



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Departamento de Ciências Ambientais
CURSO DE BACHARELADO EM GESTÃO E ANÁLISE AMBIENTAL
Rod. Washington Luís, Km. 235 – Cx. Postal. 676
CEP: 13565-905 – São Carlos – SP – Fone: (016) 3351-9776



AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE *EGERIA DENSA* PLANCH. SUBMETIDOS A DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ÓLEO DIESEL

Alana Moraes Scardovelli

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
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS
CURSO DE BACHARELADO EM GESTÃO E ANÁLISE AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE *EGERIA DENSA PLANCH.* SUBMETIDOS A
DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ÓLEO DIESEL**

Alana Moraes Scardovelli

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Gestão e Análise Ambiental.

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

**SÃO CARLOS-SP
2025**

**AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE *EGERIA Densa PLANCH.* SUBMETIDOS A
DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ÓLEO DIESEL**

ALANA MORAES SCARDOVELLI

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 20 de fevereiro de 2025 ao Departamento de Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Gestão e Análise Ambiental.

.....

Prof^a Dr^a Marcela Bianchessi da Cunha Santino

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta monografia representa para mim o encerramento de um grande ciclo em minha vida acadêmica, derivado do aprendizado e dos esforços coletivos de todos que me auxiliaram nessa jornada. Desse modo, venho expressar minha gratidão a todos que de certa forma me ajudaram nesse processo.

A minha mãe, Fátima de Oliveira Moraes, que sempre esteve comigo me apoiando em todos os passos de minha trajetória. Me oferecendo amor e apoio para superar os momentos difíceis.

Aos meus amigos que compartilharam comigo alegrias e desafios, estando sempre dispostos a me oferecerem palavras e gestos de apoio, deixando minha caminhada mais leve.

Aos meus familiares por todo o incentivo durante esse processo. Me auxiliando a manter o foco e a determinação necessárias para chegar até o final.

A minha orientadora Prof.^a Dr.^a Marcela, por toda a sua paciência e tato para me auxiliar em todas as etapas desse trabalho, mesmo quando tudo parecia dar errado. Seu conhecimento, paciência e incentivo foram fundamentais para o aprimoramento de minhas habilidades e para o andamento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Irineu Bianchini Jr., por todo o apoio e pelas ideias fundamentais para a elaboração deste trabalho. Além do grande auxílio na interpretação estatística dos dados. Agradeço muito pelo auxílio mesmo nesse momento de dificuldade, espero que se recupere o mais rápido possível.

Aos colegas de laboratório, pela partilha de conhecimento e apoio durante esse período. Tornando os desafios da pesquisa mais estimulantes e deixando o ambiente de trabalho mais agradável.

A todos Departamento de Gestão de Áreas Verdes, Biodiversidade e Agro ambientes (DeGABA) e a FAI, que mesmo não participando diretamente desse processo, me auxiliaram financeiramente por meio do meu estágio e me apoiaram em muitas etapas da graduação com as amizades que fiz lá.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização dessa monografia, deixo meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

O petróleo é uma substância composta por hidrocarbonetos, sendo o óleo diesel um exemplo de derivado de petróleo amplamente utilizado. O óleo diesel pode atingir ambientes naturais e causar impactos negativos, como alterações nos padrões de germinação e crescimento de algumas espécies de plantas. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes concentrações de óleo diesel S10 no crescimento da macrófita aquática submersa *Egeria densa* Planch. Popularmente conhecida como elodea. A hipótese deste estudo é que *E. densa*, quando exposta ao óleo diesel S10, terá seu crescimento afetado, o que resultará na diminuição de seus coeficientes de crescimento. Fragmentos de *E. densa* foram plantados em copos plásticos de polipropileno, contendo substrato de fixação e recobertos por cascalho. Para cada tratamento, sete fragmentos foram distribuídos aleatoriamente nos bioensaios. Após esse período, soluções de óleo diesel S10 nas concentrações de 0,5% (v/v), 2% (v/v) e 4% (v/v) foram adicionadas aos bioensaios, formando os tratamentos T0,5, T2 e T4, respectivamente. A avaliação do crescimento foi realizada semanalmente durante oito semanas. O crescimento de *E. densa* foi significativamente diferente do controle nos tratamentos T2 ($p < 0,05$) e T4 ($p < 0,001$). A presença de óleo diesel S10 alterou os parâmetros de crescimento a partir da 7^a semana, com alterações severas no crescimento, especialmente nos tratamentos T2 e T4, tornando as condições desses ambientes desfavoráveis ao crescimento das plantas, o que resultou em clorose e morte das macrófitas. Os resultados sugerem a ocorrência de efeitos crônicos na fisiologia das plantas ou efeitos indiretos causados pela modificação das condições prevalentes de crescimento.

Palavras-chave: macrófita; modelagem matemática; crescimento; bioensaio; contaminante.

ABSTRACT

Petroleum is a substance composed of hydrocarbons, with diesel oil being a widely used example. Diesel oil can reach natural environments and cause negative impacts, such as changes in germination and growth patterns of some plant species. In this context, this study aimed to evaluate the effect of different concentrations of diesel oil S10 on the growth of a submerged aquatic macrophyte (*Egeria densa*), popularly known as Elodea. This study hypothesizes that *E. densa*, when exposed to diesel oil S10, will have its growth affected, resulting in a decrease in its growth coefficients. Fragments of *E. densa* were planted in polypropylene plastic cups containing attachment substrate and covered with gravel. For each treatment, seven fragments were randomly distributed in the bioassays. After this period, solutions of diesel oil S10 at concentrations of 0.5% (v/v), 2% (v/v), and 4% (v/v) were added to the bioassays, forming treatments T0.5, T2, and T4, respectively. Growth evaluation was performed weekly for eight weeks. The growth of *E. densa* in treatments T2 ($p < 0.05$) and T4 ($p < 0.001$) was significantly different from the control. The presence of diesel oil S10 altered the growth parameters from the 7th week onwards, with severe changes in growth, especially in treatments T2 and T4, making these environments unfavorable for plant growth, resulting in chlorosis and macrophytes death. The results suggest chronic effects on plant physiology or indirect effects caused by modification of the prevailing growth conditions.

