de agentes estressores e de cobertura morta de *Salvinia auriculata*.

Palavras-chave: Espécies invasoras. Macrófita. Parâmetros morfométricos.

ABSTRACT

The expansion of invasive species in aquatic and riparian environments represents an ecological alteration, with the suppression of native species and the modification of aquatic community structure. *Hedychium coronarium* has invasive potential in Brazil, having been recorded in different environmental conditions in the State of São Paulo. This chapter analyzed morphometric descriptors and observations of a natural population of *H. coronarium* on the right margin of the Monjolinho reservoir (São Carlos, SP). Twenty-three adult individuals were evaluated, with measurements of height, number of leaves, leaf dimensions, shadow width, rhizome and root volume, and fresh and dry mass of leaves and pseudostems. 230 standardized leaf discs, pseudostem segments, rhizomes, and roots were also analyzed to estimate biomass. The individuals had an average of 13 leaves, with an average length of 32.8 cm and an average width of 6.9 cm, and pseudostems averaging 135.9 cm in length. The relationship between fresh and dry mass indicated high tissue hydration; the tissue water fraction was 70.3% in the leaves and 88.9% in the pseudostem. Subterranean biomass corresponded to 53% of the total biomass, highlighting the predominance of storage and propagation structures. Structural heterogeneity of rhizomes and roots was also observed, suggesting differentiated biomass allocation strategies. These results corroborate patterns described for the species in other riparian ecosystems, highlighting its morphological plasticity and ability to occupy shaded and impacted areas. The data obtained served as a basis for biomass estimates and for parameterizing kinetic models applied to laboratory bioassays and growth tests under the influence of stressors and *Salvinia auriculata* mulch cover.

Keywords: invasive species. Aquatic macrophyte. Plant morphology.

1. INTRODUÇÃO

A invasão de espécies aquáticas exóticas é um indicador de degradação ambiental que pode levar à perda de biodiversidade em ecossistemas lóticos e lênticos. Em ambientes de água doce sob pressão antrópica, essas espécies podem intensificar as alterações na estrutura da comunidade e nos processos ecossistêmicos (MATOS; PIVELLO, 2009). A *Hedychium coronarium* (lírio-do-brejo) se destaca como uma macrófita invasora, associada à supressão da regeneração de espécies nativas e à modificação de processos ecológicos em áreas alagadas e margens ripárias (COSTA *et al.*, 2019).

A análise morfológica e funcional de indivíduos adultos em populações invasoras desempenha papel importante na compreensão de sua adaptação e competitividade nos ecossistemas. Ao estudar características como altura, número de folhas, área foliar e biomassa, é possível avaliar o potencial invasivo de espécies como *H. coronarium*, além de fornecer indicadores diretos de vigor vegetativo e de capacidade de colonização (WESTOBY *et al.*, 2002). Modelos estatísticos e espaciais incorporam taxas de crescimento demográfico e padrões de dispersão para simular a propagação de espécies em paisagens heterogêneas, fornecendo ferramentas para o planejamento de controle e de estratégias de prevenção (JONGEJANS *et al.*, 2008).

Ao integrar dados populacionais sobre morfometria, crescimento e dispersão a cenários ecológicos específicos, é possível identificar fases sensíveis à intervenção, otimizar ações de controle e avaliar a eficácia de estratégias aplicadas em campo. O sucesso invasor de *H. coronarium* está associado a adaptações morfofisiológicas, nas quais análises anatômicas evidenciam ajustes na alocação de biomassa e no aparato foliar que favorecem a manutenção do crescimento em ambientes instáveis. Em conjunto, rizomas robustos, elevada biomassa e plasticidade conferem à espécie vantagens competitivas em ambientes aquáticos (CASTRO *et al.*, 2021).

O reservatório do Monjolinho (São Carlos - SP) apresenta elevada produção primária, além de dinâmicas acentuadas de decomposição de biomassa vegetal, com influência de detritos provenientes da vegetação ripária e das macrófitas aquáticas, que moldam a heterogeneidade ambiental e a estrutura das comunidades aquáticas (FRACÁCIO, 2006). Tais condições tornam-se ideais para a proliferação de macrófitas invasoras, uma vez que espécies com elevado potencial para dominação de ambientes aquáticos encontram nas margens do Monjolinho um habitat favorável. O

levantamento de parâmetros como altura do pseudocaule, área foliar, volume de raízes e biomassa acumulada, permite descrever padrões funcionais da espécie e identificar variações intraespecíficas relacionadas às condições ambientais locais (POTT; POTT, 2000). Tais métricas caracterizam a população e refletem a plasticidade ecológica da espécie, cuja capacidade de ajustar o crescimento a diferentes ambientes permite seu sucesso como invasora (THOMAZ; CUNHA, 2010).

O presente capítulo tem como objetivo caracterizar a morfologia da população de *H. coronarium* estabelecida no reservatório do Monjolinho, em São Carlos (SP), por meio da análise morfométrica de indivíduos adultos. Os objetivos específicos incluem: (i) mensurar parâmetros estruturais, como altura de pseudocaule, área foliar, número de folhas, volume de raízes e biomassa; (ii) estabelecer relações alométricas que permitam converter medidas morfológicas em estimativas de biomassa seca; e (iii) fornecer subsídios quantitativos para a modelagem matemática do crescimento da espécie em bioensaios laboratoriais.

É essencial compreender os mecanismos de invasão de *H. coronarium* em ecossistemas aquáticos urbanos e de transição urbano-rural, com base em dados de campo e em experimentos controlados. Características como elevada produção de biomassa aérea, rápido alongamento foliar, expansão lateral mediada por rizomas robustos e alta capacidade de regeneração contribuem para seu sucesso competitivo e dominância em áreas degradadas, com destaque para traços associados ao rápido crescimento, elevada produção de biomassa e alta capacidade de reprodução, na qual estão ligados ao sucesso de invasão (BORA; PADIAL, 2023). A utilização e a quantificação de parâmetros morfométricos em estudos estatísticos permitem avaliar características essenciais para o estudo de seus impactos, o que contribui para a construção de estratégias regionais de manejo de macrófitas invasoras e alinha-se às diretrizes de conservação estabelecidas por órgãos ambientais estaduais e nacionais (CUNHA-SANTINO; BIANCHINI JÚNIOR, 2006; THOMAZ; CUNHA, 2010).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O reservatório do Monjolinho (22° 00' S, 47° 54' W), localizado no campus da UFSCar em São Carlos (SP), é um corpo d'água de relevância na região para estudos ecológicos em ambientes de água doce (HISATUGO *et al.*, 2014). Inserido em área

de mata ciliar secundária e sujeito a pressões antrópicas urbanas e agrícolas, o reservatório apresenta condições favoráveis à colonização por macrófitas aquáticas, incluindo espécies invasoras como *H. coronarium*. Estudos anteriores destacam o aporte de nutrientes e os processos de eutrofização que contribuem para a expansão dessas plantas no local (PASTORE *et al.*, 2012). Assim, o reservatório do Monjolinho representa um modelo adequado para avaliar as interações entre fatores ambientais e o crescimento de macrófitas invasoras.

2.2 DESCRIÇÃO DA *Hedychium coronarium*

Hedychium coronarium J. Koenig (Zingiberaceae), conhecido como lírio-do-brejo, é uma macrófita palustre invasora, introduzida no Brasil no século XIX com fins ornamentais (PEREIRA *et al.*, 2024). Sua morfologia inclui rizomas robustos, de alta capacidade clonal, e pseudocaulis que podem ultrapassar dois metros, sustentando folhas lanceoladas dispostas alternadamente, inflorescências conspícuas com flores brancas e perfumadas, estrutura que contribuiu para sua exportação de fins ornamentais (PEREIRA *et al.*, 2024). Essa espécie apresenta características que favorecem a elevada produção de biomassa e a rápida colonização em ambientes úmidos e degradados (PASTORE *et al.*, 2012). Além disso, apresenta plasticidade fenotípica notável, tolerando diferentes regimes de luz, de nutrientes e de condições hídricas, o que amplia seu sucesso ecológico e sua resiliência a distúrbios físicos (PASTORE *et al.*, 2012). Esses atributos demonstram que *H. coronarium* é uma espécie exótica invasora preocupante em ecossistemas aquáticos, com impactos sobre a biodiversidade nativa e no funcionamento ecológico de áreas úmidas prístinas (ROJAS-SANDOVAL; ACEVEDO-RODRÍGUEZ, 2022).

A *H. coronarium* é originária da Ásia tropical, incluindo o sul e o sudeste asiáticos e a região do Himalaia (GAFAR; SALIM, 2025). Em ambientes úmidos e em margens ripárias no Brasil, a espécie apresenta crescimento vegetativo rápido, com reprodução predominantemente clonal por meio de rizomas, além de traços funcionais associados ao sucesso competitivo em zonas ripárias perturbadas (PASTORE *et al.*, 2012). Estudos têm documentado sua ocorrência e aspectos ecológicos em matas de galeria e em ambientes alagáveis, bem como sua fenologia e padrões de floração e frutificação em condições tropicais (SANTOS *et al.*, 2005; PASTORE *et al.*, 2012).

A elevada capacidade de dispersão e estabelecimento de *H. coronarium* em áreas degradadas decorre do conjunto de (i) propagação vegetativa eficiente por

fragmentação e rebrota de rizomas transportados por enxurradas e cursos d'água; (ii) tolerância a gradientes de umidade e sombreamento típicos de matas ciliares antropizadas; e (iii) ocupação rápida de clareiras e bordas, suprimindo a regeneração de espécies nativas por competição por luz e espaço (BELLINI; BECKER, 2021). Em ambientes urbano-rurais, sua presença tende a aumentar onde há alteração do regime hidrológico, aporte de nutrientes e degradação da vegetação ciliar, condições que reduzem a resistência biótica e facilitam a invasão (PASTORE *et al.*, 2012). Na Figura 1 é mostrada parte da população de *H. coronarium* na margem direita do reservatório do Monjolinho, em São Carlos (SP).

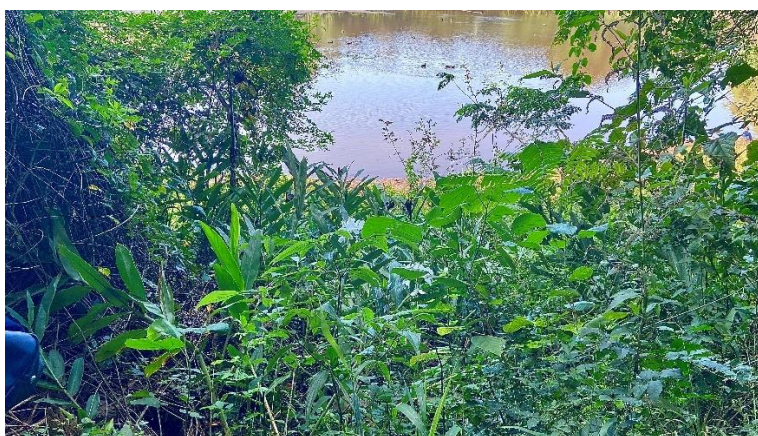


Figura 1 - Parte da população de *Hedychium coronarium* na margem do reservatório do Monjolinho UFSCar – São Carlos.
(Arquivo pessoal, 2024).

2.3 COLETA E MÉTRICAS MORFOLÓGICAS

Foram coletados 23 exemplares adultos de *H. coronarium* nas margens do reservatório do Monjolinho, em dois períodos distintos de 2024 na margem direita do reservatório, 1ª coleta em 13/03/2024 e 2ª coleta em 05/09/2024. Para a montagem de bioensaios nos estudos posteriores, amostras de solos hidromórficos também foram coletadas nas margens do reservatório. As análises dos exemplares adultos coletados incluíram medições de (i) as áreas foliares, (ii) o número de folhas, (iii) o comprimento do pseudocaule, (iv) a biomassa fresca e seca (caule e folhas) e o (v) volumes de raízes e rizomas.

Para obter valores de biomassa seca do pseudocaule, retiraram-se de cada exemplar 3 fragmentos de 5 centímetros da base, do centro e da região apical, que foram determinados gravimetricamente em balança analítica (precisão: 0,001 g). Em seguida, foram alocados em estufa de secagem (45–50 °C) até obterem massa constante, com suas respectivas massas determinadas novamente. Para a obtenção

de biomassas secas de folhas, foram retirados 10 discos laminares de 0,87 cm² de área de cada indivíduo, e suas massas foram determinadas gravimetricamente pelo mesmo procedimento adotado para os pseudocaulos. Já para a obtenção de volume de rizomas e raízes, utilizou-se uma proveta de 1000 ml, preenchida com água até a metade, e determinou-se o volume de cada um a partir do deslocamento da água na proveta. As medições de largura e comprimento, tanto das folhas quanto dos pseudocaulos, foram realizadas com escala milimétrica, com auxílio de fita métrica, e o número de folhas foi contabilizado.

2.4 ANÁLISE DE DADOS

Os descritores morfométricos obtidos foram utilizados para estimar os padrões de biomassa da população local. As Figuras 2, 3 e 4 mostram, respectivamente, o indivíduo adulto coletado, as folhas e a flor, todas as partes de exemplares coletados na margem direita do reservatório do Monjolinho (São Carlos - SP).



Figura 2 – Exemplar de *Hedychium coronarium* coletado com raízes e rizoma. (Arquivo pessoal, 2024).



Figura 3 - Folha de *Hedychium coronarium*.
(Arquivo pessoal, 2024).

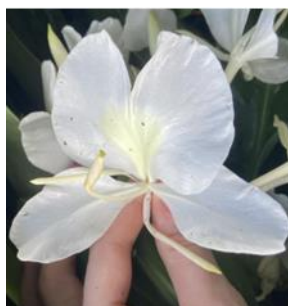


Figura 4: Flor de *Hedychium coronarium*.
(Arquivo pessoal, 2024).

As relações alométricas obtidas com indivíduos adultos foram utilizadas como base para converter parâmetros de crescimento (área foliar e comprimento de caule) em estimativas de biomassa, fornecendo dados para os experimentos com bioensaios. Dessa forma, experimentos laboratoriais podem ser comparados aos dados de campo, possibilitando análises mais integradas do desempenho da espécie sob diferentes condições ambientais (BIANCHINI JR. *et al.*, 2015). Regressão linear simples foi realizada para obter a relação matemática entre as duas variáveis quantitativas: massa seca (MS) e massa fresca (MF).

Para os cálculos de MF e MS, foram analisados 230 discos laminares padronizados de 0,87 cm², totalizando 10 discos por indivíduo (23 indivíduos adultos coletados). Cada disco laminar foi pesado fresco (MF) em balança analítica. Em seguida, foi seco em estufa a 45-50 °C até atingir massa constante e, então, foram

pesados novamente (MS). Esses pares de valores foram usados para construir o modelo de regressão linear entre MF e MS ($MS = 0,2966 \times MF$). A conversão dos valores para *mg* foi feita por proporção, considerando a área real do disco e normalizando-a a 1 cm².

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características dos indivíduos adultos com flores são apresentadas na Tabela 1. A análise morfométrica dos exemplares coletados revelou padrões consistentes com as descrições prévias da espécie em ambientes úmidos tropicais.

Tabela 1. Valores médios e desvios-padrão das características funcionais (número de folhas, largura e comprimento das folhas e do pseudocaule, biomassa seca e fresca de pseudocaule e folhas, e volume das raízes e rizomas) da população de *Hedychium coronarium* situada na margem direita do reservatório do Monjolinho.

Características funcionais	Média	Desvio padrão
Número de folhas	13,35	2,75
Largura das folhas (cm)	6,93	2,21
Comprimento das folhas (cm)	32,76	12,52
Comprimento do pseudocaule (cm)	135,94	24,49
Biomassa fresca das folhas (g)	0,02	0,01
Biomassa seca das folhas (g)	0,005	0,001
Biomassa fresca do pseudocaule (g)	5,84	3,73
Biomassa seca do pseudocaule (g)	0,675	0,403
Volume raízes (ml)	56,52	51,40
Volume rizomas (ml)	165,00	87,03

O número médio de folhas por indivíduo foi $13,35 \pm 2,75$, valor comparável ao registrado por Santos *et al.* (2005), o que destaca a elevada capacidade foliar como estratégia para maximizar a captura de luz em ambientes ripários. A largura e o comprimento médios das folhas ($6,93 \pm 2,21$ cm e $32,76 \pm 12,52$ cm, respectivamente) corroboram os dados disponíveis em *Australian Tropical Rainforest Plants* (2025), caracterizando a plasticidade foliar como traço funcional para o sucesso invasivo da espécie em áreas de sombreamento parcial. Além disso, o ambiente invadido na região de coleta é caracterizado por áreas úmidas e sombreadas na mata ciliar do reservatório, o que indica que *H. coronarium* se desenvolve bem nessas condições.