Keywords: macrophyte; mathematical modeling; growth; bioassay; contaminant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos de hidrocarbonetos policondensados presentes no diesel (Godoi, 2022)	12
Figura 2: Localização do ponto de coleta de substrato para fixação da <i>Egeria densa</i>	16
Figura 3: Procedimentos realizados durante o experimento crescimento de <i>Egeria densa</i> submetidas à três concentrações de óleo diesel S10: (1) Fragmentos cortados; (2) Plantio em vasos de polipropileno; (3) Bioensaios de crescimento; (4) Condições de incubação: luminosidade; (5) Determinação gravimetria da biomassa final dos fragmentos e (6) Secagem.....	17
Figura 4: Boxplot das variações dos comprimentos de <i>Egeria densa</i> nos distintos tratamentos: controle (TC); 0,5% de óleo diesel S10 (T0,5); 2% de óleo diesel S10 (T2) e 4% de óleo diesel S10 (T4)	19
Figura 5: Número médio de brotos e tempo inicial da emergência dos brotos em cada tratamento: controle (TC); 0,5% de óleo diesel S10 (T0,5); 2% de óleo diesel S10 (T2) e 4% de óleo diesel S10 (T4)	20
Figura 6: Variação temporal do comprimento dos fragmentos de <i>Egeria densa</i> crescendo em distintas concentrações de óleo diesel S10 (T0,5; T2 e T4) e na ausência de óleo diesel S10 (TC).....	20
Figura 7: Biomassa seca de <i>Egeria densa</i> (70º dia experimental) em cada tratamento: controle (TC); 0,5% de óleo diesel S10 (T0,5); 2% de óleo diesel S10 (T2) e 4% de óleo diesel S10 (T4)	22
Figura 8: Hastes de <i>Egeria densa</i> após serem desplantadas no último dia experimental (70º dia experimental): controle (TC); 0,5% de óleo diesel S10 (T0,5); 2% de óleo diesel S10 (T2) e 4% de óleo diesel S10 (T4)	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros do crescimento de <i>Egeria densa</i> em meios com diferentes concentrações de óleo diesel S10.....	21
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 PETRÓLEO E DERIVADOS.....	11
3.2 MACRÓFITAS AQUÁTICAS EM AMBIENTES IMPACTOS COM DERIVADOS DE PETRÓLEO.....	13
4. METODOLOGIA.....	14
4.1. DESCRIÇÃO DA ESPÉCIE UTILIZADA.....	14
4.2. MONTAGEM DOS EXPERIMENTOS DE CRESCIMENTO.....	15
4.2.1. Descrição do substrato de fixação de <i>Egeria densa</i>	15
4.2.2. Descrição do agente contaminante.....	15
4.2.3. Delineamento experimental: parâmetros de incubação dos tratamentos.....	16
4.2.5. Modelagem matemática e tratamento dos dados.....	17
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	18
6. CONCLUSÕES.....	24
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, uma vasta gama de compostos químicos tem sido identificada nos compartimentos ambientais. Algumas dessas substâncias são denominadas contaminantes emergentes, que se referem a substâncias oriundas dos modos de produção e consumo atuais, passíveis de contaminar os compartimentos ambientais (Montagner et al., 2017; Tordin, 2018). Entre esses contaminantes, os derivados de petróleo podem representar uma fonte de contaminação nos compartimentos ambientais onde se encontram (Pal & Sen, 2023). Se destacando devido a sua ampla utilização comercial (Godoi, 2022).

A contaminação por petróleo e seus derivados pode ocorrer de diversas formas, tais como acidentes de transporte e vazamentos em tanques de abastecimento subterrâneos (Halmemies et al., 2003). Nesse contexto, um exemplo de derivado de petróleo é o óleo diesel, utilizado predominantemente como combustível em motores de combustão interna e ignição por pressão, comuns em geradores de energia, veículos ferroviários, rodoviários e marítimos (ANP, 2024). Sua elevada demanda no Brasil se deve ao fato de que, entre 1995 e 2005, o transporte rodoviário representou 58% do total de cargas transportadas no país, aumentando para 65% em 2015 (Pereira & Lessa, 2011; Moreira et al., 2018). No terceiro trimestre de 2024, foram produzidos 12,450 milhões de m³ de diesel S10 (ANP, 2024). Adicionalmente, em algumas comunidades de pescadores, o óleo diesel é empregado como repelente de mosquitos, sendo aplicado diretamente no corpo dos pescadores (Passos, 2016).

Vários estudos têm sido conduzidos com o objetivo de compreender a influência do óleo diesel na germinação e crescimento de plantas invasoras de pastagem, nativas de manguezais e macrófitas aquáticas (Bona et al., 2011; Mochel, 2023). Entretanto, esses estudos apresentam resultados bastante distintos entre as diferentes espécies estudadas.

Ao considerarmos as macrófitas aquáticas, estas desempenham um papel fundamental no meio ambiente, sendo responsáveis por diversas funções ecológicas. Como organismos fotoautotróficos, elas têm uma participação importante na cadeia alimentar, servindo como fonte de alimento para vários organismos, além de contribuírem para a formação de substratos para outras plantas aquáticas após sua decomposição (Tundisi & Tundisi, 2008). Ademais, auxiliam na remoção de poluentes de efluentes através de seu metabolismo e estruturas morfológicas, com algumas espécies podendo ser utilizadas como bioindicadoras devido aos efeitos visíveis e

mensuráveis que apresentam quando expostas a determinados poluentes (Santos et al., 2020; Pozza & Penteado, 2015).

Considerando a importância ecológica desses vegetais aquáticos nos ambientes lóticos e lênticos, esse estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes concentrações de óleo diesel S10 no crescimento da uma macrófita aquática submersa *Egeria densa Planch*. A hipótese desse estudo é que a macrófita submersa *E. densa*, quando exposta ao óleo diesel S10, terá seu crescimento afetado, o que pode ser verificado pelos seus coeficientes de crescimento.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente estudo foi avaliar o crescimento de *Egeria densa* sobre a influência de três concentrações de óleo diesel S10. Assim, os objetivos específicos foram realizados:

1. Monitorar o crescimento semanal de indivíduos de *Egeria densa* submetidos a três diferentes concentrações de óleo diesel em relação ao tratamento controle (i.e., sem adição de óleo diesel S10);
2. Analisar a morfologia das plantas na última semana de experimento em relação ao tratamento controle.
3. Aplicar um modelo cinético de crescimento, utilizando os dados de comprimento dos indivíduos de *Egeria densa* até o intervalo que não apresentem clorose.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PETRÓLEO E DERIVADOS

O petróleo é uma substância originada a partir da matéria orgânica que se acumulou ao longo de milhões de anos, em rochas sedimentares, em um meio livre de oxigênio sob condições específicas de temperatura (Thomas et al., 2004). É majoritariamente composto por hidrocarbonetos alcanos, contendo também pequenas parcelas de hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio (Corrêa, 2003).

Sua extração se iniciou em 1865, se expandindo ao redor do mundo visando aumentar pela exploração e consumo desse produto (Peyerl, 2017; Hage, 2017). Com o passar do tempo, o avanço de tecnologias de craqueamento catalítico

(processo de transformação do óleo bruto), o petróleo se tornou a matéria prima para inúmeros produtos utilizados na sociedade (Godoi, 2022).

Um exemplo de hidrocarboneto de petróleo com utilização em larga escala atualmente é o óleo diesel, que é amplamente utilizado em motores de combustão interna e ignição por pressão, geradores de energia, veículos ferroviários, rodoviários e marítimos (Godoi, 2022; ANP, 2024). Sua toxicidade é proveniente dos hidrocarbonetos policondensados (HPAS), substância com dois anéis aromáticos fundidos em uma única estrutura, tais como antraceno, pireno, fenantreno, entre outros (Figura 1).