O comprimento médio do pseudocaule ($135,94 \pm 24,49$ cm) indica que os indivíduos dessa área estão dentro da faixa descrita por Pastore *et al.* (2012) em populações da Mata Atlântica. Tal característica, associada à elevada produção de

biomassa fresca e seca nos segmentos dos pseudocaulis, sugere investimento em estruturas de sustentação. O acúmulo de biomassa foliar, embora relativamente baixo em segmentos padronizados avaliados ($0,02 \pm 0,01$ g fresca e $0,005 \pm 0,001$ g seca), reflete o padrão de folhas finas, lanceoladas e numerosas (n° médio = 13,35), o que permite maior área fotossintética total por indivíduo.

Na Tabela 2 apresentam-se os dados da variação de massa fresca e seca das folhas de macrófita em questão, em função da área foliar.

Tabela 2. Variações de massa fresca e seca das folhas de *Hedychium coronarium* em função da área foliar.

Área de 1 cm ²	MF (mg)	MS (mg)
Média	18,01	5,30
Desvio padrão	4,33	1,46
Coefficiente variação (%)	24,07	27,62
Máximo	27,59	8,97
Mínimo	6,44	1,72

Legenda: Variação de massa: MF = Massa fresca, MS = Massa seca; área de 1 cm = fragmento foliar padronizado analisado.

Para converter variáveis como o comprimento de caule e área foliar em estimativas de biomassa seca acumulada foram utilizadas equações alométricas baseadas nos dados de indivíduos adultos de *H. coronarium*, conforme sugerido por Westoby *et al.* (2002), que também destacam a importância dessa abordagem na análise funcional de plantas.

O valor do coeficiente de conversão alométrica de 0,2966 entre massa fresca e massa seca das folhas indica que 29,66% da massa fresca das folhas corresponde a matéria seca, enquanto o restante (70,34%) corresponde ao conteúdo de água tecidual. A relação foi obtida por regressão linear simples a partir dos dados de MF e MS das 230 amostras de discos laminares de 1 cm², como representado na Figura 5.

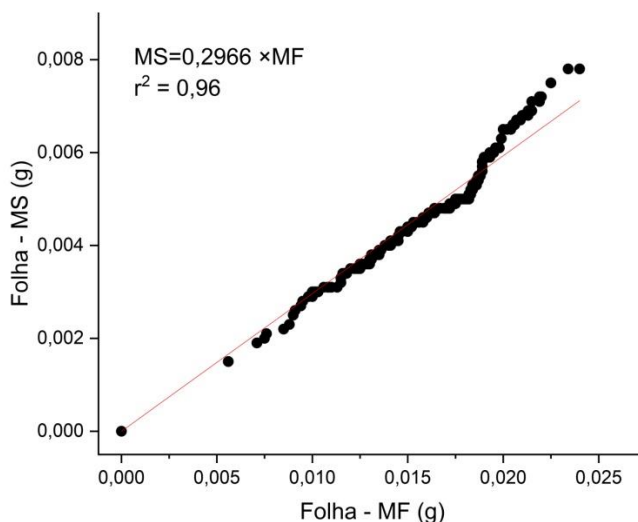


Figura 5 - Relação linear entre a massa seca (g) e a massa fresca (g) de amostras de folhas de *Hedychium coronarium* (n=230).

O valor 0,96 para o coeficiente de determinação (r^2) indica a robustez da relação entre os dados analisados. A variação da massa seca (MS) é fortemente explicada pela massa fresca (MF). Este valor elevado (próximo de 1,00) sugere que a relação entre essas variáveis é forte e linear. Com os dados foliares, obteve-se MF média de 18,01 mg (DP=4,33 mg; CV=24,07%), variando de 6,44 a 27,59 mg; já a massa seca (MS) das folhas (Tabela 2) obteve média de 5,30 mg, variando de 1,72 a 8,97 mg. Do ponto de vista funcional, a razão entre massa seca e massa fresca das folhas, conhecida como *Leaf Dry Matter Content* (LDMC), é uma medida ecologicamente relevante por estar associada à densidade, espessura e longevidade foliar, bem como à resistência à herbivoria e ao estresse hídrico ou químico (ELGER; WILLBY, 2003).

Em macrófitas emergentes e flutuantes, o LDMC apresenta uma variação significativa devido às diferenças na densidade e na palatabilidade das folhas (ELGER & WILLBY, 2003). Esses autores observaram que espécies invasoras, como a *Egeria densa*, apresentam variabilidade no LDMC e que as folhas com maiores valores desse índice tendem a apresentar defesas químicas e estruturais mais fortes, o que influencia a resposta ambiental dessas espécies. Por fim, a alta correlação entre MF e MS justifica o uso da regressão linear como ferramenta preditiva para estimar, indiretamente, a biomassa foliar nos bioensaios da presente pesquisa. Isso permitiu

ajustar modelos cinéticos com base em medidas não destrutivas, otimizando as análises temporais de crescimento e de resposta aos agentes estressores testados, o dodecil sulfato de sódio e a vinhaça. A Tabela 3 apresenta as variações de massa seca e de massa fresca do pseudocaule da macrófita avaliada.

Tabela 3 - Variações de massa fresca e seca dos caules de *Hedychium coronarium* em função do comprimento.

Comprimento em 1 cm	MF (mg)	MS (mg)
Média	1,18	0,14
Desvio padrão	0,74	0,08
Coefficiente variação (%)	62,73	59,70
Máximo	3,48	0,38
Mínimo	0,16	0,01

Legenda: Variação de massa: MF = Massa fresca, MS = Massa seca.

O coeficiente de 0,1107 indica que 11,07% da massa fresca do pseudocaule corresponde à massa seca. Este valor é menor do que o observado nas folhas (29,66%). O valor de $r^2 = 0,87$ indica uma forte correlação linear entre MF e MS, conferindo confiabilidade ao modelo para estimativas indiretas de biomassa do pseudocaule. A relação linear entre as massas fresca e seca dos pseudocaules é apresentada na Figura 6.

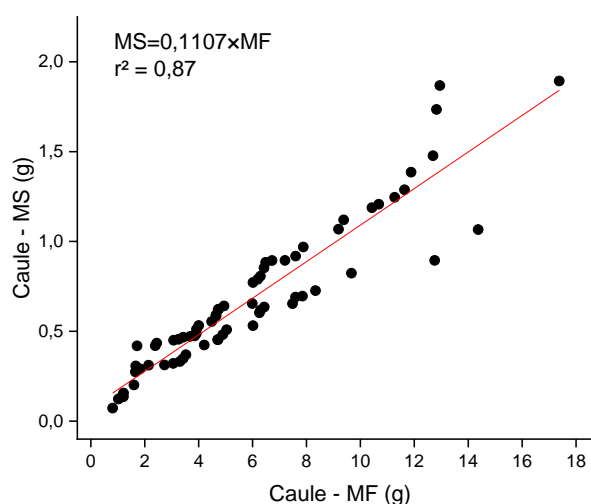


Figura 6 - Relação linear entre a massa seca (g) e a massa fresca (g) de amostras de caule de *Hedychium coronarium* (n=69).

A baixa proporção de MS/MF (11%) indica que os pseudocaulos são tecidos altamente hidratados, o que está de acordo com o que foi observado na literatura para espécies de estratégia invasora: plantas com alto teor hídrico tendem a crescer rapidamente e a colonizar áreas úmidas com mais eficiência (PÉREZ-HARGUINDEGUY *et al.*, 2013). A equação linear ajustada para a relação entre o volume e a massa seca das amostras de rizomas e raízes foi expressa como $MS = 0,1662 \times \text{volume}$, com coeficiente de determinação ($r^2 = 0,82$). Esse valor indica uma correlação forte e positiva, sugerindo que a variação do volume explica grande parte da variação observada na biomassa seca. A relação linear é apresentada na Figura 7.

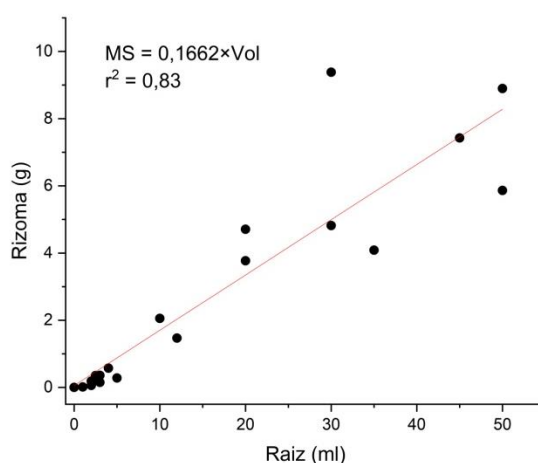


Figura 7 - Relação linear entre o volume (Vol) e a massa seca (MS) de amostras de raiz e de rizoma (n=19).

A distribuição dos pontos no gráfico evidencia maior concentração nas menores classes de volume e maior dispersão em valores intermediários e mais altos, o que pode refletir a heterogeneidade estrutural dos rizomas de *H. coronarium* e a variabilidade na reserva de biomassa. A Tabela 4 evidencia a alometria geral dos indivíduos adultos analisados.

Tabela 4. Alometria de indivíduos adultos (n = 23) de *Hedychium coronarium* coletados na margem direita do reservatório do Monjolino (em 13 de março e 9 de setembro de 2024).

	I (cm)	NF	Caule - MS (g)	Folhas - MS (g)	Raiz - MS (g)
Média	135,9	13,3	17,8	9,7	9,4
Desvio padrão	24,5	2,8	3,2	3,6	8,5
Coefficiente variação (%)	18,0	20,7	18,0	37,2	90,9
Mínimo	107,5	9,0	14,1	5,1	0,8
Máximo	200,0	20,0	26,2	18,5	33,2

	Rizoma - MS (g)	Ø Caule (cm)	L. sombra (cm)	BA (g)	BS (g)
Média	27,4	52,2	9,4	27,5	36,8
Desvio padrão	14,5	8,2	8,5	6,4	22,0
Coefficiente variação (%)	52,7	15,7	90,9	23,1	59,7
Mínimo	3,3	40,0	0,8	20,1	4,2
Máximo	54,8	65,0	33,2	44,7	88,1

	BA (%)	BS (%)
Média	47,0	53,0
Desvio padrão	14,8	14,8
Coefficiente variação (%)	31,5	28,0
Mínimo	22,1	16,9
Máximo	83,1	77,9

Legenda: I = comprimento do caule; NF = número de folhas; MS = massa seca; Ø caule = diâmetro do caule; L. sombra = largura da sombra; BA = biomassa aérea (folhas + caule); BS = biomassa subterrânea (raízes + rizomas).

As estruturas subterrâneas apresentaram destaque com volume médio de rizomas ($165,00 \pm 87,03$ ml) superior ao de raízes ($56,52 \pm 51,40$ ml). Estudos de Pastore *et al.* (2012) e Castro *et al.* (2021) confirmam que o vigor do rizoma de *H. coronarium* está diretamente associado à sua resiliência diante de distúrbios e à capacidade de recolonizar áreas degradadas. Resultado evidente também na porcentagem maior para biomassa subterrânea quando comparado a biomassa aérea, com 53% contra 47%.

Os resultados demonstram que os indivíduos analisados apresentam um conjunto de traços morfológicos compatíveis com uso mais eficiente de recursos em ambientes sujeitos a variações ambientais, como o reservatório do Monjolinho, sugerindo potencial de plasticidade morfológica como estratégia de invasoras (RIIS *et al.*, 2010). As folhas numerosas, pseudocaulos robustos e rizomas volumosos evidenciam a aptidão da espécie para explorar recursos de forma mais eficiente e para sustentar populações densas em ecossistemas afetados por efeitos antrópicos. Do ponto de vista da ecologia de invasões, tais atributos reforçam o papel da morfologia como base para a competitividade da espécie em ecossistemas ripários antropizados (BELLINI; BECKER, 2021), e explicam a dificuldade de manejo e controle em áreas de elevada conectividade hídrica e com impactos de transição entre o ambiente urbano e o rural.

Assim, a análise dos descritores morfológicos de *H. coronarium* não apenas confirma sua elevada capacidade adaptativa em ecossistemas sujeitos a distúrbios, mas também fornece subsídios para compreender os mecanismos que favorecem sua expansão em ambientes aquáticos tropicais. Ao integrar plasticidade morfológica, elevada eficiência na captação de recursos e resiliência a condições de estresse, a espécie se mostra um modelo para estudos de impactos e da dinâmica de invasões biológicas. Essa constatação sustenta a escolha de *H. coronarium* como organismo de estudo em experimentos controlados, nos quais há avaliações de respostas da macrófita frente à exposição a contaminantes emergentes, permitindo avançar na compreensão de seus limites ecológicos, nas implicações para o manejo ambiental de invasões e em testes laboratoriais de pressões químicas alteram a dominância de *H. coronarium* em comunidades aquáticas (BLANCK, 2002).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSTRALIAN TROPICAL RAINFOREST PLANTS. *Hedychium coronarium* J. Koenig. [S. l.: s. n.], 2025. Disponível em: http://apps.lucidcentral.org/rainforest/text/entities/hedychium_coronarium.htm. Acesso em: ago. 2025.

BELLINI, G.; BECKER, F. G. Riparian degradation, stream position in watershed, and proximity to towns facilitate invasion by *Hedychium coronarium*. **Aquatic Invasions**, v. 16, n. 1, p. 11-27, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3391/ai.2021.16.1.02>.

BIANCHINI JR., I.; CUNHA-SANTINO, M. B.; MILAN, J. A. M.; RODRIGUES, C. J.; DIAS, J. H. P. Model parameterization for the growth of three submerged aquatic macrophytes. **Journal of Aquatic Plant Management**, v. 53, p. 64–73, 2015.

BLANCK, H. A critical review of procedures and approaches used for assessing pollution-induced community tolerance (PICT) in biotic communities. **Human and Ecological Risk Assessment**, v. 8, p. 1003-1034, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1080/1080-700291905792>.

BORA, L. S.; PADIAL, A. A. A global review on invasive traits of macrophytes and their link to invasion success. **Acta Limnologica Brasiliensia**, online, v. 35, e20, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X4222>.

CASTRO, W. A. C.; ALMEIDA, R. V.; XAVIER, R. O.; ARDUIN, M.; MOYA, H. M.; MATOS, D. M. S. Response of rhizomes of the invasive *Hedychium coronarium* J. König (Zingiberaceae) to different soil moisture conditions. **Acta Botanica Brasilica**, v. 35, p. 122–125, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-33062020abb0343>.

COSTA, R. O.; BATISTELI, A. F.; ESPINDOLA, E. L. G.; MATOS, D. M. S. Invasive *Hedychium coronarium* inhibits native seedling growth through belowground competition. **Flora**, v. 261, art. 151479, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.151479>.

CUNHA-SANTINO, M. B.; BIANCHINI JÚNIOR, I. Modelos matemáticos aplicados aos estudos de decomposição de macrófitas aquáticas. **Oecologia Australis**, v. 10, n. 2, p. 154-164, 2006.

ELGER, A.; WILLBY, N. J. Leaf dry matter content as an integrative expression of plant palatability: the case of freshwater macrophytes. **Functional Ecology**, v. 17, n. 1, p. 58–65, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2003.00700.x>.

FRACÁCIO, R. Estudos limnológicos e ecotoxicológicos (laboratoriais e in situ), com ênfase na avaliação da toxicidade de metais e pesticidas organoclorados em peixes (*Danio rerio* e *Poecilia reticulata*) - sub-bacia do rio Monjolinho (São Carlos, SP). 2006. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

GAFAR, M. K.; SALIM, F. Phytochemicals with pharmacological potentials from *Hedychium coronarium* plant: a concise review. **Discover Chemistry**, v. 2, art. 289, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44371-025-00372-z>.

HISATUGO, K. F.; MANSANO, A. S.; SELEGHIM, M. H. R. Protozoans bacterivory in a subtropical environment during a dry/cold and a rainy/warm season. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 45, n. 1, p. 145-151, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-83822014000100020>.

JONGEJANS, E.; SKARPAAS, O.; SHEA, K. Dispersal, demography and spatial population models for conservation and control management. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 9, n. 3–4, p. 153–170, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2007.09.005>.

MATOS, D. M. S.; PIVELLO, V. R. O impacto das plantas invasoras nos recursos naturais de ambientes terrestres: alguns casos brasileiros. **Ciência e Cultura**, v. 61, n. 1, p. 27–30, 2009.

PASTORE, M.; RODRIGUES, R. S.; SIMÃO-BIANCHINI, R.; FILGUEIRAS, T. S. **Guia de Campo: Plantas exóticas invasoras na Reserva Biológica do Alto da Serra de Paranapiacaba, Santo André - SP**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2012.

PEREIRA, M. L.; BARBOSA, F. M.; CHAGAS, K. P. T.; VELAZCO, S. J. E.; MONTAGNA, T.; CARLUCCI, M. B.; BLUM, C. T. Influência de *Hedychium coronarium* J. König na sucessão secundária de um remanescente de Floresta Ombrófila Mista Aluvial. **Ciência Florestal**, v. 34, n. 1, p. art. e74054, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509874054>.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N.; DÍAZ, S.; GARNIER, E.; LAVOREL, S.; POORTER, H.; JAUREGUIBERRY, P.; BRET-HARTE, M. S.; CORNWELL, W. K.; CRAINE, J. M.; GURVICH, D. E.; URCELAY, C.; VENEKLAAS, E. J.; REICH, P. B.; POORTER, L.; WRIGHT, I. J.; RAY, P.; ENRICO, L.; PAUSAS, J. G.; DE VOS, A. C.; BUCHMANN, N.; FUNES, G.; QUÉTIER, F.; HODGSON, J. G.; THOMPSON, K.; MORGAN, H. D.; TER STEEGE, H.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; SACK, L.; BLONDER, B.; POSCHLOD, P.; VAIERETTI, M. V.; CONTI, G.; STAVER, A. C.; AQUINO, S.; CORNELISSEN, J. H. C. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 61, n. 3, p. 167–234, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1071/BT12225>.

POTT, V. J.; POTT, A. **Plantas aquáticas do Pantanal**. 1. ed. Corumbá: EMBRAPA, 2000.

RIIS, T.; LAMBERTINI, C.; OLESEN, B.; CLAYTON, J. S.; BRIX, H.; SORRELL, B. K. Invasion strategies in clonal aquatic plants: are phenotypic differences caused by phenotypic plasticity or local adaptation? **Annals of Botany**, v. 106, n. 5, p. 813-822, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcq176>.

ROJAS-SANDOVAL, J.; ACEVEDO-RODRÍGUEZ, P. *Hedychium coronarium* (White butterfly ginger lily). **CABI Compendium**. Wallingford: CABI, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.26678>.

SANTOS, S. B.; PEDRALLI, G.; MEYER, S. T. Aspectos da fenologia e ecologia de *Hedychium coronarium* (Zingiberaceae) na Estação Ecológica do Tripuí, Ouro Preto – MG. **Planta Daninha**, v. 23, n. 2, p. 175–180, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582005000200002>.

THOMAZ, S. M.; CUNHA, E. R. The role of macrophytes in habitat structuring in aquatic ecosystems: methods of measurement, causes and consequences on animal assemblages' composition and abundance. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 22, n. 2, p. 218–236, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4322/actalb.02202011>.

WESTOBY, M.; FALSTER, D. S.; MOLES, A. T.; VESK, P. A.; WRIGHT, I. J. Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 33, p. 125–159, 2002. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150452>.

CAPÍTULO 3

Modelagem matemática do crescimento de *Hedychium coronarium* J. Koenig (ZINGIBERACEAE) sob influência de dodecil sulfato de sódio, vinhaça e biomassa seca de *Salvinia auriculata* Aubl.

RESUMO

A intensificação dos impactos antrópicos em ecossistemas aquáticos, acompanhada do aporte de surfactantes sintéticos e de resíduos agroindustriais, modifica a qualidade físico-química da água e do solo. Essas alterações favorecem a expansão de macrófitas invasoras, como a *Hedychium coronarium*, cuja alta dominância suprime espécies nativas e altera a dinâmica ecológica. Entre esses estressores destacam-se o dodecil sulfato de sódio (DSS), contaminante emergente (CE) amplamente utilizado, e a vinhaça, resíduo sucroalcooleiro de elevada carga orgânica e mineral. Este estudo avaliou o crescimento de *H. coronarium* em bioensaios sob exposição a DSS (0,5 e 1,0 g L⁻¹) e à vinhaça (10% e 20%) na ausência e na presença de biomassa seca de *Salvinia auriculata*, empregada como cobertura morta (*mulching*). Foram analisados parâmetros biométricos, bem como características físico-químicas da vinhaça e do solo experimental. No experimento com DSS, os resultados mostraram ausência de diferenças significativas no acúmulo de biomassa de *H. coronarium* entre os tratamentos expostos apenas ao DSS ($p > 0,05$). Na presença de *mulching* foram observadas diferenças significativas entre o controle e o tratamento DSS 0,5 g L⁻¹ ($H = 11,51$; $p = 0,0032$; $p < 0,05$). Os resultados mostram que a interação entre o surfactante e a biomassa seca de *S. auriculata* modificou a dinâmica de crescimento, com resposta hormética da macrófita à menor concentração combinada ao *mulching*. No experimento com vinhaça, os resultados evidenciaram redução significativa do crescimento da macrófita invasora em comparação ao controle ($H = 19,38$; $p < 0,0001$). Na presença de *mulching*, houve atenuação dos efeitos da vinhaça, com maior acúmulo de biomassa e diferenças significativas entre o controle + *mulching* e vinhaça 10% + *mulching* ($H = 8,175$; $p = 0,0168$). A vinhaça apresentou elevadas concentrações de matéria orgânica e de nutrientes, incluindo níveis relevantes de K, Zn e B. Os resultados evidenciam que a macrófita responde, com crescimento, de maneira distinta aos dois estressores e que a biomassa seca de *S. auriculata* modifica essas respostas. O estudo auxilia na compreensão de como esses estressores químicos impactam no crescimento da macrófita invasora, contribuindo no estudo de modelos que preveem a sua dinâmica em cenários de poluição, apoiando estratégias de manejo e conservação de ecossistemas aquáticos.

Palavras-chave: Macrófita. Espécies invasoras. Biomassa vegetal. Hormese.

ABSTRACT

The intensification of anthropogenic impacts on aquatic ecosystems, coupled with the input of synthetic surfactants and agro-industrial waste, alters the physicochemical quality of water and soil. These alterations favor the expansion of invasive macrophytes, such as *Hedychium coronarium*, which exhibit high dominance, suppressing native species and altering ecological dynamics. Among these stressors, sodium dodecyl sulfate (SDS), a widely used emerging contaminant, and vinasse, a sugarcane residue with a high organic and mineral load, stand out. This study evaluated the growth of *H. coronarium* in bioassays under exposure to SDS (0.5 and 1.0 g L⁻¹) and vinasse (10% and 20%) in the absence and presence of dry biomass of *Salvinia auriculata*, used as mulch. Biometric parameters and the experimental soil were analyzed. In the SDS experiment, results showed no significant difference in *H. coronarium* biomass accumulation between treatments exposed only to SDS ($p > 0.05$). In the presence of mulching, significant differences were observed between the control and the SDS 0.5 g L⁻¹ treatment ($H = 11.51$; $p = 0.0032$; $p < 0.05$). The results show that the interaction between the surfactant and the dry biomass of *S. auriculata* modified the growth dynamics, with a hormetic response of the macrophyte at the lower concentration combined with mulching. In the vinasse experiment, results showed a significant reduction in macrophyte growth compared to the control ($H = 19.38$; $p < 0.0001$). In the presence of mulching, the effects of vinasse were attenuated, with greater biomass accumulation and significant differences between the control + mulching and vinasse 10% + mulching ($H = 8.175$; $p = 0.0168$). The vinasse contained high concentrations of organic matter and nutrients, including levels of K, Zn, and B within relevant ranges. The results show that the macrophyte responds differently to the two stressors, with growth, and that the dry biomass of *S. auriculata* modifies these responses. The study helps understand how these chemical stressors affect the growth of the invasive macrophyte, contributing to models that predict its dynamics in pollution scenarios and supporting management and conservation strategies for aquatic ecosystems.

Keywords: Macrophyte. Invasive species. Plant biomass. Hormesis.

1. INTRODUÇÃO

A presença de contaminantes emergentes em ambientes aquáticos, como surfactantes aniônicos de uso doméstico e industrial, tem se intensificado (NGUYEN *et al.*, 2016). Embora solúveis, alguns tipos apresentam baixa biodegradabilidade e persistem em águas e sedimentos, podendo afetar a fisiologia de produtores primários (MONDAL *et al.*, 2019). No Brasil, os surfactantes são detectados em esgotos sanitários (3–6 mg L⁻¹) e em efluentes industriais (até 2000 mg L⁻¹) (CETESB, 2008). Apesar das estações de tratamento, grande parte dos efluentes é lançada nos rios a sem tratamento adequado, o que contribui para a deterioração da qualidade da água (TUNDISI *et al.*, 2008).

A poluição hídrica por efluentes agroindustriais também é crescente, representando um dos principais desafios ambientais no Brasil, país líder na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, processo que gera volumes consideráveis de vinhaça, subproduto da destilação alcoólica, cuja proporção é estimada em 10 a 15 litros para cada litro de etanol produzido (FUESS; GARCIA, 2014). A vinhaça pode atuar tanto como fonte de nutrientes quanto como agente estressor, favorecendo a proliferação de produtores primários e podendo induzir efeitos tóxicos sobre a biota aquática (CETESB, 2015). A disponibilidade de nutrientes na vinhaça pode favorecer a expansão de macrófitas invasoras, intensificando os impactos sobre a vegetação nativa e a estrutura dos ecossistemas. Nesse contexto, a presença de *Hedychium coronarium*, macrófita invasora de alta plasticidade e capaz de colonizar ambientes ripários degradados (CASTRO *et al.*, 2021), amplia a complexidade das alterações ecológicas. No estado de São Paulo, a aplicação agrícola da vinhaça está sujeita a restrições em áreas de preservação permanente, aquíferos e unidades de conservação, com o objetivo de mitigar os riscos associados à elevada carga orgânica e mineral da vinhaça (CETESB, 2015).

Nos estudos ambientais e de crescimento de macrófitas, o fenômeno da hormese vem ganhando destaque. Trata-se de um evento no qual baixas concentrações de contaminantes ou fatores de estresse podem induzir efeitos de estímulo ao crescimento ou maior tolerância fisiológica, enquanto altas doses resultam em toxicidade (CALABRESE; BALDWIN, 2002). Esse conceito tem particular relevância no estudo de espécies invasoras, uma vez que a capacidade de colonizar novas áreas pode ser favorecida por respostas horméticas, permitindo não apenas a sobrevivência em ambientes contaminados, mas também a expansão competitiva

frente a espécies nativas menos tolerantes, o que influencia diretamente estratégias de manejo e conservação de ecossistemas aquáticos (AGATHOKLEOUS *et al.*, 2019).

No contexto do estudo do crescimento vegetal, a modelagem matemática permite estimar parâmetros biométricos, como o coeficiente de crescimento (μ) e o tempo de duplicação (td), que fornecem base para prever a dinâmica de expansão ou contenção de espécies sob estresse químico ou ambiental. Essa abordagem integra dados empíricos e previsões, que apoiam a compreensão da ecologia de invasões e de estratégias de manejo (HUNT, 1982; BROWN *et al.*, 2004; PASTORE *et al.*, 2012).

Diante desse cenário, as questões que orientam este capítulo concentram-se em avaliar se o dodecil sulfato de sódio (DSS) e a vinhaça exercem influência significativa sobre o crescimento de *H. coronarium* em condições controladas, e se a adição de biomassa seca de *Salvinia auriculata* altera esses efeitos. Para o experimento com DSS, as hipóteses podem ser divididas em: (i) o DSS afeta negativamente o crescimento de *H. coronarium* e (ii) a adição de biomassa seca de *S. auriculata* como cobertura morta (*mulching*) pode reduzir o efeito negativo do DSS sobre o crescimento de *H. coronarium*, independentemente da concentração de DSS. Para o experimento com vinhaça levanta-se hipóteses de que (iii) a concentração elevada de vinhaça resultará em um crescimento mais lento ou será fator inibidor de *H. coronarium*, (iv) enquanto concentrações mais baixas podem acelerar seu crescimento, e que a (v) adição de biomassa seca de *S. auriculata* nos bioensaios influenciará o crescimento de *H. coronarium* de forma positiva, independentemente da concentração de vinhaça.

Assim, o presente capítulo tem como objetivos principais avaliar os efeitos de duas concentrações de dodecil sulfato de sódio (DSS) e de vinhaça sobre o crescimento de *H. coronarium*. Para tanto, foram estimados parâmetros de crescimento de *H. coronarium* sob diferentes tratamentos, em dois experimentos realizados, considerando a exposição ao DSS e à vinhaça e a adição de biomassa seca de *S. auriculata* em ambos.

Os resultados permitem evidenciar os riscos associados à poluição, uma pressão química que pode influenciar a dinâmica de invasão em ecossistemas aquáticos; para tanto, os objetivos específicos deste estudo para o experimento com DSS foram:

1 - Determinar o crescimento de *H. coronarium* utilizando descritores de biometria: comprimento e largura de pseudocaule, número de folhas, área foliar

(comprimento e largura) e volume de raiz/rizoma e posteriores cálculos de biomassa acumulada ao final do experimento;

2 - Verificar a influência de surfactante em duas concentrações no crescimento de *H. coronarium*;

3 - Avaliar os efeitos da combinação entre a cobertura orgânica morta e a biomassa seca de *S. auriculata* sobre o crescimento de *H. coronarium* em meio com 2 concentrações de dodecil sulfato de sódio.

Os objetivos específicos para o experimento com vinhaça foram:

1 - Avaliar a influência de vinhaça em duas concentrações no crescimento de *H. coronarium*;

2 - Determinar o crescimento de *H. coronarium* utilizando descritores biométricos: comprimento e largura de pseudocaule, número de folhas, área foliar (comprimento e largura) e volume de raiz/rizoma e posteriores cálculos de biomassa acumulada ao final do experimento;

3 - Testar os efeitos da combinação entre a cobertura orgânica morta e a biomassa seca de *S. auriculata* sobre o crescimento de *H. coronarium* em meio contendo 2 concentrações de vinhaça.

Investigar a interação entre vinhaça e *H. coronarium* contribui para compreender os riscos ambientais associados ao manejo desse resíduo e suas implicações no controle de espécies invasoras em ambientes urbano-rurais (CASTRO *et al.*, 2021). Ao integrar essas análises, o estudo contribui para compreender como a vinhaça e o DSS interagem com a espécie invasora de macrófita em ambientes lênticos e ripários.

Ao integrar essas análises, o estudo contribui para compreender como a vinhaça interage com a espécie invasora de macrófita em ambientes aquáticos e ripários. Os resultados podem subsidiar estratégias de manejo sustentável da água em áreas sob pressão da agricultura intensiva, do crescimento acelerado da urbanização e do conseqüente aumento do despejo de efluentes em corpos hídricos, o que contribui para compreender a relação entre agentes estressores e processos de invasão biológica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE COLETA

O Reservatório do Monjolinho (22°00' S, 47°54' W), localizado no *campus* da UFSCar, em São Carlos (SP), é um ambiente lêntico sujeito à influência de usos urbanos e agrícolas no trecho a montante de sua bacia de drenagem. O rio Monjolinho, pertencente à bacia do Tietê-Jacaré, apresenta áreas de cabeceira sujeitas à urbanização crescente, bem como trechos em contato direto com atividades agrícolas e esgoto doméstico, fatores que contribuem para a redução da qualidade da água e para a expansão de espécies oportunistas (VIANA, 2005). Foi relatada ampla distribuição de *H. coronarium* ao longo do curso do Monjolinho, especialmente em ambientes ripários perturbados, onde a baixa cobertura de mata ciliar favorece sua instalação (PASTORE *et al.*, 2012). A escolha dessa área para coleta justifica-se por representar um sistema urbano-rural típico do interior paulista, marcado pelo conflito entre conservação hídrica e impactos antrópicos, com ampla presença da macrófita escolhida para o experimento.

2.2 DESCRIÇÃO DA *Hedychium coronarium* E *Salvinia auriculata*

Hedychium coronarium J. König (Zingiberaceae) é uma macrófita rizomatosa perene, nativa da Ásia tropical e amplamente naturalizada nas regiões tropicais da América do Sul. A planta forma densos touceirais a partir de rizomas robustos, o que confere alta capacidade competitiva em ambientes ripários, favorecendo a exclusão de espécies nativas (BELLINI; BECKER, 2021). Essa espécie apresenta rápido crescimento e capacidade de rebrota vegetativa, adaptando-se com sucesso a variabilidade ambiental e a altos níveis de nutrientes, o que justifica sua escolha como organismo-teste para avaliar a plasticidade morfológica e a resposta ao estresse em ecotoxicologia.

Salvinia auriculata Aubl. (Salviniaceae) é uma pteridófita aquática flutuante, caracterizada por rápida propagação vegetativa e ampla distribuição em ambientes tropicais de água doce (HENRY-SILVA; CAMARGO, 2006). Essa espécie flutuante responde rapidamente a aumentos de nutrientes nos ecossistemas aquáticos tropicais, apresentando crescimento vigoroso e formação de densa cobertura superficial (POTT; POTT, 2000). Isso está diretamente associado à concentração de nutrientes na água e no sedimento, conforme demonstrado em reservatórios tropicais,

como o Itaipu; tais condições favorecem sua proliferação e podem comprometer outros táxons aquáticos por limitação de luz e de espaço (BINI *et al.*, 1999). Além disso, sua fisiologia é sensível à variação de salinidade: a exposição ao estresse salino reduz o crescimento e a eficiência fotossintética, evidenciando que fatores abióticos, como sais dissolvidos, também modulam sua colonização e distribuição (BARUFI *et al.*, 2017).