O óleo diesel pode chegar até ambientes naturais de diversas formas, como por vazamentos em tubulações e acidentes envolvendo caminhões-tanque. Em 2023, ocorreu um acidente envolvendo um caminhão-tanque, que levava uma carga de óleo diesel, ocasionando o vazamento de 35 mil litros do produto, que acabou chegando até o lago do Parque Botânico Jardim Tulipas, no município Jundiaí, em São Paulo (Tomazela, 2023). Outro acidente envolvendo um caminhão tanque contendo óleo diesel ocorreu em dezembro do mesmo ano, em Barbacena (MG), a notícia reportada pelo jornal Estado de Minas (2023), indicou que o incidente gerou derramamento de óleo diesel em um afluente do Rio das Mortes, levando a um déficit no abastecimento de água do município. Caso parecido ocorreu na Rodovia Washington Luiz, Km 211, no município de São Carlos, onde ocorreu o vazamento de 30 mil litros de óleo, que infiltrou no solo e parte foi carregado para o Córrego das Cobras (CETESB, 2020).

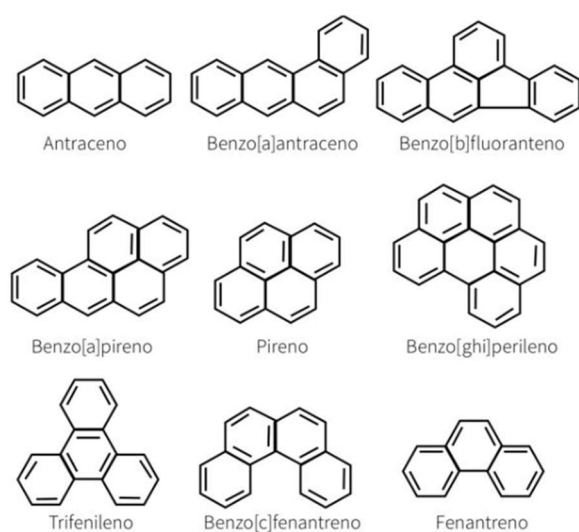


Figura 1: Exemplos de hidrocarbonetos policondensados presentes no diesel (Godoi, 2022).

3.2 MACRÓFITAS AQUÁTICAS EM AMBIENTES IMPACTOS COM DERIVADOS DE PETRÓLEO

Devido à contaminação dos ambientes aquáticos por acidentes com derramamento de derivados de petróleo ou pela liberação de óleo de embarcações, é necessário estudar os efeitos desses contaminantes nos parâmetros dessas plantas.

As macrófitas aquáticas são plantas flutuantes ou submersas, visíveis a olho nu, variando de 0,5mm a 2,5m (Chambers et al., 2008). Sua distribuição depende da composição dos sedimentos, turbidez da água, disponibilidade de nutrientes e herbivoria (Cunha-Santino & Bianchini Jr., 2011). Esses vegetais desempenham papéis essenciais no ecossistema, como elo na cadeia alimentar e formação de substrato após decomposição (Tundisi & Tundisi, 2008). Algumas espécies ainda apresentam efeitos facilmente mensuráveis, quando colocadas em contato com algumas substâncias contaminantes, fazendo com que possam ser utilizadas como bioindicadoras (Pozza & Penteado, 2015). Entre as macrófitas, *Egeria densa* destaca-se pelo potencial bioissorvente de metais (Módenes et al., 2009; Módenes et al., 2011; Pietrobelli et al., 2013), embora seu uso como bioindicador ainda seja pouco estudado.

Uma série de estudos vem sendo realizados a fim de identificar os possíveis impactos do petróleo e derivados tanto em plantas terrestres quanto aquáticas. Um estudo realizado por Bona et al. (2011), avaliou os impactos da contaminação por óleo diesel no solo em plântulas de *Sebastiania commersoniana* e *Schinus terebinthifolius*, por meio do plantio de sementes em diferentes intervalos de tempo após a contaminação. Os resultados demonstraram que intervalos de tempo maiores entre a contaminação e o plantio resultaram em menos alterações anatômicas na estrutura da raiz e dos eófilos. Ou seja, o intervalo de tempo entre semeadura e plantio influencia no aparecimento de alterações anatômicas dessas duas espécies, sendo *S. terebinthifolius* a mais resistente à contaminação.

Outro estudo, sobre plantas características de manguezais, visou analisar a germinação das sementes de *Laguncularia racemosa* e *Avicennia germinans*, sob a interferência de 6 diferentes concentrações de óleo diesel. Diferente do estudo anterior, as sementes foram colocadas para germinar diretamente em água, contendo biodiesel nas concentrações 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 3% e 4%. Os resultados indicaram que a espécie *L. racemosa* possui sensibilidade a presença do óleo diesel na fase germinativa, evidenciado pela queda da capacidade e velocidade de germinação dos

propágulos, enquanto *A. germinans* não apresentou efeitos visíveis no percentual germinativo em nenhum dos tratamentos e das variáveis analisadas (Mochel, 2023).

Em relação ao efeito em macrófitas aquáticas, foi encontrada tolerância ao óleo bruto em *Eichhornia crassipes*, na concentração de 0,5 ml/L de petróleo bruto. No entanto à medida que as concentrações de óleo bruto aumentam começam a surgir efeitos como a perda da pigmentação, murcha, redução da biomassa, diminuição dos níveis de clorofila a e b e alguns sinais de necrose (Atta et al., 2020). O mesmo estudo indicou a capacidade de fitorremediação dessa espécie, devido à redução da quantidade de hidrocarbonetos poliaromáticos ao final do experimento. A resposta de algumas macrófitas às concentrações de óleo bruto também possuem uma relação com a salinidade do ambiente, aumentando a mortalidade e reduzindo a área foliar conforme aumentam as concentrações de sal e óleo (Bamidele, 2011).

Um outro experimento utilizando óleo de motor demonstrou uma redução do comprimento de brotos em três espécies de macrófitas submersas (*Potamogeton gramineus*, *Myriophyllum spicatum* e *Ceratophyllum demersum*) conforme o aumento das concentrações testadas (Özbay, 2016). O óleo diesel também apresentou uma série de efeitos adversos em indivíduos de *Eichhornia crassipes*, ocasionando desde pequenas alterações no comprimento do caule e da raiz até mudanças drásticas na altura das plantas; também foram relatadas alterações morfológicas a partir do sexto dia de exposição ao contaminante (Eguagie & Ogbebor, 2019).

4. METODOLOGIA

4.1. DESCRIÇÃO DA ESPÉCIE UTILIZADA

Egeria densa é uma planta herbácea aquática com folhas verticiladas, até 5 por nó. Suas flores têm 9 estames verticilados, 3 estaminódios papilosos e filetes claviformes. As sementes são alargadas, com mais de 3 mm de comprimento. A *Egeria densa* é considerada nativa na Argentina e Uruguai e a partir de 1960 foi naturalizada no Chile (Cook & Urmikong, 1984; Hauenstein, 2004).

No Brasil, a *E. densa* está presente em 15 estados das regiões Nordeste, Sul e Sudeste (Lourenço & Bove, 2025). Ocorre nos biomas Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pampa, sendo encontrada em restingas, florestas ombrófilas, açudes e represas (Lourenço & Bove, 2025).

No início do século XX, *E. densa* foi difundida como uma espécie de grande utilidade na criação de peixes e em programas de erradicação de mosquitos (Cook & Urmi-König 1984). Sendo vendida também como planta de aquário (Yarrow, 2009). Desse modo, a espécie foi introduzida em diversos países, estando presente em 27 nações ao redor do globo, principalmente em regiões tropicais e temperadas (Yarrow, 2009). O primeiro registro de sua aparição fora das localidades de origem ocorreu em 1893, quando foi encontrada em Nova York, com muitos avistamentos na Europa a partir de 1910 (Cook & Urmi-König 1984; Yarrow, 2009).

4.2. MONTAGEM DOS EXPERIMENTOS DE CRESCIMENTO

4.2.1. Descrição do substrato de fixação de *Egeria densa*

Os bioensaios de crescimento de *Egeria densa* foram desenvolvidos no Laboratório de Bioensaios e Modelagem Matemática (LBMM), da Universidade Federal de São Carlos. Esses bioensaios foram montados em béqueres de borossilicato transparente com capacidade para 2 L. O substrato utilizado (Latosolo vermelho-amarelo) para a fixação dos fragmentos de *E. densa* foi coletado em uma área localizada no Cerrado da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, campus de São Carlos. (Figura 2). Esse solo foi previamente desidratado em estufa de secagem e esterilização a 50 °C (marca Fanem, modelo 315 SE) e peneirado (passante na peneira de 100 mesh (i.e., partículas > 0,149 mm) para garantir a homogeneidade das partículas do substrato.

4.2.2. Descrição do agente contaminante

De acordo com Petrobrás (2021), o óleo diesel S10 é uma substância caracterizada como um líquido límpido e inflamável, isento de materiais em suspensão, com ponto de fusão entre - 40 °C e 6 °C e ponto de ebulição inicial de 150° °C; sua densidade relativa varia entre 0,15 e 0,853 a 20 °C. É uma substância insolúvel em água, sendo solubilizada apenas em solventes orgânicos. Durante sua combustão ocorre a liberação de hidrocarbonetos leves e pesados e sulfeto de hidrogênio.

Ponto de coleta de solo - UFSCar

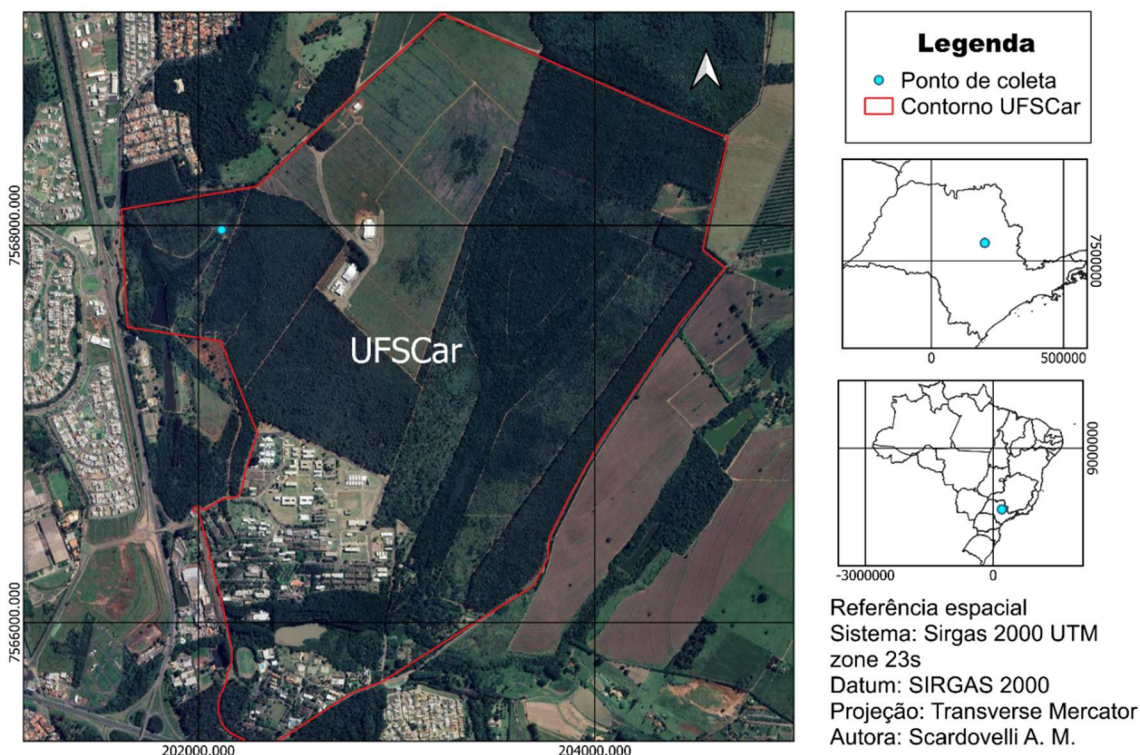


Figura 2: Localização do ponto de coleta de substrato para fixação da *Egeria densa*.

4.2.3. Delineamento experimental: parâmetros de incubação dos tratamentos

Os bioensaios de crescimento (tratamento controle e 3 concentrações de óleo diesel S10) foram mantidos em uma estufa (altura: 70 cm x largura: 75 cm x profundidade: 50 cm) coberta com filme difusor multicamada de polietileno de baixa densidade (espessura: 75 micras) com proteções UV e antioxidantes, além de aditivos que distribuem a luz ($4,31 \times 10^{-3} \mu\text{mol sec}^{-1} \text{cm}^{-2}$ de intensidade luminosa) uniformemente dentro da estufa, fotoperíodo de 12 h/12 h claro:escuro e com temperatura média de $25,0 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Baseando-se nos trabalhos realizado por Mochel (2023), foram realizados quatro tratamentos, contendo 7 réplicas: (i) Tratamento controle: sem adição de óleo diesel S10 (TC), (ii) Tratamento com 0,5% (v/v) de óleo diesel S10 e água deionizada (T0,5), (iii) Tratamento com 2% (v/v) de óleo diesel S10 e água deionizada (T2) e (iv) Tratamento com 4% (v/v) de óleo diesel S10 e água deionizada (T4).

Anteriormente à imersão dos indivíduos de *Egeria densa* nas soluções de cada tratamento, foram selecionados 28 indivíduos saudáveis, os quais foram cortadas em fragmentos de 5 cm de comprimento a partir de sua gema apical sem sinais de

senescência ou herbivoria. Os fragmentos foram plantados em copos plásticos de polipropileno, com capacidade de 30 ml, contendo o substrato de fixação (Item 4.2.1.) e recoberto por cascalhos (ca., 0,5 a 1,0 cm de diâmetro) para que o substrato de fixação não interferisse na turbidez da água dos bioensaios. Para cada tratamento, 7 fragmentos (i.e., hastes plantadas) foram distribuídas aleatoriamente nos bioensaios, permanecendo em aclimatação por 1 semana. Após esse período, soluções de óleo diesel S10 de 0,5% (v/v); 2% (v/v) e 4% (v/v) foram inseridas nos bioensaios para compor os tratamentos (T0,5; T2 e T4).