2.3 CONCENTRAÇÃO DO DSS

O DSS é um surfactante aniônico amplamente utilizado, caracterizado por sua estrutura anfifílica e mobilidade ambiental, podendo atingir corpos d'água em concentrações de $\mu\text{g L}^{-1}$ a mg L^{-1} e alterar a permeabilidade celular de organismos aquáticos (SILVA, 2023). Seus efeitos sobre macrófitas variam de alterações no crescimento e na fotossíntese a reduções na produtividade (CRUZ DE CARVALHO *et al.*, 2022; LIU; WU, 2018).

As concentrações de dodecil sulfato de sódio utilizadas neste estudo foram adaptadas a partir de Wanderley *et al.* (2021), que testou a ação do DSS em *Egeria densa* e *Chara* sp, essas macrófitas apresentam porte e biomassa menores aos de *H. coronarium*, assim houve uma adaptação das concentrações de DSS utilizadas neste estudo, que considerou diferenças morfológicas e de hábito de crescimento entre as espécies. Portanto, as concentrações testadas foram ajustadas para abranger o maior porte e o hábito emergente de *H. coronarium*.

2.4 CONCENTRAÇÃO DA VINHAÇA

A vinhaça é o principal efluente da indústria sucroalcooleira, gerado na etapa de destilação do etanol de cana-de-açúcar, com produção estimada entre 10 e 15 L por litro de etanol produzido (MORAES *et al.*, 2015). Trata-se de um resíduo líquido ácido, com alta carga orgânica e mineral, elevados teores de potássio, sólidos dissolvidos e elevadas DQO e DBO, cuja composição varia conforme a matéria-prima e o processo industrial (ESPAÑA-GAMBOA *et al.*, 2011). Apesar de seu uso difundido na fertilização e irrigação, o manejo inadequado pode causar salinização, anoxia do solo, contaminação de águas superficiais e subterrâneas, além de emissão de gases associados ao seu catabolismo (MORÁN-SALAZAR *et al.*, 2016). Do ponto de vista ecotoxicológico, a vinhaça apresenta efeitos agudos e subletais em organismos aquáticos, como demonstrado em peixes expostos ao efluente, que exibiram

alterações histológicas e estresse fisiológico mesmo em diluições elevadas (CORREIA *et al.*, 2017).

Os valores de concentração foram adaptados do estudo de avaliação de vinhaça em organismos aquáticos de Silva *et al.* (2015); foram ajustados para o hábito emergente de *H. coronarium*. As soluções foram preparadas pela diluição da vinhaça em água coletada no reservatório, posteriormente homogeneizada com água destilada na proporção 2:6 (v/v).

2.5 MONTAGEM DE BIOENSAIOS E DESENHO EXPERIMENTAL

Para avaliar os efeitos do dodecil sulfato de sódio e da vinhaça no crescimento de *H. coronarium*, foram conduzidos dois experimentos em tempos distintos, ambos com duração de 4 meses. O experimento com o DSS teve início em março de 2024, e o experimento com a vinhaça, em setembro de 2024. Os bioensaios de crescimento foram realizados em condições controladas, utilizando fragmentos de rizomas de aproximadamente 5 centímetros, contendo gemas ativas, correspondentes ao início do brotamento. A utilização de rizomas na fase inicial de crescimento tem sido recomendada em experimentos com macrófitas aquáticas, por assegurar a homogeneidade entre unidades experimentais e viabilizar a observação de respostas iniciais ao estresse (ZOU *et al.*, 2024).

Os bioensaios foram preparados em recipientes de polipropileno transparente (volume total de 770 mL), contendo uma camada de 60 mL de solo hidromórfico coletado nas margens do reservatório do Monjolinho. O substrato foi previamente peneirado em malha de 2,0 mm (ASTM 10 mesh) para remover detritos grosseiros e padronizar a granulometria. Os recipientes foram alocados em câmara de germinação (modelo CL 286; Coldlab), mantidos a 25 ± 1 °C, valor próximo à temperatura média da água do reservatório (SANTOS *et al.*, 2011), sob fotoperíodo de 12 h claro/12 h escuro, com intensidade luminosa de aproximadamente $4,3 \times 10^3 \mu\text{mol s}^{-1} \text{cm}^{-2}$. A umidade foi monitorada continuamente por meio de um higrômetro digital e mantida entre 75 e 85%, faixa considerada adequada para experimentos com plantas emergentes (PENG *et al.*, 2021). A disposição dos recipientes seguiu o delineamento de randomização semanal da posição, para minimizar efeitos espaciais. A Figura 1 representa os bioensaios montados e com 2 meses de crescimento armazenados na incubadora, para o experimento de DSS. Na Figura 2 apresentam-se os bioensaios

montados e armazenados na incubadora, com crescimento de aproximadamente 2 meses no experimento de vinhaça.



Figura 1 - Bioensaios do experimento com DSS armazenados em incubadora. (Arquivo pessoal, 2024).



Figura 2 - Bioensaios do experimento com vinhaça armazenados em incubadora. (Arquivo pessoal, 2024).

2.5.1 Desenho experimental: experimento com DSS

A primeira coleta de indivíduos adultos na margem direita do reservatório do Monjolinho ocorreu em março de 2024 e após a separação dos rizomas, foram estabelecidos seis tratamentos experimentais, cada um com sete réplicas e com irrigação semanal diferenciada para cada tratamento: (i) controle, com irrigação de água do reservatório do Monjolinho; (ii) irrigação semanal de água do reservatório + biomassa seca de *S. auriculata* (5 g por recipiente adicionadas apenas uma vez, durante montagem dos bioensaios); (iii) irrigação com solução de DSS 0,5 g L⁻¹; (iv) irrigação com solução de DSS 0,5 g L⁻¹ + biomassa de *S. auriculata* (5 g por recipiente adicionadas apenas uma vez, na montagem dos bioensaios); (v) irrigação com

solução de DSS 1,0 g L⁻¹; e (vi) irrigação com solução de DSS 1,0 g L⁻¹ + biomassa de *S. auriculata* (5 g por recipiente adicionadas apenas uma vez, na montagem dos bioensaios); Tabela 1.

Tabela 1 - Representação do desenho amostral, dos tratamentos e das combinações para o experimento com DSS.

Tratamento	Água do reservatório	DSS (g L ⁻¹)	Biomassa seca de <i>S. auriculata</i> (g por recipiente)	N (réplicas)
(i) Controle	✓	–	–	7
(ii) Controle + <i>S. auriculata</i>	✓	–	5	7
(iii) DSS 0,5	✓	0,5	–	7
(iv) DSS 0,5 + <i>S. auriculata</i>	✓	0,5	5	7
(v) DSS 1,0	✓	1,0	–	7
(vi) DSS 1,0 + <i>S. auriculata</i>	✓	1,0	5	7

As soluções de DSS foram preparadas por meio da diluição do DSS em água coletada no reservatório do Monjolinho, posteriormente homogeneizada com água destilada na proporção de 2:6 (v/v), a fim de reduzir interferências físico-químicas sem descaracterizar a matriz ambiental. As aplicações do surfactante foram realizadas de forma controlada ao longo do experimento, e as concentrações finais adotadas (200 e 400 mg L⁻¹) correspondem ao valor acumulado de DSS adicionado ao sistema ao final do período experimental. Esses valores foram utilizados como referência para distinguir os tratamentos de menor e de maior concentração, permitindo a padronização da comparação dos efeitos do contaminante sobre o crescimento da invasora.

A biomassa de *S. auriculata* foi coletada no mesmo reservatório, lavada em água corrente para remoção de sedimentos e organismos perifíticos, e posteriormente seca em estufa de circulação forçada (60 °C) até massa constante. O material seco foi triturado e aplicados 5 g diretamente na superfície do solo de cada unidade experimental, simulando efeito de *mulching* orgânico (MAJEED *et al.*, 2025).

2.5.2 Desenho experimental: experimento com vinhaça

A segunda coleta de indivíduos adultos na margem direita do reservatório do Monjolinho ocorreu em setembro de 2024, e após a separação dos fragmentos dos rizomas, foram montados seis tratamentos experimentais, também com sete réplicas para cada tratamento: (i) controle com irrigação de água do reservatório do Monjolinho; (ii) água do reservatório + biomassa seca de *S. auriculata* (5 g por recipiente); (iii) Vinhaça 10%; (iv) vinhaça 10% + biomassa de *S. auriculata*; (v) vinhaça 20%; e (vi) vinhaça 20% + biomassa de *S. auriculata* como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Representação do desenho amostral, tratamentos e combinações para o experimento com vinhaça

Tratamento	Água do reservatório	Vinhaça (v.v.%)	Biomassa seca de <i>S. auriculata</i> (g por recipiente)	N (réplicas)
(i) Controle	✓	–	–	7
(ii) Controle + <i>Salvinia auriculata</i>	✓	–	5	7
(iii) Vinhaça 10%	✓	10%	–	7
(iv) Vinhaça 10% + <i>mulching Salvinia auriculata</i>	✓	10%	5	7
(v) Vinhaça 20%	✓	20%	–	7
(vi) Vinhaça 20% + <i>mulching Salvinia auriculata</i>	✓	20%	5	7

A vinhaça utilizada foi coletada em propriedade particular (coordenadas - 22.4772133, -48.7258656), em 2 períodos do ano (março e outubro de 2024), para avaliações preliminares e rega semanal dos bioensaios com suas respectivas soluções.

2.4 ANÁLISE DE DESCRITORES MORFOMÉTRICOS

O crescimento de *H. coronarium* foi monitorado semanalmente durante quatro meses, no experimento de DSS, de março a julho de 2024, e no experimento com a vinhaça, de setembro de 2024 a janeiro de 2025. Em cada unidade experimental foram aferidos comprimento total do pseudocaule, número de folhas e dimensões foliares (comprimento e largura). As medições de comprimento e largura, tanto do caule quanto das folhas, foram realizadas com escala milimétrica, com auxílio de fita métrica, e o número de folhas foi contabilizado. A área foliar foi estimada considerando o formato elíptico das folhas, com fator de correção de 0,7, conforme procedimento descrito por Schrader *et al.* (2021).

Os dados de crescimento (comprimento e largura) foram convertidos em valores de biomassa a partir dos valores de biomassa obtidos por conversão dos parâmetros morfométricos da coleta de exemplares adultos de *H. coronarium* na margem do reservatório do Monjolinho. Ao final do experimento, os indivíduos foram colhidos e obtida a biomassa seca de cada parte da macrófita após secagem em estufa a 60 °C até a massa constante. Os valores acumulados de biomassa seca (mg MS) foram ajustados ao modelo logístico (Equação 1), conforme descrito por Bianchini Júnior *et al.* (2015).

A parametrização dos modelos foi obtida por meio de regressões não lineares, estimadas pelo algoritmo iterativo de Levenberg–Marquardt, usualmente utilizado no ajuste de modelos não lineares (PRESS *et al.*, 1993). O tempo de duplicação da biomassa foi obtido pela relação logarítmica entre o coeficiente de crescimento específico (μ) e a constante $\ln 2$ (Equação 2).

$$\frac{dN}{dt} = \mu N \left(1 - \frac{N}{K}\right) \quad (\text{Equação 1})$$

em que: N = biomassa seca (mg MS), μ = coeficiente de crescimento (dia^{-1}), K = biomassa máxima projetada para *H. coronarium*, pré-estabelecida com base no valor médio de biomassa dos indivíduos coletados em banco monodominante da espécie (mg MS) e t = tempo (dia).

O tempo de duplicação (t_d) da biomassa foi calculado pela Equação 2 (MITCHELL, 1974).

$$t_d = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (\text{Equação 2})$$

em que: t_d = tempo de duplicação (dia).

Para testar a normalidade dos dados dos tratamentos de crescimento de *H. coronarium*, utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk. Como a normalidade não foi confirmada, aplicou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis e, posteriormente, o teste de comparação múltipla de Dunn. Um valor de $p < 0,05$ foi considerado estatisticamente significativo. No caso da normalidade ter sido confirmada, utilizaram-se o teste ANOVA com medidas repetidas e, para a comparação múltipla posterior, o teste de Tukey.

As amostras de solo e vinhaça utilizadas no segundo experimento foram submetidas a análise de laboratório de agricultura de precisão certificado para avaliar teor de macronutrientes, micronutrientes e metais-traço, além do pH; foram considerados valores para macronutrientes de N (Nitrogênio total), P_2O_5 (Fósforo total), K_2O (Potássio), Ca (Cálcio), Mg (Magnésio) e S (Enxofre), micronutrientes Boro (B) e metais-traço Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn). Para as amostras de solo coletadas na margem do reservatório do Monjolinho, com e sem a adição de biomassa seca de *S. auriculata*, foram avaliados atributos químicos, incluindo pH (em $CaCl_2$ e SMP), matéria orgânica, fósforo disponível, cátions trocáveis (K, Ca, Mg, Al e H), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e relações catiônicas (Ca/K, Ca/Mg e Mg/K). Além disso, foram determinados os teores de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) (TECHSOLO, 2025).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS DO EXPERIMENTO COM DSS

Na Figura 3 apresentam-se os crescimentos de *H. coronarium* nos diferentes tratamentos com dodecil sulfato de sódio (DSS). Os pontos correspondem às médias experimentais (\pm desvio padrão) e as linhas representam os ajustes cinéticos do modelo logístico. A proximidade entre os pontos observados e a curva ajustada indica a qualidade do modelo na descrição da dinâmica de crescimento (BIANCHINI JÚNIOR *et al.*, 2015; HOFFMANN; POORTER, 2002).

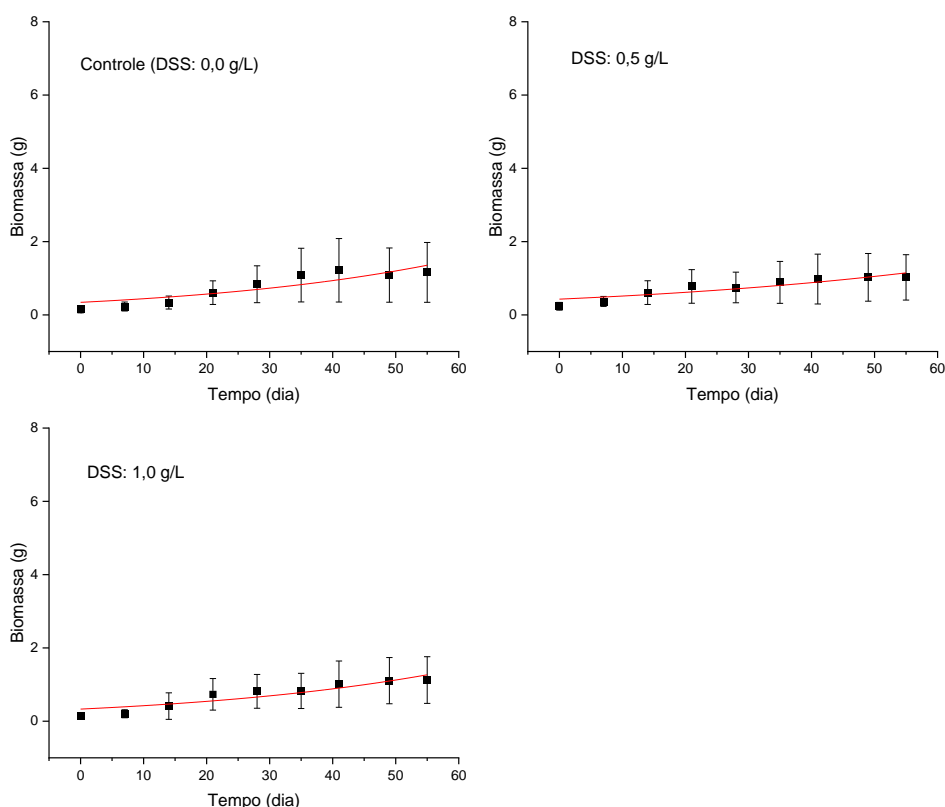


Figura 3 – Crescimento de *Hedychium coronarium* em meios com dodecil sulfato de sódio (DSS). Em que: os pontos correspondem à média (\pm desvio padrão) dos resultados experimentais e as linhas aos ajustes cinéticos do modelo (resultados teóricos).

No tratamento controle, verificou-se maior dispersão no crescimento entre 30 e 50 dias, sugerindo maior variabilidade entre as réplicas. Para o tratamento regado com solução de $0,5 \text{ g L}^{-1}$ de DSS, observou-se elevada aderência dos dados ao modelo, indicando que essa concentração permitiu descrever de forma consistente o crescimento da macrófita. Já na maior concentração (regada com solução de 1 g L^{-1} de DSS), a curva ajustada apresentou menor aderência, sugerindo que o estresse químico pode ter afetado de forma não linear.