Figura 3: Procedimentos realizados durante o experimento crescimento de *Egeria densa* submetidas à três concentrações de óleo diesel S10: (1) Fragmentos cortados; (2) Plantio em vasos de polipropileno; (3) Bioensaios de crescimento; (4) Condições de incubação: luminosidade; (5) Determinação gravimétrica da biomassa final dos fragmentos e (6) Secagem.

A avaliação do crescimento foi realizada semanalmente, durante o período de 8 semanas. Semanalmente, o comprimento das hastes foi medido com régua milimetrada (escala de 1 mm) e o número de brotos foram contabilizados e somados ao comprimento total. Após o final dos experimentos, os fragmentos de *Egeria densa* foram desplantados e suas biomassas frescas foram determinadas com balança de precisão analítica (modelo M214Ai, marca Bel Engineering). Após a secagem em estufa (45 °C), as biomassas secas tiveram suas massas determinadas novamente.

4.2.5. Modelagem matemática e tratamento dos dados

Com base nas medições dos comprimentos acumulados, foi determinada a cinética de crescimento de *Egeria densa* ao longo de 8 semanas. O crescimento acumulado foi ajustado ao modelo logístico (Equação 1; Bianchini Jr. et al., 2010). Os parâmetros cinéticos foram obtidos por meio de regressões não lineares, utilizando o algoritmo iterativo de Levenberg–Marquardt (Press et al., 1993).

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

em que: N = comprimento máximo (cm), μ = coeficiente de crescimento (dia^{-1}), K = comprimento máximo (cm) de *Egeria densa* nos diferentes tratamentos e t = tempo (dia^{-1}).

O tempo de duplicação (t_d) da área foi calculado pela Equação 2.

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

em que: t_d = tempo de duplicação (dia^{-1}).

Devido ao estiolamento dos indivíduos de *Egeria densa* nos tratamentos com presença de óleo diesel, os dados de biomassa seca por centímetro de comprimento foram utilizados para as análises estatísticas, visando identificar diferenças na biomassa por centímetro dos indivíduos. A normalidade dos resultados foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk, que confirmou a normalidade em todos os tratamentos. Assim, foi realizada uma análise paramétrica de ANOVA de um fator, seguida pelo pós-teste de Tukey, para verificar a ocorrência de diferenças significativas ($p > 0,05$). As análises e gráficos foram realizadas utilizando o software Origin.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação dos comprimentos de *E. densa* nos quatro tratamentos é mostrado na Figura 4. O crescimento de *E. densa* nos T2 e T4 foram significativamente diferentes

de TC ($p < 0,05$ e $p < 0,001$, respectivamente). O número médio de brotos ($\pm DP$) por tratamento e o tempo de emergência está indicado na Figura 5.

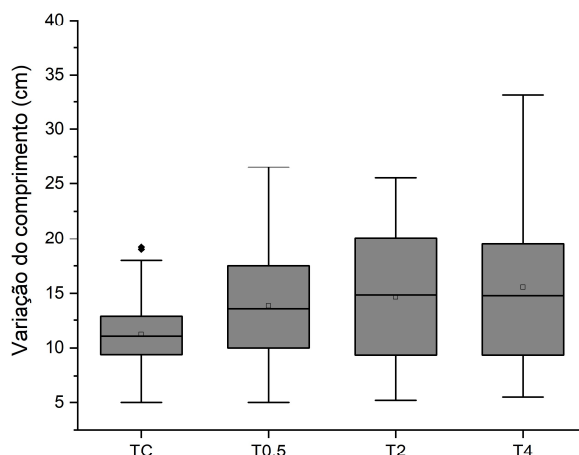


Figura 4: Boxplot das variações dos comprimentos de *Egeria densa* nos distintos tratamentos: controle (TC); 0,5% de óleo diesel S10 (T0,5); 2% de óleo diesel S10 (T2) e 4% de óleo diesel S10 (T4).

Os diagramas de caixas (Figura 4) apresenta a variação no comprimento (em cm) de *E. densa* em função dos tratamentos: (TC; T0,5; T2 e T4). A linha horizontal dentro de cada caixa representa a mediana, assim o TC apresentou a menor mediana, indicando menor crescimento entre os tratamentos. Os T0,5; T2 e T4 apresentaram medianas maiores em relação ao TC, indicando que concentrações de óleo diesel S10 promoveram um maior crescimento.

O TC apresenta a menor dispersão dos valores de comprimento, indicando menor variabilidade no crescimento., entretanto nos T0,5; T2 e T4 observou-se uma maior variabilidade, com T4 apresentando a maior amplitude interquartil, assim o T4 apresentou o maior comprimento máximo (ca. 35 cm), enquanto TC mostra valores de comprimento máximo mais baixos (ca. 20 cm).

Entre os dados de comprimento, observou-se um outlier (i.e., ponto isolado) no tratamento TC, representando um valor atípico acima do intervalo interquartil. De acordo com a interpretação dos diagramas de caixas, o TC apresentou menor crescimento de *E. densa*, com menor variabilidade. Em contrapartida, os T0,5; T2 e T4 aumentaram a variação no comprimento, com destaque para T4, que teve o maior 12 comprimento máximo e maior variabilidade nos dados. Esses resultados sugerem que o óleo diesel S10 apresentou um efeito positivo no crescimento da planta, entretanto nas maiores concentrações houve o estiolamento das hastes e a clorose.

Em relação ao número de brotos, não houve variação entre os tratamentos, o tempo de emergência foi a partir da segunda semana do TC e na 3ª semana nos tratamentos com óleo diesel S10 (T0,5; T2 e T4). A Figura 6 mostra a variação temporal do crescimento de *E. densa* submetidas ao tratamento sem adição de óleo diesel S10 (TC) e em três concentrações de óleo diesel S10 (T0,5; T2 e T4).

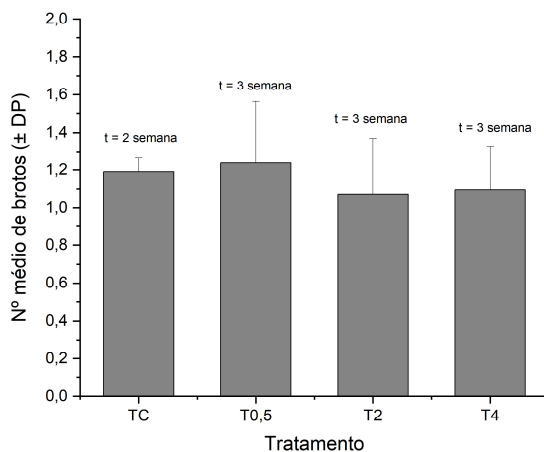


Figura 5: Número médio de brotos e tempo inicial da emergência dos brotos em cada tratamento: controle (TC); 0,5% de óleo diesel S10 (T0,5); 2% de óleo diesel S10 (T2) e 4% de óleo diesel S10 (T4).

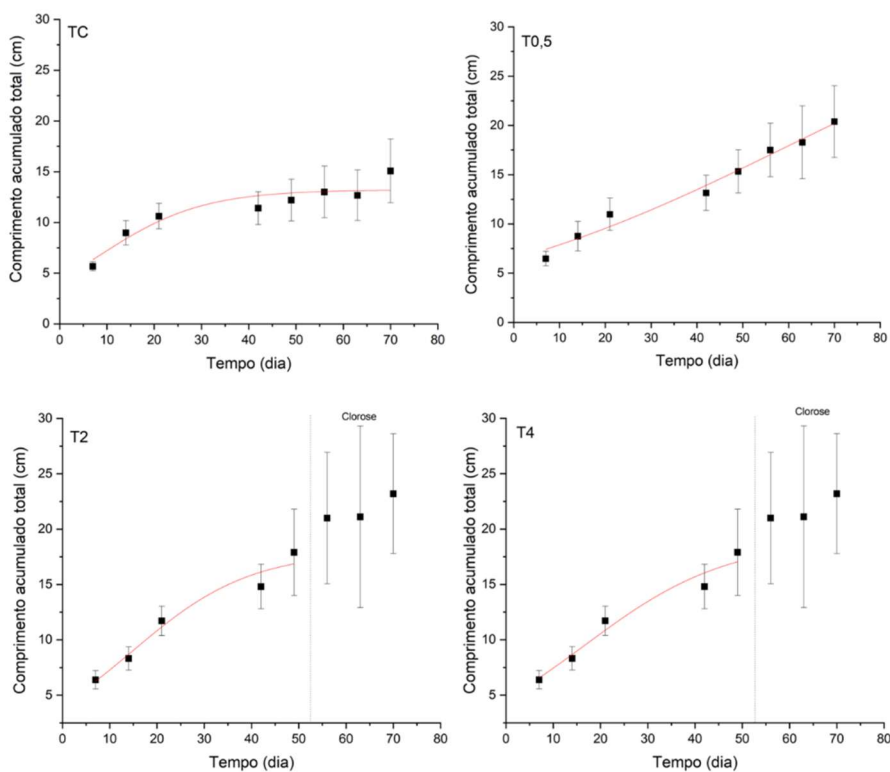


Figura 6: Variação temporal do comprimento dos fragmentos de *Egeria densa* crescendo em distintas concentrações de óleo diesel S10 (T0,5; T2 e T4) e na ausência de óleo diesel S10 (TC).

Sem considerar os resultados a partir do 49º dia, dos tratamentos com as maiores concentrações de óleo diesel S10 (T2 e T4), nas quais as plantas apresentaram crescimento anômalo (semelhante ao efeito de estiolamento e clorose), os ajustes dos resultados de comprimento acumulado (Figura 6 e Tabela 1) a curva logística indicaram que na presença de contaminante, os coeficientes de crescimento (μ) foram menores que o controle, tendendo a diminuir conforme aumentou a concentração de óleo diesel (i.e., os tempos de duplicação (td) aumentaram; TC: 7,6 dias; T0,5: 27,3 dias; T2: 8,6 dias e T4: 10,4 dias. O coeficiente de determinação (r^2) dos ajustes cinéticos foram elevados (variação: 0,88 a 0,97) indicando a robustez da aplicação do modelo em relação aos resultados experimentais.

Tabela 1: Parâmetros do crescimento de *Egeria densa* em meios com diferentes concentrações de óleo diesel S10.

Óleo diesel (%)	μ (dia ⁻¹)	K (cm)	td (d)	r^2
TC	0,091	13,2	7,6	0,88
T0,5	0,025	35,9	27,3	0,97
T2	0,080	17,9	8,6	0,96
T4	0,066	19,1	10,4	0,96

Por outro lado, os valores acumulados de crescimento (K em cm) aumentaram conforme aumentaram as concentrações de óleo (K-T0,5: 35,9 cm; K-T2: 17,9 cm e K-T4: 19,1 cm). Assim, na presença de óleo, as plantas cresceram mais devagar; contudo, cresceram mais (Tabela 1) conforme mostra os valores de μ (dia⁻¹). O TC apresentou o maior coeficiente de crescimento, entretanto teve o menor comprimento. As hastes de *E. densa* no controle não apresentaram estiolamento.

Os resultados sugerem a ocorrência de efeito crônico do óleo diesel na fisiologia das plantas, ou efeitos indiretos por modificação das condições prevalentes de crescimento (e.g., alterações das disponibilidades de elementos, gases dissolvidos e luz, aumento da viscosidade). Contudo, é evidente que a presença de óleo interferiu nos parâmetros de crescimento das plantas (Tabela 1). Entretanto, a partir da 7ª semana, alguma alteração nos meios com concentrações mais elevadas, provavelmente a degradação do óleo diesel S10, fez com que as condições predominantes dessas culturas fossem desfavoráveis para o crescimento, gerando clorose e morte. No caso da degradação, é possível que subprodutos gerados (ou

resíduos das moléculas originais) tenham manifestado efeito tóxico sobre o crescimento de *E. densa*.

Em relação à biomassa seca das hastas de *Egeria densa* desplantadas ao final do experimento, a Figura 7 mostra os boxplots relativos à biomassa em função dos quatro tratamentos.

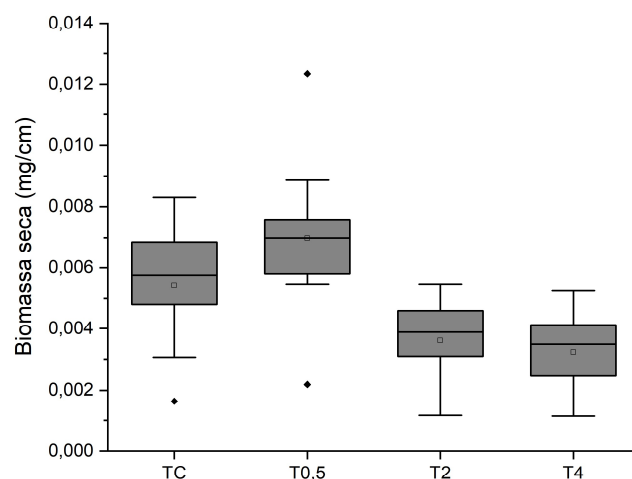


Figura 7: Biomassa seca de *Egeria densa* (70º dia experimental) em cada tratamento: controle (TC); 0,5% de óleo diesel S10 (T0,5); 2% de óleo diesel S10 (T2) e 4% de óleo diesel S10 (T4).