A análise estatística das biomassas finais de *H. coronarium* sob exposição ao DSS não indicou diferenças significativas entre os tratamentos. As médias variaram de $0,7449 \text{ g}$ no controle, $0,7382 \text{ g}$ no tratamento com solução $0,5 \text{ g L}^{-1}$ e $0,7068 \text{ g}$ no tratamento com solução $1,0 \text{ g L}^{-1}$. Os testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov, D'Agostino-Pearson e Shapiro-Wilk) confirmaram a adequação dos dados à distribuição normal ($p > 0,10$ em todos os casos). O teste de ANOVA de medidas repetidas não revelou efeito significativo do fator tratamento ($F = 0,3792$; $r^2 = 0,04526$;

$p > 0,05$), e o teste *post-hoc* de Tukey corroborou a ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os pares de comparação (Controle \times $0,5 \text{ g L}^{-1}$: $p = 0,2040$; Controle \times $1,0 \text{ g L}^{-1}$: $p = 0,1154$; $0,5 \text{ g L}^{-1} \times 1,0 \text{ g L}^{-1}$: $p = 0,0949$).

Na Tabela 3, a seguir, apresentam-se os números de folhas contabilizados para cada tratamento e semana.

Tabela 3 - Número de folhas por tratamento para o experimento com DSS

Semana	DSS			DSS + <i>Salvinia auriculata</i>		
	CONTROLE	$0,5 \text{ g L}^{-1}$	1 g L^{-1}	CONTROLE	$0,5 \text{ g L}^{-1}$	1 g L^{-1}
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	5	0	4	0	0	0
5	8	8	7	0	0	3
6	13	8	13	0	2	3
7	13	10	17	0	5	3
8	14	10	17	0	5	3
9	15	10	18	0	6	3
10	13	11	19	0	6	3
11	12	7	18	0	9	3
12	12	9	17	0	9	3
13	13	9	10	0	10	3
14	13	9	9	0	10	3
15	8	10	6	0	11	5
16	5	8	0	0	11	3

Com relação aos parâmetros de crescimento selecionados, o tratamento controle apresentou o maior número médio de folhas, com 15 unidades na 9ª semana de cultivo. Já nas plantas expostas à maior concentração de DSS, o máximo observado foi de 19 folhas, com o aparecimento inicial na 4ª semana. No tratamento de menor concentração de DSS, o valor máximo foi de 11 folhas, registrado início de aparecimento na quarta semana do experimento.

A redução da aderência ao modelo em solução de $1,0 \text{ g L}^{-1}$ de DSS, associada à manutenção de taxas de crescimento próximas às do controle, sugere a ativação de mecanismos fisiológicos que conferem tolerância ao contaminante. Resultados semelhantes foram relatados em macrófitas submersas expostas a surfactantes aniônicos (WANDERLEY *et al.*, 2021).

A Tabela 4 mostra os dados dos parâmetros de crescimento para o experimento sob exposição a 0,5 g L⁻¹ e 1,0 g L⁻¹ de DSS e mesmas concentrações de DSS combinado a biomassa seca de *S. auriculata*.

Tabela 4 – Parâmetros do crescimento de *Hedychium coronarium* em condições controladas (fotoperíodo, intensidade luminosa e temperatura).

Tratamento	Concentração (mg L ⁻¹)	μ (d ⁻¹)	\pm Erro (d ⁻¹)	r ²	t _d (d)	td _{min} (d)	td _{max} (d)
DSS	0,0	0,026	0,006	0,80	27	22	35
	0,5	0,018	0,003	0,83	38	32	47
	1,0	0,025	0,005	0,85	28	23	34
<i>Mulching</i> + DSS	0,0	0,005	0,002	0,42	145	108	219
	0,5	0,014	0,002	0,84	50	44	58
	1,0	0,008	0,002	0,52	91	71	128

Legenda: μ = coeficiente de crescimento (dia⁻¹); \pm Erro = erro padrão associado à estimativa de μ ; r² = coeficiente de determinação do ajuste do modelo; t_d = tempo de duplicação da biomassa (dias); td_{min} = valor mínimo estimado do tempo de duplicação (dias); td_{max} = valor máximo estimado do tempo de duplicação (dias).

No tratamento controle, o coeficiente de crescimento (μ) foi 0,026 \pm 0,006 dia⁻¹ e o tempo médio de duplicação (t_d) de 27 dias (intervalo de 22–35 dias). Sob exposição a 0,5 g L⁻¹ de DSS, observou-se uma diminuição do coeficiente de crescimento para 0,018 \pm 0,003 dia⁻¹, resultando em um t_d mais elevado, de 38 dias (32–47 dias). Já no tratamento testado com solução de 1,0 g L⁻¹, o coeficiente de crescimento foi estimado em 0,025 \pm 0,005 dia⁻¹, com t_d médio de 28 dias (23–34 dias). Os coeficientes de determinação (r² = 0,80–0,85) indicam uma boa adequação do modelo logístico aos dados de crescimento. Já para os parâmetros de crescimento sob exposição ao DSS combinada à biomassa seca de *S. auriculata*, evidenciaram-se diferenças claras entre os tratamentos. Para o tratamento controle com biomassa de *S. auriculata*, o μ foi de 0,005 \pm 0,002 dia⁻¹, resultando em um t_d elevado, de 145 dias (108–219), e em um coeficiente de determinação (r²) baixo, de 0,42, indicando reduzida aderência do modelo. Na presença de solução de 0,5 g L⁻¹ de DSS associada à biomassa, houve aumento do coeficiente de crescimento para 0,014 \pm 0,002 dia⁻¹, com redução significativa do tempo de duplicação para 50 dias (44–58), além de maior aderência do modelo (r² = 0,84). No tratamento regado com solução de 1,0 g L⁻¹ de DSS e

biomassa, os valores de μ ($0,008 \pm 0,002 \text{ dia}^{-1}$) e t_d (91 dias; intervalo 71–128) foram intermediários, com $r^2 = 0,52$, evidenciando desempenho inferior ao observado em $0,5 \text{ g L}^{-1}$, mas ainda superior ao do controle.

A redução simultânea de μ no tratamento com $0,5 \text{ g L}^{-1}$ de DSS indica que concentrações intermediárias do surfactante afetaram negativamente o crescimento de *H. coronarium*, resultando em maior tempo de duplicação. Esse efeito sugere comprometimento de processos fisiológicos, possivelmente relacionados à permeabilidade de membranas e ao metabolismo energético, uma vez que surfactantes aniônicos como o DSS são conhecidos por alterar a integridade celular, interagindo com os lipídios de membrana, aumentando a permeabilidade celular e promovendo desequilíbrios iônicos, o que eleva o custo energético para manutenção da homeostase e reduz a alocação de energia para o crescimento vegetal (CRUZ de CARVALHO *et al.*, 2022).

No tratamento de maior concentração ($1,0 \text{ g L}^{-1}$), o coeficiente de crescimento se aproximou do valor do controle, indicando uma resposta não linear da espécie ao gradiente de estresse químico. Esse padrão pode refletir a ativação de mecanismos de tolerância ou de aclimatação fisiológica em condições de maior intensidade de contaminante, conforme já relatado em macrófitas expostas a poluentes (BLANCK, 2002). A plasticidade fenotípica observada em *H. coronarium* é compatível com seu comportamento invasor, permitindo a manutenção de taxas de crescimento elevadas mesmo em ambientes impactados (PASTORE *et al.*, 2012).

Na Figura 4 são apresentados os crescimentos de *H. coronarium* nos diferentes tratamentos, combinando DSS com a adição de biomassa seca de *S. auriculata* (*mulching*). Os pontos representam as médias experimentais (\pm desvio padrão), enquanto as linhas correspondem aos ajustes cinéticos obtidos pelo modelo logístico. No tratamento controle, a variação observada foi relativamente estável e bem explicada pelo modelo, indicando um padrão de crescimento equilibrado. Já nos tratamentos com DSS + biomassa de *S. auriculata*, os dados apresentaram maior dispersão em relação à curva ajustada (HOFFMANN; POORTER, 2002; BIANCHINI JÚNIOR *et al.*, 2015).

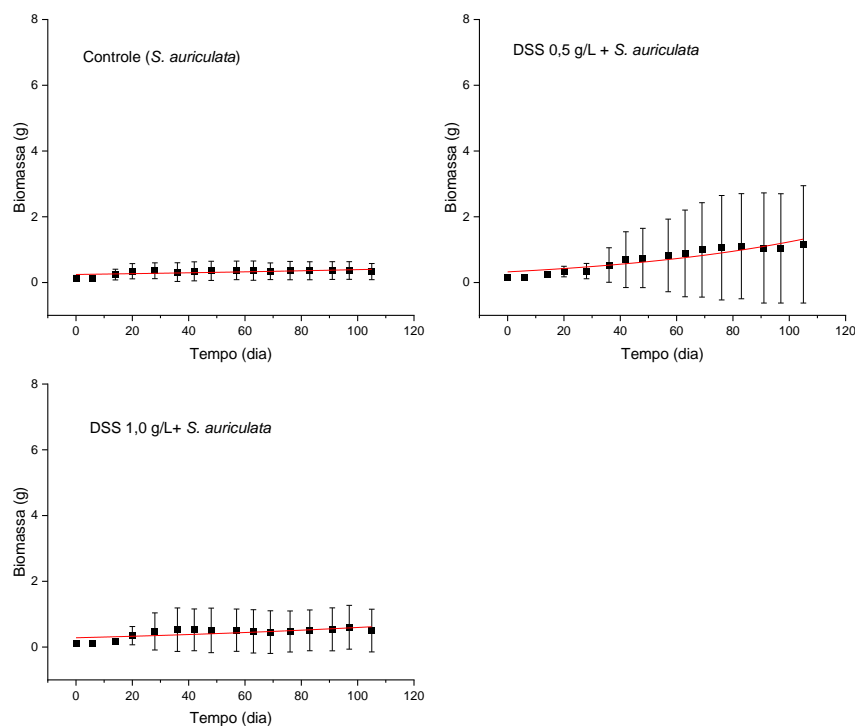


Figura 4 - Crescimento de *Hedychium coronarium* em meios com dodecil sulfato de sódio (DSS) e biomassa seca de *Salvinia auriculata*. Em que: os pontos correspondem à média (\pm desvio padrão) dos resultados experimentais e as linhas aos ajustes cinéticos do modelo (resultados teóricos).

A análise estatística das biomassas de *H. coronarium* nos tratamentos com DSS e de biomassa seca de *S. auriculata* evidenciou diferenças significativas apenas entre o controle com 5 g de biomassa seca e o tratamento DSS 0,5 g L⁻¹ + 5 g de biomassa (Kruskal-Wallis, $H = 11,51$; $p = 0,0032$). O teste de *Dunn* indicou aumento significativo da biomassa no tratamento com a menor concentração de DSS associado à biomassa de *S. auriculata* em comparação ao controle ($p = 0,01$), enquanto não foram detectadas diferenças entre o controle e a maior concentração de DSS ($p > 0,05$) e entre as duas concentrações de DSS ($p > 0,05$). A média de biomassa observada no tratamento DSS 0,5 g L⁻¹ + 5 g de biomassa (0,7055 g) foi mais do que o dobro do valor obtido no controle (0,3154 g), sugerindo um possível efeito de estímulo associado à combinação do surfactante em baixa concentração com o aporte de nutrientes provenientes da biomassa seca de *S. auriculata*. Esse padrão é compatível com respostas horméticas já descritas em macrófitas expostas a contaminantes, nas quais concentrações subletais de poluentes podem estimular o crescimento antes da manifestação de efeitos inibitórios. Resultados semelhantes

foram observados em *Lemma minor* (GREEN et al., 2023) e em *Salvinia auriculata* (YOSHIDA, 2024) quando expostas a agentes estressores.

Ao avaliar a interação entre o DSS e a biomassa seca de *S. auriculata*, verificou-se que a presença da biomassa influenciou significativamente a dinâmica de crescimento de *H. coronarium*. Em concentrações mais baixas de DSS, a combinação com a biomassa resultou em maior variação e maior acúmulo de biomassa da espécie invasora, indicando uma resposta hormética (CALABRESE; BALDWIN, 2002). Esse padrão caracteriza-se pelo estímulo do crescimento em doses intermediárias de estressores, conforme amplamente relatado em estudos com plantas expostas a contaminantes (AGATHOKLEOUS et al., 2019). Por outro lado, nas maiores concentrações de DSS, o crescimento de *H. coronarium* permaneceu baixo, mesmo na presença de biomassa seca, quando comparado à menor concentração; no entanto, foi maior do que o do grupo controle, sugerindo limitação fisiológica da espécie diante da toxicidade elevada. Essa redução no desempenho pode estar associada à perda de eficiência fotossintética e à alteração da integridade das membranas celulares (CRUZ de CARVALHO et al., 2022). Tais resultados reforçam a interpretação de que a presença de biomassa de *S. auriculata* pode atuar como moduladora ecológica, atenuando parcialmente os efeitos do DSS em concentrações intermediárias, mas não impedindo o impacto negativo em concentrações mais elevadas.

Com relação aos parâmetros de crescimento analisados, como mostra a Tabela 3, o tratamento controle combinado a *S. auriculata* não apresentou crescimento foliar durante o período de cultivo, o que pode evidenciar perda de vigor dos rizomas escolhidos para este tratamento, o que não sustentou o crescimento foliar. Já nos indivíduos expostos a solução de 0,5 g L⁻¹ combinados a biomassa seca de *S. auriculata* (5 g), o máximo observado foi de 11 folhas, com aparecimento inicial de folhas na 6^a semana. Nos bioensaios expostos a solução de DSS 1,0 g L⁻¹ combinados a biomassa seca de *S. auriculata* (5 g), o valor máximo foi de 5 folhas, registrado início de aparecimento na quinta semana do experimento.

Dessa forma, a análise cinética evidenciou que *H. coronarium* respondeu de forma diferenciada à interação entre DSS e *S. auriculata*, assim, baixas concentrações do surfactante, em conjunto com a biomassa, estimulam o crescimento da espécie (resposta hormética), enquanto maiores concentrações mantêm o efeito inibitório. Esse comportamento ressalta a plasticidade da macrófita invasora diante de

estressores químicos e a relevância do uso de biomassa de macrófitas como ferramenta potencial para modular a biodisponibilidade de contaminantes em ambientes aquáticos antropizados.

Na interação entre DSS e *mulching*, o resultado mais expressivo foi observado na concentração de $0,5 \text{ g L}^{-1}$, na qual o aumento de μ e a consequente redução do t_d sugerem um estímulo ao crescimento em baixa concentração de surfactante, caracterizando um padrão compatível com resposta hormética (CALABRESE; BALDWIN, 2002). Essa resposta pode indicar que a presença simultânea de DSS em nível moderado e a biomassa de *S. auriculata* criaram condições favoráveis ao crescimento da espécie. A maior concentração de DSS ($1,0 \text{ g L}^{-1}$) resultou em valores de crescimento intermediários, sugerindo que o estresse químico em níveis elevados se sobrepõe ao possível efeito benéfico da biomassa.

3.2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO COM VINHAÇA

3.2.1 RESULTADOS ANÁLISES DE SOLO E DA VINHAÇA

As características químicas da vinhaça são apresentadas na Tabela 5 (TECHSOLO, 2025). Os exames foram realizados em laboratório de análises agrícolas que utiliza métodos analíticos padronizados (Anexos 1 e 2) amplamente empregados em análises de solo e de efluentes, conforme protocolos técnicos de referência.

A análise da vinhaça diluída a 20% indicou meio ácido (5,6), padrão típico desse tipo de efluente, cuja acidez pode alterar a disponibilidade de nutrientes e metais (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013). Os teores de N ($0,30 \text{ g L}^{-1}$) e de P_2O_5 ($0,15 \text{ g L}^{-1}$) ficaram próximos aos valores descritos para vinhaças brasileiras, mas o K_2O ($0,20 \text{ g L}^{-1}$) esteve abaixo dos patamares normalmente reportados ($>10 \text{ g L}^{-1}$ em vinhaça bruta), o que se justifica pela diluição aplicada (FUESS; GARCIA, 2014). Entre os micronutrientes, destacaram-se B ($9,76 \text{ mg L}^{-1}$) e Zn ($48,8 \text{ mg L}^{-1}$), cujas concentrações, mesmo após a diluição, permaneceram acima dos valores recomendados para uso agrícola, podendo exercer efeitos fitotóxicos em organismos aquáticos (CETESB, 2008). Além disso, os níveis de Fe ($9,1 \text{ mg L}^{-1}$) e Mn ($11,5 \text{ mg L}^{-1}$), embora reduzidos pela diluição, ainda representam risco de estresse oxidativo, como relatado em bioensaios com macrófitas (*Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* e *Salvinia auriculata*) expostas à vinhaça (BRITO *et al.*, 2024).