Ao analisar os diagramas de caixas dos resultados de biomassa seca final, observou-se que a mediana de T0,5 foi a mais elevada dentre todos os tratamentos, indicando uma maior biomassa (Figura 8). A menor concentração de óleo diesel S10 modulou um efeito positivo no crescimento e na biomassa em relação ao TC. Foram 15 observados outliers em TC e T0,5. As concentrações mais altas de óleo diesel S10 (T2 e T4) apresentaram um efeito antagônico ao T0,5, com medianas menores do que as de TC e T0,5. A menor biomassa foi observada no T4. A presença de óleo diesel S10 em baixas concentrações aumentou a biomassa da *E. densa*; contudo, à medida que as concentrações aumentaram, ocorreu estiolamento e clorose.

Houve diferenças significativas ($p < 0,01$) entre os tratamentos com óleo diesel S10 (T2 e T4) em relação ao TC e T0,5. Embora o crescimento de T0,5 em relação ao TC tenha sido mais lento, as biomassas secas finais não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$).

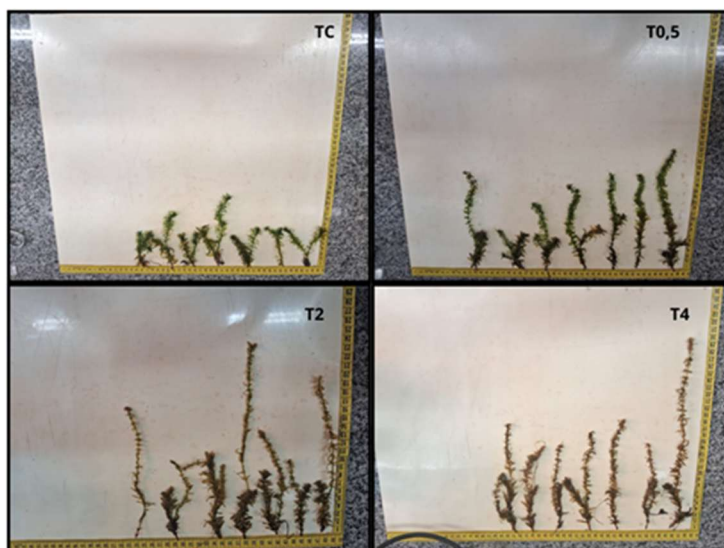


Figura 8: Hastes de *Egeria densa* após serem desplantadas no último dia experimental (70º dia experimental): controle (TC); 0,5% de óleo diesel S10 (T0,5); 2% de óleo diesel S10 (T2) e 4% de óleo diesel S10 (T4).

Embora a concentração mais baixa de óleo diesel S10 tenha estimulado o crescimento da *E. densa*, foi observado um crescimento anômalo nos tratamentos T2 e T4, que apresentaram os menores valores de biomassa em relação ao TC, mesmo tendo registrado um maior crescimento acumulado (i.e., comprimento) ao final do experimento. O crescimento acelerado nesses dois tratamentos nas últimas semanas 16 pode estar relacionado ao aumento da turbidez da água, observado a partir da 6ª semana experimental, o que limita a incidência de radiação subaquática disponível para a fotossíntese.

Em um estudo sobre a influência de diferentes condições de sombreamento no crescimento da espécie *Tapirira guianensis*, uma espécie típica de ambientes úmidos, em condições de alto sombreamento, a espécie apresentou crescimento acentuado, no entanto, sem variações em sua biomassa, indicando o estiolamento das mudas (Dousseau *et al.*, 2008). Essa condição se assemelha ao observado nos bioensaios de crescimento com *E. densa* nas maiores concentrações de óleo diesel S10 (T2 e T4).

Na menor concentração de óleo diesel S10, não foi observado estiolamento das plantas, indicando que a presença do contaminante em baixas concentrações teve um efeito positivo no desenvolvimento de *E. densa*. Esse aumento aparente no crescimento da espécie sob a exposição a baixas concentrações de contaminantes já foi relatado em outros estudos, como o de Wanderley *et al.* (2021), no qual a menor

concentração do surfactante dodecil sulfato de sódio também gerou um efeito positivo no desenvolvimento de *E. densa*.

A estimulação no desenvolvimento pode ter relação com o estresse ocasionado pela exposição ao óleo diesel S10, ocasionando um estresse fisiológico devido a fatores ambientais desfavoráveis. O estresse provoca grandes alterações nas condições ideais para a sobrevivência de determinado organismo, desencadeando modificações e respostas fisiológicas como diminuição da vitalidade da planta (Larcher, 2003). Essas respostas podem ser observadas pela redução do crescimento e na produtividade, nesse sentido a resposta da planta pode ser defensiva ou adaptativa (Fodorpataki et al., 2001). O efeito de redução do crescimento também foi observado no experimento: ocorreu um pequeno aumento do tempo de duplicação de *E. densa* nos tratamentos T2 e T4 em relação à TC (Tabela 1), com a apresentação de clorose e morte de plantas na 7^a semana de exposição ao contaminante.

Em outros estudos com macrófitas aquáticas e plantas palustres, substâncias derivadas de petróleo induziram respostas negativas no desenvolvimento da maioria das espécies. No entanto, observou-se uma certa tolerância em algumas delas (Özbay, 2016; Bamidele, 2011; Atta et al., 2020; Eguagie & Unah, 2021; Martins & Mochel, 2022). A *Avicennia germinans* (espécie de mangue) não apresentou diferença em seus percentuais germinativos quando submetida a concentrações de diesel de 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 3% e 4% (Martins & Mochel, 2022). Da mesma forma, a macrófita aquática *Eichhornia crassipes* demonstrou tolerância quando exposta a 0,5 ml/L de petróleo bruto (Atta et al., 2020). Esses resultados sugerem que, embora o óleo diesel cause efeitos negativos, algumas espécies com maior potencial adaptativo conseguem tolerar sua presença em determinadas concentrações. Assim, a espécie pode ser uma candidata a ser utilizada em estudos de fitorremediação.

6. CONCLUSÕES

Ao analisar os resultados obtidos, é possível afirmar que a exposição à menor concentração (0,5%) de óleo diesel S10 estimulou positivamente o crescimento de *Egeria densa* ao longo de oito semanas. No entanto, embora a espécie tenha demonstrado boa adaptação e tolerância a essa concentração, com aumento nas taxas de crescimento e biomassa, esse crescimento foi mais lento do que no tratamento controle (td = 27,3 dias). À medida que as concentrações aumentaram,

observaram-se sinais de estresse, como estiolamento e clorose, nas concentrações de 2% e 4%, a partir da 6ª semana.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP (Brasil). Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Óleo Diesel. *In*: ANP (Brasil). Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Gov.br**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/oleo-diesel>. Acesso em: 15 jan. 2025.

ATTA, A. M. *et al.* Green technology for remediation of water polluted with petroleum crude oil: using of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms combined with magnetic nanoparticles capped with myrrh resources of Saudi Arabia. **Nanomaterials**, v. 10, n. 2, p. 262, 2020.

BAMIDELE, J. F. Growth response of *Panicum repens* (L) to salinity and crude petroleum oil. **African Scientist**, v. 12, n. 2, p. 83-88, 2011.