Tabela 5 - Valores das análises de parâmetros da vinhaça em solução 20%

Parâmetro	Valor (20% solução)	Interpretação
pH	5,60	Acidez moderada, típica da vinhaça; pode influenciar a solubilidade de nutrientes e metais
N (g L ⁻¹)	0,30	Baixo teor em relação à vinhaça bruta; ainda contribui para a carga orgânica e eutrofização
P ₂ O ₅ (g L ⁻¹)	0,15	Nível compatível com literatura; fósforo pode estimular crescimento de algas/macrófitas em ambientes aquáticos
K ₂ O (g L ⁻¹)	0,20	-
Ca (g L ⁻¹)	0,10	-
Mg (g L ⁻¹)	0,10	-
S (g L ⁻¹)	0,18	Contribui para maior condutividade elétrica; excesso pode afetar a microbiota.
B (mg L ⁻¹)	9,76	Acima do limite recomendado para irrigação (<2 mg L ⁻¹); risco de fitotoxicidade.
Cu (mg L ⁻¹)	0,20	-
Fe (mg L ⁻¹)	9,10	-
Mn (mg L ⁻¹)	11,50	Acima do relatado em algumas vinhaças, concentrações elevadas podem gerar toxicidade.
Zn (mg L ⁻¹)	48,80	Muito acima da faixa típica (1–15 mg L ⁻¹)

Valores obtidos por meio de análises por ensaios laboratoriais (TECHSOLO, 2025).

Os resultados indicam que, mesmo diluída em 20%, a vinhaça possui potencial de causar impactos ambientais, combinando aporte nutricional e risco tóxico dependendo da dose e do tempo de exposição. Com relação às análises laboratoriais das características físico-químicas do solo utilizado no experimento, os dados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados de análise físico-química de solo coletados na margem do reservatório do Monjolinho (solo e solo + *mulching* de *Salvinia auriculata*)

Parâmetro	Solo	Solo + <i>mulching</i> de <i>S. auriculata</i>	Δ (diferença)	Comentários
pH (CaCl ₂)	4,36	4,76	+0,40	Redução da acidez ativa.
Al ³⁺ (mmolc/dm ³)	6,49	2,36	-4,13	-
H ⁺ +Al (mmolc/dm ³)	72,02	49,86	-22,16	Redução da acidez potencial.
MO (g dm ⁻³)	34,6	40,4	+5,8	Incremento da matéria orgânica → maior CTC.
P-resina (mg dm ⁻³)	8,9	16,5	+7,6	Maior disponibilidade de fósforo.
K (mmolc dm ⁻³)	1,89	9,96	+8,07	Enriquecimento em K proveniente da biomassa.
Ca (mmolc dm ⁻³)	13,58	36,13	+22,55	Aumento de cátions básicos (liberação da biomassa).
Mg (mmolc dm ⁻³)	4,9	14,03	+9,13	Aumento associado à mineralização.
SB (mmolc dm ⁻³)	20,37	60,12	+39,75	Aumento da soma de bases trocáveis.
CTC (mmolc dm ⁻³)	92,39	109,98	+17,59	Aumento da capacidade de troca catiônica.
V% (saturação por bases)	22,05	54,66	+32,61	Melhora da fertilidade química.
m% (saturação por Al)	24,16	3,78	-20,38	Redução.
Zn (mg dm ⁻³)	1,7	3,9	+2,2	Elevação de micronutrientes disponíveis.
Mn (mg dm ⁻³)	7,6	31,4	+23,8	Aumento considerável; deve ser monitorado devido ao risco de excesso.

Valores obtidos por meio de análises por ensaios laboratoriais (TECHSOLO, 2025).

A incorporação de biomassa de *S. auriculata* elevou o pH de 4,36 para 4,76 e o pH (SMP) de 5,49 para 5,84, indicando menor acidez potencial. O método SMP é amplamente empregado para estimar a dose de corretivos, e aumentos nesse índice refletem menor acidez trocável após a adição de resíduos orgânicos (RAIJ *et al.*, 2001; CQFS-RS/SC, 2016). Houve redução de Al trocável (de 6,49 para 2,36 mmolc dm⁻³) e de m% (de 24,16 para 3,78%), acompanhada da queda de H⁺+Al (de 72,02 para

49,86 mmolc dm⁻³). Esse padrão é consistente com o efeito de resíduos orgânicos em solos ácidos, nos quais compostos húmicos e ácidos orgânicos liberados na decomposição complexam Al³⁺, atenuando sua fitotoxicidade e aumentando a disponibilidade de fósforo por meio da competição nos sítios de adsorção (HAYNES; MOKOLOBATE, 2001; SOUZA *et al.*, 2006).

A matéria orgânica aumentou de 34,6 para 40,4 g dm⁻³ e a CTC total passou de 92,39 para 109,98 mmolc dm⁻³, acompanhada por incremento da soma de bases (SB) de 20,37 para 60,12 mmolc dm⁻³ e da saturação por bases (V%) (de 22,05 para 54,66%). Em solos tropicais de carga variável, a matéria orgânica desempenha papel central na CTC e na retenção de nutrientes, o que explica o aumento da fertilidade química com a adição de biomassa (EMBRAPA, 2014; CAPUANI, 2016).

Nos macronutrientes, houve praticamente o dobro do P-resina, ou fósforo disponível para as plantas no solo (8,9 → 16,5 mg dm⁻³), o P-resina se refere ao fósforo disponível no solo que foi extraído utilizando resina catiônica para a análise (SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2009), e aumentos expressivos de K (1,89 → 9,96 mmolc dm⁻³), Ca (13,58 para 36,13) e Mg (4,9 para 14,03). O ganho de P disponível corrobora estudos que mostram que resíduos orgânicos reduzem a fixação de fósforo em solos ácidos, devido à competição de ânions orgânicos pelos sítios de adsorção e à mineralização do P orgânico (PAVINATO *et al.*, 2008; SOUZA *et al.*, 2006). Já o aumento de cátions básicos está associado tanto à liberação de nutrientes acumulados pela biomassa de macrófitas aquáticas quanto ao efeito corretivo indireto da adição de resíduos (PETRUCIO; ESTEVES, 2000; PASTORE *et al.*, 2012).

Em síntese, o tratamento solo + *mulching* de *S. auriculata* melhorou a fertilidade química: aumento do pH, MO, CTC e V%, redução da acidez e do Al trocável, além do enriquecimento em P e cátions básicos. Esses resultados reforçam que a biomassa de macrófitas pode atuar como condicionador de solos ácidos, reduzindo o estresse químico e aumentando a disponibilidade de nutrientes, embora o teor elevado de K exija atenção ao equilíbrio com Mg (HAYNES; MOKOLOBATE, 2001).

3.2.2 ANÁLISES DOS BIOENSAIOS EXPERIMENTO COM VINHAÇA

Na Figura 5 apresentam-se os resultados e ajustes cinéticos do crescimento de *H. coronarium* em ambientes com influência de vinhaça, nas duas concentrações (10% e 20%).

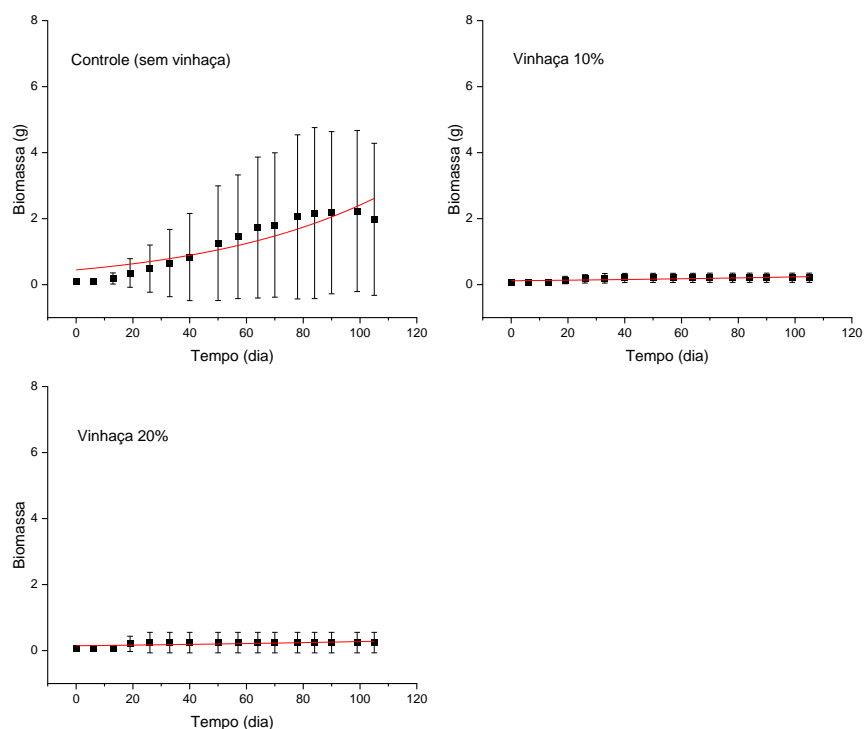


Figura 5 - Crescimento de *Hedychium coronarium* em meios com vinhaça. Em que: os pontos correspondem à média (\pm desvio padrão) dos resultados experimentais e as linhas aos ajustes cinéticos do modelo (resultados teóricos).

Observa-se que o modelo logístico selecionado explicou adequadamente os dados, com boa aderência entre os valores experimentais e teóricos no tratamento controle ($r^2 = 0,84$). No tratamento controle, o crescimento foi expressivo a partir de aproximadamente 30 dias, embora acompanhado de elevada variabilidade entre as repetições. Os tratamentos com vinhaça (10% e 20%), obtiveram o crescimento reduzido, com baixa variabilidade entre as repetições e proporção menor explicada pelo modelo ($r^2=0,57$ e $r^2=0,44$, respectivamente). Estudos prévios demonstraram que a aplicação de vinhaça pode reduzir a germinação e o desenvolvimento de espécies vegetais, devido ao aumento da condutividade elétrica e à toxicidade de micronutrientes, como Mn e Zn (ESPAÑA-GAMBOA *et al.*, 2011; BRITO *et al.*, 2024). Dessa forma, os resultados indicam que, enquanto o controle favoreceu o crescimento e a manutenção da biomassa, a presença de vinhaça comprometeu o desempenho da macrófita, sugerindo um efeito deletério desse efluente, mesmo em concentrações

diluídas. A Figura 6 apresenta as curvas de crescimento de *H. coronarium* em tratamentos com vinhaça associados à presença de biomassa seca de *S. auriculata* utilizada como *mulching*.

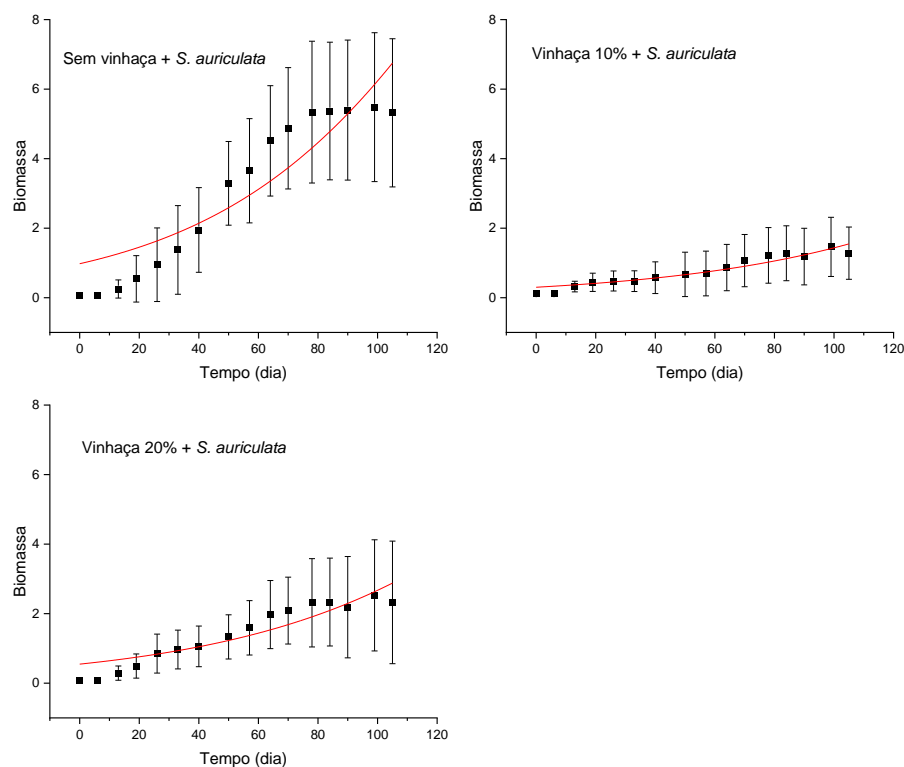


Figura 6 - Crescimento de *Hedychium coronarium* em meios com vinhaça e biomassa seca de *Salvinia auriculata*. Em que: os pontos correspondem à média (\pm desvio padrão) dos resultados experimentais e as linhas aos ajustes cinéticos do modelo (resultados teóricos).

Os dados experimentais mostraram boa aderência ao modelo cinético ajustado, confirmando a adequação do ajuste para descrever a dinâmica de crescimento nos três tratamentos, evidenciada pelo alto valor do coeficiente de determinação (r^2). O tratamento controle, combinado ao *mulching*, apresentou r^2 de 0,84; o tratamento submetido à rega com solução de 10% de vinhaça, associada ao *mulching*, obteve r^2 de 0,91; já o tratamento de vinhaça 20%, associada ao *mulching*, apresentou r^2 de 0,85. No tratamento controle com biomassa de *S. auriculata*, observou-se elevada variabilidade entre repetições, mas também maiores valores de biomassa acumulada, alcançando até aproximadamente 8 g. Esse comportamento pode ser atribuído à liberação de nutrientes durante a decomposição da biomassa de *S. auriculata*, que funciona como condicionador orgânico, aumentando a disponibilidade de P, K, Ca e Mg no substrato (PETRUCIO; ESTEVES, 2000; HAYNES; MOKOLOBATE, 2001).

Nos tratamentos com vinhaça combinada ao *mulching*, os valores de biomassa foram inferiores aos do controle, mas superiores aos observados nos ensaios com vinhaça apenas. A biomassa variou de 0–2,5 g para vinhaça a 10% e de 0–4 g para vinhaça a 20%. Esses resultados sugerem que a biomassa seca de *S. auriculata* atenuou o estresse químico da vinhaça. Esse efeito pode estar associado à capacidade de macrófitas aquáticas acumularem e distribuírem nutrientes, contribuindo para o enriquecimento do substrato, além da possível ação do *mulching* como filtro capaz de adsorver elementos e reduzir a biodisponibilidade de compostos potencialmente tóxicos presentes na vinhaça (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013; FUESS; GARCIA, 2014).

A Tabela 7 apresenta os resultados dos parâmetros cinéticos de crescimento da macrófita com efeito da vinhaça.

Tabela 7 – Parâmetros do crescimento de *Hedychium coronarium* em condições controladas (fotoperíodo, intensidade luminosa e temperatura).

Tratamento	(%)	μ (d ⁻¹)	\pm Erro (d ⁻¹)	r ²	t _d (d)	td _{min} (d)	td _{max} (d)
Vinhaça	0,0	0,018	0,003	0,84	39	34	46
	10,0	0,007	0,002	0,57	100	79	134
	20,0	0,006	0,002	0,44	110	82	165
<i>mulching</i> + Vinhaça	0,0	0,021	0,003	0,84	33	29	39
	10,0	0,016	0,002	0,91	43	39	48
	20,0	0,017	0,002	0,85	42	37	48

Legenda: μ = coeficiente de crescimento (dia⁻¹); \pm Erro = erro padrão associado à estimativa de μ ; r² = coeficiente de determinação do ajuste do modelo; t_d = tempo de duplicação da biomassa (dias); td_{min} = valor mínimo estimado do tempo de duplicação (dias); td_{max} = valor máximo estimado do tempo de duplicação (dias).

Os parâmetros de crescimento obtidos para *H. coronarium* evidenciam o efeito inibitório da vinhaça sobre o crescimento da macrófita. No tratamento controle (0%), o coeficiente de crescimento ($\mu = 0,018 \text{ dia}^{-1}$) e o tempo de duplicação (t_d = 39 dias) indicaram desempenho superior em relação aos tratamentos com vinhaça, confirmando o potencial de crescimento da espécie em ambientes sem estresse

químico. Já nos tratamentos com 10% e 20% de vinhaça, houve queda acentuada do μ (0,007 e 0,006 dia^{-1} , respectivamente) e prolongamento do t_d (100 e 110 dias), acompanhado da redução dos coeficientes de determinação (r^2). Quando comparados, os tratamentos de 20% e 10% de vinhaça sugerem maior variabilidade na resposta das plantas.

A diminuição do coeficiente de crescimento pode ser explicada pelo efeito combinado da acidez e da elevada carga de sais e metais presentes na vinhaça, que elevam a condutividade elétrica do substrato e comprometem processos fisiológicos fundamentais, como a absorção de nutrientes e a atividade fotossintética (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013; FUESS; GARCIA, 2014). Resultados semelhantes foram relatados por Brito *et al.* (2024), que observaram inibição significativa em macrófitas flutuantes expostas à vinhaça bruta, e por España-Gamboa *et al.* (2011), que destacam a salinização e o acúmulo de micronutrientes como principais fatores limitantes ao desenvolvimento vegetal.

Os dados reforçam que a vinhaça, mesmo diluída, pode comprometer o desempenho de *H. coronarium*, aumentando o tempo necessário para a duplicação da biomassa e reduzindo a previsibilidade do crescimento, o que se alinha às evidências da literatura sobre os riscos desse efluente em ecossistemas aquáticos.

Os parâmetros de crescimento de *H. coronarium* na presença de biomassa seca de *S. auriculata* revelaram desempenho superior em comparação com os ensaios realizados apenas com vinhaça. No tratamento controle (0%), o coeficiente de crescimento específico ($\mu = 0,021 \text{ d}^{-1}$) foi o mais elevado, com tempo de duplicação ($t_d = 33$ dias) reduzido, o que confirma condições favoráveis de crescimento. Nos tratamentos com vinhaça a 10% e 20%, observou-se redução discreta da taxa de crescimento ($\mu = 0,016\text{--}0,017 \text{ dia}^{-1}$) e aumento moderado do t_d (42–43 dias), sem comprometer significativamente o ajuste do modelo ($r^2 > 0,85$). Esses resultados indicam que a biomassa de *S. auriculata* atenuou os efeitos negativos da vinhaça, promovendo maior estabilidade no crescimento da macrófita. Tal comportamento pode estar relacionado à liberação de nutrientes (N, P, K, Ca e Mg) durante a decomposição da biomassa, que melhora a fertilidade do substrato e a disponibilidade de fósforo (PETRUCIO; ESTEVES, 2000; PAVINATO *et al.*, 2008). Além disso, resíduos orgânicos atuam na complexação de íons tóxicos, como Al^{3+} e metais pesados, reduzindo sua biodisponibilidade e os efeitos de salinização da vinhaça

(HAYNES; MOKOLOBATE, 2001). Assim, a presença de *S. auriculata* atuou como um modulador positivo, permitindo que *H. coronarium* mantivesse o crescimento.

A Tabela 8, a seguir, apresenta o número de folhas de cada tratamento do experimento com vinhaça no período observado.

Tabela 8 - Número de folhas por tratamento para o experimento com vinhaça.

Semana	vinhaça			vinhaça + <i>Salvinia auriculata</i>		
	CONTROLE	10%	20%	CONTROLE	10%	20%
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	4	0	0	8	0	0
6	8	0	0	9	0	2
7	10	0	0	11	3	2
8	17	0	0	32	4	5
9	20	0	0	32	4	9
10	22	0	0	37	5	11
11	22	0	0	38	8	15
12	25	0	0	42	15	17
13	29	0	0	44	16	21
14	29	0	0	39	17	22
15	30	0	0	36	19	23
16	31	0	0	18	17	24

No experimento sem *mulching*, o tratamento controle alcançou um máximo de 31 folhas na 16ª semana, enquanto os tratamentos com vinhaça (10% e 20%) não apresentaram emissão foliar ao longo do período. Na presença de biomassa seca de *S. auriculata*, o controle atingiu 44 folhas na 13ª semana; o tratamento com vinhaça a 10% chegou a 19 folhas na 15ª semana; e o tratamento com 20% alcançou 24 folhas na 16ª semana. Esses resultados indicam que a presença do *mulching* favoreceu a emissão foliar em todos os tratamentos e que, entre as doses testadas, a maior concentração de vinhaça resultou em maior número de folhas do que a menor.

A análise estatística das biomassas de *H. coronarium* expostas à vinhaça indicou um efeito significativo. O tratamento controle apresentou média de 1,221 g e mediana de 1,352 g para a biomassa acumulada, enquanto os tratamentos com 10% e 20% de vinhaça apresentaram médias de 0,1717 g e 0,2053 g, respectivamente. Os

testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov, D'Agostino-Pearson e Shapiro-Wilk) demonstraram que os dados dos tratamentos com vinhaça não seguiram distribuição normal ($p < 0,0001$), ao passo que o controle apresentou ajuste aceitável em parte dos testes ($p = 0,0392$ no Shapiro-Wilk). O teste de Kruskal-Wallis confirmou diferenças significativas entre os grupos ($H = 19,38$; $p < 0,0001$). As comparações múltiplas de Dunn revelaram que o controle diferiu significativamente tanto do tratamento com 10% de vinhaça ($p < 0,001$) quanto do tratamento com 20% ($p < 0,05$), mas não houve diferença entre as duas concentrações de vinhaça ($p > 0,05$). Esses resultados demonstram que a exposição à vinhaça compromete o crescimento da espécie. Quando avaliada a interação entre vinhaça e a biomassa seca de *S. auriculata*, resultou em alterações significativas no crescimento. O tratamento controle com biomassa apresentou média de 3,027 g, valor substancialmente superior às médias obtidas nos tratamentos com vinhaça a 10% (0,764 g) e a 20% (1,404 g). O teste de Kruskal-Wallis indicou diferenças significativas entre os grupos ($H = 8,175$; $p = 0,0168$). O teste de Dunn indicou diferença significativa apenas entre o controle e o tratamento com 10% de vinhaça ($p < 0,05$). Para 20%, não houve diferença em relação ao controle nem ao 10% ($p > 0,05$), indicando redução de crescimento em ambos os tratamentos com vinhaça, com efeito significativo apenas na menor concentração.

Embora não tenha sido realizada análise estatística entre os experimentos, a comparação descritiva das médias de biomassa mostra que nos tratamentos sem *S. auriculata*, os valores foram de 0,172 g (10%) e 0,205 g (20%), enquanto na presença do *mulching* (5 g) as médias aumentaram para 0,764 g (10%) e 1,404 g (20%). Isso sugere que a biomassa seca de *S. auriculata* favoreceu um maior acúmulo de biomassa de *H. coronarium* em ambas as concentrações.

A baixa biomassa registrada em vinhaça de 10% pode estar relacionada à elevada disponibilidade de micronutrientes tóxicos, como Zn e B (TECHSOLO, 2025), que, em concentrações moderadas, já excedem os limites de tolerância de muitas espécies aquáticas (CAMARGO *et al.*, 2005; USEPA, 2005). Por sua vez, o aumento da biomassa acumulada de *H. coronarium* na presença de *mulching* pode ser explicado pelo aumento da fertilidade química do solo decorrente da biomassa seca de *S. auriculata*.

A análise da vinhaça 20% evidenciou concentrações elevadas de micronutrientes, em especial boro ($9,76 \text{ mg L}^{-1}$) e zinco ($48,80 \text{ mg L}^{-1}$). Esses valores superam os intervalos comumente reportados para vinhaça *in natura*, nos quais o boro

varia entre 0,1 e 1,5 mg L⁻¹ e o zinco é geralmente detectado em níveis inferiores a 5 mg L⁻¹ (CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013; FUESS; GARCIA, 2014). Embora ambos sejam elementos essenciais ao metabolismo vegetal, em altas concentrações, esses e outros elementos podem apresentar efeito fitotóxico, provocando distúrbios fisiológicos e inibindo o crescimento. Dessa forma, os teores observados sugerem que a vinhaça utilizada no bioensaio pode ter contribuído para o estresse químico em *H. coronarium*, reforçando a importância de considerar a variabilidade composicional desse resíduo em estudos de impacto ecológico e de crescimento populacional de macrófita invasora.

3.3 COMPARAÇÕES DE COEFICIENTES DE CRESCIMENTO DOS EXPERIMENTOS

A Figura 7 apresenta as variações dos coeficientes de crescimento relativo ($\mu/\mu_{\text{controle}}$) de *H. coronarium* em função dos tratamentos com vinhaça e com vinhaça associada à biomassa seca de *S. auriculata*, DSS e DSS associado à biomassa seca de *S. auriculata*.

Nos bioensaios apenas com vinhaça, observou-se redução expressiva no crescimento já a partir da concentração de 10%, com valores de μ inferiores a 0,5 em relação ao controle, e manutenção dessa tendência em 20%, evidenciando um efeito inibitório da vinhaça sobre a espécie. Em contraste, nos tratamentos que incluíram a biomassa seca de *S. auriculata*, os valores da relação $\mu/\mu_{\text{controle}}$ se mantiveram próximos a 1 em todas as condições, indicando que a presença do *mulching* atenuou o efeito negativo da vinhaça. Essa resposta sugere que a biomassa de *S. auriculata* pode ter atuado como moduladora do estresse, seja pelo aporte adicional de nutrientes, seja pela capacidade de adsorção de compostos presentes na vinhaça, resultando em manutenção das taxas de crescimento de *H. coronarium*. O princípio de utilizar biomassa seca de macrófitas aquáticas como material adsorvente já foi documentado para outros tipos de estressores, como metais pesados. Schneider *et al.* (2024) demonstraram o potencial de diferentes espécies para a remoção de metais pesados de soluções aquosas, destacando o papel dos grupos funcionais da parede celular na adsorção desses contaminantes.

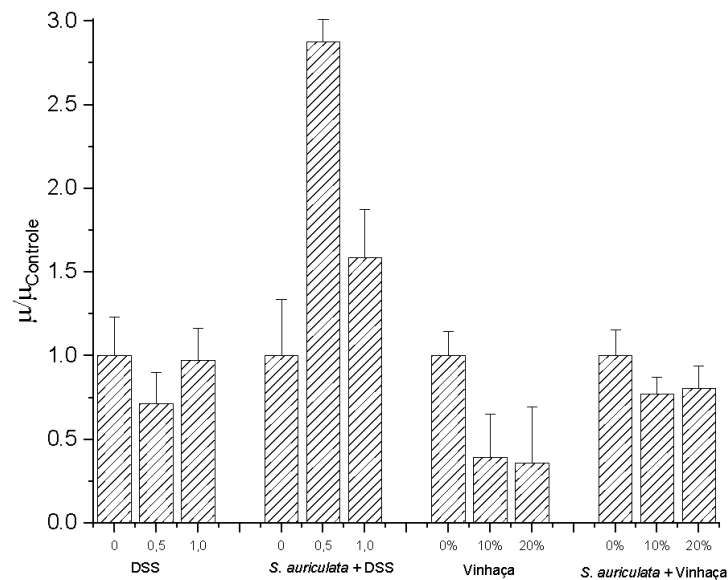


Figura 7 – Variações dos valores dos coeficientes de crescimento (μ) em função dos valores de referência (μ das culturas controle) e das diferentes condições experimentais.

Nos bioensaios com DSS, tanto na concentração de $0,5 \text{ g L}^{-1}$ quanto na de $1,0 \text{ g L}^{-1}$, não foram observadas diferenças relevantes em relação ao controle, com valores próximos de 1, indicando a manutenção das taxas de crescimento. Em contraste, nos tratamentos que associaram DSS à biomassa seca de *S. auriculata* os resultados foram distintos. A combinação com $0,5 \text{ g L}^{-1}$ de DSS promoveu um aumento expressivo no coeficiente de crescimento ($\mu/\mu_{\text{control}} \approx 3$), o que representa um estímulo significativo em comparação com o controle com *S. auriculata* e com o DSS isolado. Já na maior concentração ($1,0 \text{ g L}^{-1}$), o efeito positivo foi menos pronunciado, embora ainda superior ao do controle. Esses resultados sugerem que a presença de biomassa seca de *S. auriculata* pode ter atuado como moduladora das respostas de *H. coronarium*, fornecendo nutrientes adicionais ou atuando como filtro parcial do estressor químico, resultando em uma resposta hormética no tratamento com menor concentração de DSS, mas com redução desse efeito em níveis mais altos do contaminante.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação entre os experimentos revelou que, com DSS isolado, *H. coronarium* foi mais sensível à solução de 0,5 g L⁻¹, enquanto, em 1,0 g L⁻¹, apresentou aclimatação, com parâmetros próximos ao controle, mas sem diferenças significativas de biomassas entre os tratamentos. Na presença de biomassa (seca) de *S. auriculata*, 0,5 g L⁻¹ promoveu estímulo ao crescimento, com diferenças significativas na biomassa, caracterizando resposta hormética, enquanto, em 1,0 g L⁻¹, o estresse químico prevaleceu, limitando o efeito mitigador da biomassa. Com a combinação de surfactante e de biomassa seca de *S. auriculata*, houve alterações nos parâmetros de crescimento e no acúmulo de biomassa, evidenciando que a resposta da macrófita invasora depende da interação entre o agente estressor químico e a matéria orgânica do ambiente. Esses resultados sugerem que, em ambientes aquáticos impactados, a presença de resíduos vegetais pode alterar a resposta fisiológica da macrófita, dependendo da concentração do CE. Em doses mais baixas, a presença deste CE pode favorecer o crescimento de macrófitas invasoras no ambiente. A hipótese de que o dodecil sulfato de sódio (DSS) reduziria ou inibiria significativamente o crescimento de *H. coronarium*, em termos de biomassa, não foi corroborada, possivelmente devido à plasticidade morfofisiológica da espécie e à sua tolerância a estresses químicos. Por outro lado, a hipótese de que o *mulching* de *S. auriculata* atenuaria os efeitos do contaminante emergente foi parcialmente confirmada, pois esse efeito foi observado apenas na menor concentração de DSS testada. Essa resposta pode estar associada à liberação inicial de nutrientes pela biomassa seca ou a mecanismos físico-químicos de retenção e interação do surfactante com o substrato orgânico, especialmente nas fases iniciais do experimento, resultando em uma resposta compatível com o padrão hormético observado para a macrófita invasora. Os resultados demonstram que a interação entre surfactantes aniônicos e matéria orgânica vegetal pode modificar a dinâmica de crescimento de macrófitas invasoras em ambientes aquáticos impactados, ressaltando a importância de considerar o DSS e compostos semelhantes em estratégias de monitoramento e gestão ambiental voltadas à mitigação de alterações estruturais e funcionais dos ecossistemas aquáticos.

A vinhaça, nas concentrações testadas (10% e 20%), reduziu significativamente o crescimento de *H. coronarium*, evidenciando seu papel como agente estressor químico. Embora não tenham sido observadas diferenças

significativas entre as duas concentrações, os efeitos de inibição no crescimento e no aparecimento de folhas confirmaram a sensibilidade da macrófita ao resíduo agroindustrial. A adição de biomassa seca de *S. auriculata*, por meio de *mulching*, atuou como fator modulador do crescimento, atenuando os impactos da vinhaça, especialmente no tratamento de 20%. As análises físico-químicas confirmaram a elevada carga orgânica e mineral da vinhaça, com destaque para potássio, zinco e boro, elementos capazes de alterar a dinâmica dos solos e a resposta das plantas a esses componentes. Os resultados evidenciam que a vinhaça exerce função como fonte de nutrientes, mas ao mesmo tempo funcionou como estressor químico para a *H. coronarium*, prejudicando seu crescimento, evidenciando o que a vinhaça pode atuar como contaminante em solos, além disso, mostrou um potencial do resíduo vegetal da *S. auriculata* como estratégia complementar de manejo ambiental na aplicação da vinhaça em substratos úmidos. Estudos de uso de *mulching* podem considerar a matéria orgânica da *S. auriculata* como composto auxiliar ou, em estudos de adaptação de materiais combinados aos componentes do *mulching* da *S. auriculata*, em estratégias de manejo da aplicação de vinhaça em solos, reduzindo possíveis efeitos fitotóxicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGATHOKLEOUS, E.; MITSUTOSHI, K.; CALABRESE, E. J. Hormesis: a compelling platform for sophisticated plant science. **Trends in Plant Science**, v. 24, n. 4, p. 318–327, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.01.004>.

BARUFI, J. B.; CARVALHO, V. F.; SCHERNER, F.; XAVIER, L. R. C. C.; MOURA-JÚNIOR, E. G.; COSTA, M. M. S.; HSIE, B. S.; ARAÚJO, M. K. C.; ALVES, M. C. J.; MELO, G. M.; REAL, N. C.; BURGOS, D. C.; DIAS, A. L. F.; ARRUDA-QUEIRÓZ, P. C.; PEREIRA, S. M. B. Effects of salinity on the physiology of *Salvinia auriculata* Aubl. (Salvinales, Pteridophyta). **Biotemas**, v. 30, n. 3, p. 25–36, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5007/2175-7925.2017v30n3p25>.

BELLINI, G.; BECKER, F. G. Riparian degradation, stream position in watershed, and proximity to towns facilitate invasion by *Hedychium coronarium*. **Aquatic Invasions**, v. 16, n. 1, p. 11-27, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3391/ai.2021.16.1.02>.