BIANCHINI Jr., I. *et al.* Growth of *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle under controlled conditions. **Hydrobiologia**, v. 644, p. 301-312, 2010.

BONA, C; SILVA, M. Y.; BARDELLI, R., I. M.; *et al.* Efeito do solo contaminado com óleo diesel na estrutura da raiz e da folha de plântulas de *Sebastiania commersoniana* (Euphorbiaceae) e *Schinus terebinthifolius* (Anacardiaceae). **Acta Botanica Brasilica**, v. 25, n. 2, p. 277–285, 2011.

CETESB. **CETESB atende ocorrência com vazamento de diesel na rodovia Washington**. CETESB, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/blog/2020/03/24/cetesb-atende-ocorrencia-com-vazamento-de-diesel-na-rodovia-washington-luiz/>. Acesso em: 21 maio 2024.

CHAMBERS, P. A. *et al.* Aquatic macrophytes, world diversity and distribution, **Hydrobiologia**, v. 595, p. 9-26, 2008.

COOK, C. D. K.; URMI-KÖNIG, K. A revision of the genus *Egeria* (Hydrocharitaceae). **Aquatic Botany**, v. 19, n. 1-2, 1984.

CORRÊA, O. L. S. Petróleo: noções sobre exploração, perfuração, produção e microbiologia. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2003.

CUNHA-SANTINO, M. B.; BIANCHINI JR., I. Colonização de macrófitas aquáticas em ambientes lênticos. **Boletim ABLimno**, v. 39, p. 1 - 14, 2011.

DOUSSEAU, S. *et al.* Influência de diferentes condições de sombreamento sobre o crescimento de *Tapirira guianensis* Alb. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. S2, p. 477–479, 2008.

EGUAGIE, M. O.; OGBEBOR, J.U. Impact of crude oil treatments on the growth, survival, morphology and plant based component of *Eichhornia crassipes*. **African Scientist**, v. 20, p. 67-73, 2019.

EGUAGIE, M.O.; UNAH, J. A. Impact of kerosene, diesel and gasoline treatments on the morphology, growth indices and plant based component of an aquatic macrophyte *Eichhornia crassipes*. **Journal of Science and Technology Research**, v. 3, n. 4, p. 109–118, 2021.

FODORPATAKI L., MARTON A. L., CSORBA T. L. Stress-physiological investigation of algal cell cultures in polluted media. **Contribulii Botanice**, v. XXXVI, p. 101-108, 2001.

GODOI, L. **Química do petróleo e seus derivados**. Curitiba: InterSaberes, 2022.

HAGE, J. A presença do petróleo nos Estados Unidos: O hidrocarboneto na história de uma grande potência. **Esboços: Histórias em Contextos Globais**, v. 24, n. 38, p. 240–262, 2017.

HALMEMIES, S.; GRONDAHL, S.; NENONENS, K.; TUHKANEN, T. Estimation of the time periods and processes for penetration os selected spilled oils and fuels in different soils in the laboratory. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 8, p. 451- 465, 2003.

LARCHER, W. **Physiological plant ecology. Ecophysiology and stress physiology of the functional groups**. Heidelberg: Springer Berlin, 2003.

LOURENÇO, A. R.; BOVE, C. P. Hydrocharitaceae. In: **Flora e Funga do Brasil**. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB30036>. Acesso em: 20 jan. 2025.

MARTINS, J. C. F.; MOCHEL, F. R. Main spills of diesel oil and fuel oils in mangrove ecosystems in Brazil, from 1975 to 2022. **International Journal of Biological and Natural Sciences**, v. 2, p. 1-13, 2022.

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA R. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Química Nova**, vol. 40, n. 9, p. 1094-1110, 2017.

MOREIRA, M. A. L.; FREITAS JUNIOR, M. de; TOLOI, R. C. O transporte rodoviário no Brasil e suas deficiências. **Refas - Revista Fatec Zona Sul**, v. 4, n. 4, p. 1–13, 2018.

MÓDENES, A. N. et al. Potencial de biossorção do zinco pela macrófita *Egeria densa*. **Engenharia Sanitária E Ambiental**, v. 14, n. 4, 465–470, 2009.

MÓDENES, A. N.; ESPINOZA, F. R.; ALFLEN, V. L.; COLOMBO, A.; BORBA, C. E. Utilização da macrófita *Egeria densa* na biossorção do corante reativo 5G. **Engevista**, v. 13, n. 3, p. 160-166, 2011.

ÖZBAY, H. The effects of motor oil on the growth of three aquatic macrophytes. **Acta Ecologica Sinica**, v. 36, n. 6, p. 504-508, 2016.

PASSOS, H. S. Risco iminente à saúde dos pescadores de caranguejo: o uso inadequado do óleo diesel como repelente. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, 2016. Disponível em: <http://www.eumed.net/rev/cccss/2016/01/pescadores.html>. Acesso em: 26 jan. 2025.

PEREIRA, L. A. G.; LESSA, S. N. O processo de planejamento e desenvolvimento do transporte rodoviário no Brasil. **Caminhos de Geografia**, v. 12, n. 40, p. 26–45, 2011.

PETROBRÁS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico – FISPQ: óleo diesel S10**, 2021.

PEYERL, D. **O petróleo no Brasil: exploração, capacitação técnica e ensino de geociências (1864-1968)**. São Paulo: Editora UFABC, 2017.

PIETROBELLI, J. M. P. A.; CORREA, A. R.; LEICHTWEIS, W. L.; PIETROBELLI, S.; MÓDENES, A. N.; TRIGUEROS, D. E. G.; QUIÑONES, F. R. E.; RAVAGNANI, M. A. Avaliação da capacidade de remoção dos íons cádmio (ii) e zinco (ii) pela macrófita *Egeria densa*. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 28, p. 1–9, 2013.

POZZA, S. A.; PENTEADO, C. S. G. **Monitoramento e caracterização do ambiente**. São Carlos: EdUFSCar, 2015.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY B. P. Numerical recipes in C: the art of scientific computing. New York: Cambridge University Press, 1993.

SANTOS, N. B. C. et al. Assessing the effects of water quality on leaf morphoanatomy, ultrastructure and photosynthetic pigment content of *Salvinia auriculata* Aubl. (Salviniaceae). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 190, p. 110061, 2020.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Rio de Janeiro: ed. Interciência, 2004.

TOMAZELA, J. M. Óleo diesel que vazou em acidente na Bandeirantes atinge lago de parque público em Jundiaí. **Estadão**, [S. l.], 2 nov. 2023. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/sao-paulo/rodovia-dos-bandeirantes-acidente-com-vazamento-de-35-mil-litros-de-diesel-interdita-pista-nprm/>. Acesso em: 21 maio 2024.

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

WANDERLEY, E. L.; BIANCHINI JR., 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, n. 20, 2021.

YARROW, M. The ecology of *Egeria densa* planchon (liliopsida: Alismatales): A wetland ecosystem engineer. **Revista Chilena de Historia Natural**, v. 82, p. 299-313, 2009.