BIANCHINI JR., I.; CUNHA-SANTINO, M. B.; MILAN, J. A. M.; RODRIGUES, C. J.; DIAS, J. H. P. Model parameterization for the growth of three submerged aquatic macrophytes. **Journal of Aquatic Plant Management**, v. 53, p. 64–73, 2015.

BINI, L. M.; THOMAZ, S. M.; MURPHY, K. J.; CAMARGO, A. F. M. Aquatic macrophyte distribution in relation to water and sediment conditions in the Itaipu Reservoir, Brazil.

Hydrobiologia, v. 415, p. 147-154, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1003856629837>.

BLANCK, H. A critical review of procedures and approaches used for assessing pollution-induced community tolerance (PICT) in biotic communities. **Human and Ecological Risk Assessment**, v. 8, p. 1003-1034, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1080/1080-700291905792>.

BRITO, L. F. P.; ESPÍNDOLA, E. L. G.; OGURA, A. P. Tolerance of free-floating aquatic macrophytes to raw vinasse diluted in water. **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**, v. 14, n. 4, p. 325–331, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2166/washdev.2024.240>.

BROWN, J. H.; GILLOOLY, J. F.; ALLEN, A. P.; SAVAGE, V. M.; WEST, G. B. Toward a metabolic theory of ecology. **Ecology**, v. 85, n. 7, p. 1771–1789, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1890/03-9000>.

CALABRESE, E. J.; BALDWIN, L. A. Defining hormesis. **Human & Experimental Toxicology**, v. 21, n. 2, p. 91–97, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1191/0960327102ht217oa>.

CAMARGO, J. A.; ALONSO, Á.; SALAMANCA, A. Nitrate toxicity to aquatic animals: a review with new data for freshwater invertebrates. **Chemosphere**, v. 58, n. 9, p. 1255–1267, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.044>.

CAPUANI, S. **Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e resíduos orgânicos**. 2016. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2016. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/11449/181217/3/capuani_s_dr_botfca.pdf. Acesso em: dez. 2024.

CASTRO, W. A. C.; ALMEIDA, R. V.; XAVIER, R. O.; ARDUIN, M.; MOYA, H. M.; MATOS, D. M. S. Response of rhizomes of the invasive *Hedychium coronarium* J. König (Zingiberaceae) to different soil moisture conditions. **Acta Botanica Brasilica**, v. 35, p. 122–125, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-33062020abb0343>.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma Técnica P4.231**: vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. São Paulo: CETESB, 2015. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2024/09/Norma-Tecnica-Cetesb-P4.231-Vinhaca-Criterios-e-procedimentos-para-aplicacao-no-solo-agricola.pdf>. Acesso em: mai. 2025.

CETESB. **Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 2008.

CHRISTOFOLETTI, C. A.; ESCHER, J. P.; CORREIA, J. F. U. M.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, n. 12, p. 2752–2761, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>.

CORREIA, J. E.; CHRISTOFOLETTI, C. A.; MARCATO, A. C. C.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Histopathological analysis of tilapia gills (*Oreochromis niloticus*) exposed to sugarcane vinasse. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 135, p. 319–326, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.10.004>.

CQFS-RS/SC - COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. [S. l.]: SBCS – Núcleo Regional Sul, 2016. Disponível em: https://www.sbc-s-nrs.org.br/docs/Manual_de_Calagem_e_Adubacao_para_os_Estados_do_RS_e_de_SC-2016.pdf. Acesso em: maio 2025.

CRUZ DE CARVALHO, R.; FEIJÃO, E.; MATOS, A. R.; CABRITA, M. T.; UTKIN, A. B.; NOVAIS, S. C.; LEMOS, M. F. L.; CAÇADOR, I.; MARQUES, J. C.; REIS-SANTOS, P. Ecotoxicological effects of the anionic surfactant sodium dodecyl sulfate (sds) in two marine primary producers: *Phaeodactylum tricornutum* and *Ulva lactuca*. **Toxics**, v. 10, n. 12, art.780, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics10120780>.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/330496/1/Manual-de-analises-quimicas-de-solos-plantas-e-fertilizantes-ed02-reimpressao-2014.pdf>. Acesso em: ago. 2025.

ESPAÑA-GAMBOA, E.; MIJANGOS-CORTES, J.; BARAHONA-PEREZ, L.; DOMINGUEZ-MALDONADO, J.; HERNÁNDEZ-ZÁRATE, G.; ALZATE-GAVIRIA, L. Vinasses: characterization and treatments. **Waste Management & Research**, v. 29, n. 12, p. 1235–1250, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X10387313>.

FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. Implications of stillage land disposal: A critical review on the impacts of fertirrigation. **Journal of Environmental Management**, v. 145, n. 1, p. 210–229, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.003>.

GREEN, D. S.; BOOTS, B.; OLAH-KOVACS, B.; PALMA-DIOGO, D. Disposable e cigarettes and cigarette butts alter the physiology of an aquatic plant *Lemna minor* (Lemnaceae). **Science of The Total Environment**, v. 892, art. 164457, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164457>.

HAYNES, R. J.; MOKOLOBATE, M. S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 59, p. 47–63, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009823600950>.

HENRY-SILVA, G. G.; CAMARGO, A. F. M. Efficiency of aquatic macrophytes to treat Nile tilapia pond effluents. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 5, p. 433-438, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000500003>.

HOFFMANN, W. A.; POORTER, H. Avoiding bias in calculations of relative growth rate. **Annals of Botany**, v. 90, n. 1, p. 37–42, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcf140>.

HUNT, R. **Plant growth curves: the functional approach to plant growth analysis**. London: Edward Arnold, 1982.

LIU, N.; WU, Z. Growth and antioxidant response in *Ceratophyllum demersum* L. under sodium dodecyl sulfate (SDS), phenol and joint stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 163, p. 188-195, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.074>.

MAJEED, L. R.; SHARMA, D.; RAUTELA, K. S. S.; KUMAR, M. Sustainable agriculture, aquaculture and phytoremediation through freshwater macrophytes: a comprehensive review of mineral uptake, soil health, and water quality dynamics. **Discover Water**, v. 5, art. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00188-5>.

MITCHELL, D. S. **Aquatic vegetation and its use and control**. Paris: UNESCO, 1974.

MONDAL, B.; ADAK, A.; DATTA, P. Degradation of anionic surfactant in municipal wastewater by UV-H₂O₂: process optimization using response surface methodology. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 375, p. 237–243, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.02.030>.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888–903, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.023>.

MORAN-SALAZAR, R. G.; SANCHEZ-LIZARRAGA, A. L.; RODRIGUEZ-CAMPOS, J.; DÁVILA-VAZQUEZ, G.; MARINO-MARMOLEJO, E. N.; DENDOOVEN, L.; CONTRERAS-RAMOS, S. M. Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives. **SpringerPlus**, v. 5, p. 1007, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2410-3>.

NGUYEN, H. M.; PHAN, C. M.; SEN, T. Degradation of sodium dodecyl sulphate by photoelectrochemical and electrochemical processes. **Chemical Engineering Journal**, v. 287, p. 633-639, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.074>.

PASTORE, M.; RODRIGUES, R. S.; SIMÃO-BIANCHINI, R.; FILGUEIRAS, T. S. **Guia de Campo: Plantas exóticas invasoras na Reserva Biológica do Alto da Serra de Paranapiacaba, Santo André - SP**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2012.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Organic compounds from plants and their effect on P availability in soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 10, p. 1379–1388, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001000017>.

PENG, X.; YANG, Y.; YAN, X.; LI, H. The effects of water control on the survival and growth of *Alternanthera philoxeroides* in the vegetative reproduction and seedling stages. **Scientific Reports**, v. 11, art. 13556, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92674-2>.

PETRUCIO, M. M.; ESTEVES, F. A. Uptake rates of nitrogen and phosphorus in the water by *Eichhornia crassipes* and *Salvinia auriculata*. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 60, n. 2, p. 229–236, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-71082000000200006>.

POTT, V. J.; POTT, A. **Plantas aquáticas do Pantanal**. 1. ed. Corumbá: EMBRAPA, 2000.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical Recipes in C: the art of scientific computing**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (eds.). **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 2001. Disponível em: https://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/Raij_et_al_2001_Metod_Anal_IAC.pdf. Acesso: mai. 2025.

SANTOS, M. G.; CUNHA-SANTINO, M. B.; BIANCHINI JR, I. Alterações espaciais e temporais de variáveis limnológicas do reservatório do Monjolinho (campus da UFSCar). **Oecologia Australis**, v. 15, n. 3, p. 682–696, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4257/oeco.2011.1503.18>.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Fósforo disponível determinado por lâmina de resina enterrada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 77-84, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100008>.

SCHNEIDER, S. C.; COETZEE, J. A.; GALVANESE, E. F.; HARPENSLAGER, S. F.; HILT, S.; IMMERZEEL, B.; KOHLER, J.; MISTELI, B.; MOTITSOE, S. N.; PADIAL, A. A.; PETRUZZELLA, A.; SCHECHNER, A.; THIÉBAUT, G.; THIEMER, K.; VERMAAT, J. E. Causes of macrophyte mass development and management recommendations. **Science of the Total Environment**, v. 931, 172960, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172960>.

SCHRADER, J.; SHI, P.; ROYER, D. L.; PEPPE, D. J.; GALLAGHER, R. V.; LI, Y.; WANG, R.; WRIGHT, I. J. Leaf size estimation based on leaf length, width and shape. **Annals of Botany**, v. 128, n. 4, p. 395–406, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcab078>.

SILVA, L. G.; VERAS, S. T. S.; NOGUEIRA, E. M. M.; BROCHADO, R. P. S.; MARINHO, I. C.; FREITAS, D. M. S.; MOTTERAN, F.; PAULO, P. L.; KATO, M. T. Nota Técnica 4 - Surfactantes em esgoto sanitário e no meio ambiente: presença, remoção e toxicidade. **Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 3, p. 37–51, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5327/276455760304004>.

SILVA, D. F.; CARRASCHI, S. P.; GÍRIO, A. C. F.; NETO, A. N.; CRUZ, C.; PITELLI, R. A. Ecotoxicidade da vinhaça para o peixe mato grosso (*Hyphessobrycon eques*) e para a macrófita lentilha d'água (*Lemna minor*). Boletim do Instituto de Pesca, São Paulo, v. 41, n. 3, p. 557–565, 2015.

SOUZA, R. F. de; FAQUIN, V.; TORRES, P. R. F.; BALIZA, D. P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 6, p. 975–983, nov./dez. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600007>.

TECHSOLO. **Agricultura de Precisão**. Lençóis Paulista, SP. 2025.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Aquatic Life Ambient Freshwater Quality Criteria – Zinc**. Washington, DC: EPA, 2005.

VIANA, S. M. **Riqueza e distribuição de macrófitas aquáticas no rio Monjolinho e tributários (São Carlos, SP) e análise de sua relação com variáveis físicas e químicas**. 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

WANDERLEY, E. L.; BIANCHINI, I.; CUNHA-SANTINO, M. B. Surfactant and temperature as forcing functions on the growth of *Egeria densa* and *Chara* sp.: a modeling approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 26145–26153, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12456-1>.

YOSHIDA, L. L. **Efeitos adversos de lixiviados de bitucas e filtros de cigarros no crescimento de uma macrófita flutuante**. 2024. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2024.

ZOU, M.; LIN, X.-W.; WU, X.-D.; QIN, Y.; GE, X.-G.; HOU, J.-J.; LI, X.-X.; PENG, S. Regeneration and colonization abilities of invasive and native Myriophyllum species under different fragment types and lengths. **Journal of Plant Ecology**, v. 17, n. 6, rtae085, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/jpe/rtae085>.

CONCLUSÕES GERAIS

A presente pesquisa buscou integrar análises relacionadas ao crescimento da macrófita invasora *Hedychium coronarium* em diferentes condições de estresse químico, com ênfase em contaminante emergente (dodecil sulfato de sódio – DSS) e resíduo agroindustrial (vinhaça). De forma geral, os resultados indicam que o dodecil sulfato de sódio e a vinhaça exercem pressão sobre a espécie invasora, cujas respostas de crescimento podem variar em função da concentração dos contaminantes e da interação com a biomassa seca de *Salvinia auriculata*. Os resultados obtidos evidenciam a necessidade de integrar estudos ecológicos e estressores químicos para considerar os impactos das invasões biológicas em ecossistemas aquáticos continentais.

Com isso, este estudo colocou em destaque algumas perspectivas de manejo que devem ser consideradas para a conservação dos corpos hídricos, como (i) o aperfeiçoamento de tratamentos de efluentes urbanos, considerando dodecil sulfato de sódio, e resíduos e/ou efluentes agroindustriais, considerando a vinhaça; (ii) o uso de biomassa de macrófitas como matéria prima complementar em estratégias de biorremediação; (iii) a restauração de vegetação ciliar nativa para reduzir a dominância de invasoras; e (iv) o monitoramento contínuo de resíduos agroindustriais como a vinhaça, especialmente em áreas de transição urbano-rural. Essas ações, combinadas a políticas públicas de controle de poluentes e de manejo de espécies invasoras, contribuem para a conservação da qualidade da água, a manutenção da biodiversidade e a sustentabilidade dos usos múltiplos em ecossistemas aquáticos e ripários.

Anexo 1: Tabela de métodos das análises de parâmetros da vinhaça em solução 20%: Manual de Métodos Analíticos Oficiais de Fertilizantes, corretivos, substratos, condicionadores e remineralizadores de solo - MAPA (2023).

Parâmetro analisado	Método analítico
N	Extrator: Liga de Raney, Leitura: Destilação método de <i>Kjeldahl</i> .
P ₂ O ₅	Extrator: Solúvel em H ₂ O, Leitura: Espectrofotômetro UV/Visível.
K ₂ O	Extrator: Solúvel em H ₂ O, Leitura: fotometria de chama.
Ca	Extrator: Solúvel em H ₂ O, Leitura: Espectrofotômetro de Absorção Atômica.
Mg	Extrator: Solúvel em H ₂ O, Leitura: Espectrofotômetro de Absorção Atômica.
S	Extrator: Solúvel em H ₂ O, Leitura: Espectrofotômetro UV/Visível.
B	Extrator: Solúvel em H ₂ O, Leitura: Espectrofotômetro UV/Visível.
Cu	Extrator: Solúvel em H ₂ O, Leitura: Espectrofotômetro de Absorção Atômica.
Fe	Extrator: Solúvel em H ₂ O, Leitura: Espectrofotômetro de Absorção Atômica.
Mn	Extrator: Solúvel em H ₂ O, Leitura: Espectrofotômetro de Absorção Atômica.
Zn	Extrator: Solúvel em H ₂ O, Leitura: Espectrofotômetro de Absorção Atômica.
pH	Extrator: CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹ , Leitura: pHmetro.

Fonte: *TechSolo* Agricultura de Precisão (2025).

Anexo 2: Tabela de métodos de análise físico-química de solo coletadas na margem do reservatório do Monjolinho (solo e solo + *mulching* de *Salvinia auriculata*: Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais Instituto Agrônômico (IAC) (2001).

Parâmetro analisado	Método analítico
pH CaCl ₂	Extrator: CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹ , Leitura: pHmetro.
H+Al	Extrator: Solução Tampão SMP em pH=7,0, Leitura: pHmetro.
P	Extrator: Resina trocadoras de íons e NH ₄ Cl 0,8 mol L ⁻¹ em HCl 0,2 mol L ⁻¹ , Leitura: Espectrofotômetro UV/Visível.
Ca	Extrator: Resina trocadoras de íons e NH ₄ Cl 0,8 mol L ⁻¹ em HCl 0,2 mol L ⁻¹ , Leitura: Espectrofotômetro de Absorção Atômica.
Mg	Extrator: Resina trocadoras de íons e NH ₄ Cl 0,8 mol L ⁻¹ em HCl 0,2 mol L ⁻¹ , Leitura: Espectrofotômetro de Absorção Atômica.
K	Extrator: Resina trocadoras de íons e NH ₄ Cl 0,8 mol L ⁻¹ em HCl 0,2 mol L ⁻¹ , Leitura: Espectrofotômetro de Absorção Atômica.
Na	Extrator: NH ₄ Cl 1 mol L ⁻¹ , Leitura: Espectrofotômetro de Absorção Atômica.
S	Extrator: Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 0,01 mol L ⁻¹ , Leitura: Espectrofotômetro UV/Visível.
Al	Extrator: KCl 1 mol L ⁻¹ , Leitura: Bureta Digital.
M.O.	Extrator: Dicromato de Sódio 0,667 mol L ⁻¹ em Ácido Sulfúrico 5 mol L ⁻¹ , Leitura: Espectrofotômetro UV/Visível.
B	Extrator: Cloreto de Bário 1,25 g.L-1, Leitura: Espectrofotômetro UV/Visível.
Micro	Extrator: Solução DTPA a pH 7,30, Leitura: Espectrofotômetro de Absorção Atômica.

Fonte: *TechSolo* Agricultura de Precisão (2025).