

LETÍCIA NALON CASTRO

AVALIAÇÃO ECOFISIOLÓGICA DO IMPACTO CAUSADO PELO AEROSOL
MARINHO E PELA DEPOSIÇÃO DE FERRO PARTICULADO EM
Eugenia uniflora L. (MYRTACEAE)

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação
em Fisiologia Vegetal, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C355a
2010

Castro, Leticia Nalon, 1986-

Avaliação ecofisiológica do impacto causado pelo aerosol marinho e pela deposição de ferro particulado em *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae) / Leticia Nalon Castro. – Viçosa, MG, 2010. xvii, 58f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Marco Antônio Oliva Cano.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 54-58.

1. *Eugenia uniflora*. 2. Plantas das restingas - Efeito do ferro. 3. Ecofisiologia vegetal. 4. Ferro - Minas e mineração - Aspectos ambientais. 5. Restingas. 6. Aerossóis.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 581.765

LETÍCIA NALON CASTRO

AVALIAÇÃO ECOFISIOLÓGICA DO IMPACTO CAUSADO PELO AEROSOL
MARINHO E PELA DEPOSIÇÃO DE FERRO PARTICULADO EM
Eugenia uniflora L. (MYRTACEAE)

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação
em Fisiologia Vegetal, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*

Aprovada: 19 de outubro de 2010.

Dra. Kacilda Naomi Kuki
(Co-orientadora)

Prof^a. Luzimar Campos da Silva
(Co-orientadora)

Prof. Eduardo Gusmão Pereira

Prof. Juraci Alves Oliveira

Prof. Marco Antônio Oliva Cano
(Orientador)

*Aos meus pais e ao meu irmão,
dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por terem tornado este trabalho possível, pelo amor, pelo carinho, pela amizade, por todas as visitas à Viçosa, pelo incentivo e pelo apoio nos momentos difíceis.

Ao meu irmão lindo, agradeço o carinho, a atenção, o auxílio nas inúmeras análises estatísticas e por ter escutado tantos comentários a respeito deste trabalho.

A toda a minha família pela atenção, pelo carinho e incentivo que sempre depositaram em mim.

Ao meu namorado pela compreensão, pelo carinho, pelas visitas à Viçosa durante os experimentos, por toda a ajuda e pelos momentos felizes que amenizaram as dificuldades.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal por possibilitarem a realização deste trabalho e por todo o aprendizado adquirido desde a graduação.

Aos professores da Universidade Federal de Viçosa, especialmente aos do Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal pelos conhecimentos transmitidos e pela atenção.

Ao professor Marco Antônio Oliva Cano que, embora tenha esquecido que tinha aceitado o pedido, me orientou durante este trabalho e confiou a mim o desafio da execução deste projeto. Obrigada pela confiança, pelos conselhos e pelos momentos de convívio harmornioso.

À Kacilda Naomi Kuki pelas sugestões, pela atenção, pela companhia, pela amizade e pelo auxílio prestado durante todas as etapas deste trabalho.

Ao professor Eduardo Gusmão Pereira pelos ensinamentos, pela amizade, por todo o auxílio desde a graduação, pela atenção com que me auxiliou a cada dúvida e por ter aceitado o convite para participar da banca examinadora.

À professora Luzimar Campos da Silva que me orientou durante a graduação, pela amizade e por ter aceitado o convite para participar da banca examinadora.

Ao professor Juraci Alves Oliveira por ter aceitado participar da banca examinadora.

Aos funcionários do Departamento de Fisiologia Vegetal, em especial, aos funcionários da UCP, Rogério Gomide e João Bosco pelo auxílio e pelos momentos de descontração durante as longas etapas de trabalho laboratorial e à Luciene pela atenção e ajuda.

À equipe UCP, pelo convívio alegre, pela companhia, pelo auxílio no laboratório e pela amizade. Por todas as dúvidas resolvidas, sugestões, dicas e por todas as trocas de experiência.

A todos os meus colegas e amigos, pelo convívio, pela amizade, pela alegria compartilhada e pela companhia nos estudos e nos trabalhos de laboratório.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à SAMARCO MINERAÇÃO S.A., pelo apoio financeiro.

A todos aqueles contribuíram para a realização deste trabalho e que torceram por mim.

Muito obrigada!

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS E TABELAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1. Introdução	1
2. Objetivo.....	3
3. Materiais e métodos	3
3.1 Material vegetal e condições experimentais.....	3
3.2 Delineamento experimental e aplicação dos tratamentos	4
3.3 Variáveis analisadas	8
3.3.1 Composição mineral das folhas.....	8
3.3.2 Potencial osmótico total	9
3.3.3 Avaliação das trocas gasosas.....	9
3.3.4 Determinação do teor de pigmentos fotossintéticos.....	10
3.3.5 Avaliação das variáveis da fluorescência da clorofila <i>a</i>	10
3.3.6 Permeabilidade de membranas	12
3.3.7 Conteúdo de malonaldeído	12
3.3.8 Alterações na morfologia foliar.....	13
3.4 Análises estatísticas.....	13
4. Resultados	13
4.1 Experimento 1	13
4.1.1 Composição mineral das folhas.....	13
<i>Teores de Fe total, Cl e Na⁺²</i>	13
<i>Teores de Ca⁺², Mg⁺² e K⁺</i>	15
4.1.2 Potencial osmótico total	17
4.1.3 Avaliação das trocas gasosas.....	18
4.1.4 Determinação do teor de pigmentos fotossintéticos.....	20
4.1.5 Avaliação das variáveis da fluorescência da clorofila <i>a</i>	21
4.1.6 Permeabilidade de membranas e conteúdo de malonaldeído	26
4.1.7 Alterações na morfologia foliar.....	28
4.2 Experimento 2	30

4.2.1 Avaliação das trocas gasosas.....	30
4.2.2 Avaliação das variáveis da fluorescência da clorofila <i>a</i>	40
4.2.3 Determinação do teor de pigmentos fotossintéticos.....	45
4.2.4 Alterações na morfologia foliar.....	46
5. Discussão	47
6. Conclusões	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Tabela 1: Tratamentos aos quais plantas de <i>Eugenia uniflora</i> foram submetidas no primeiro experimento e suas respectivas representações.....	4
Tabela 2: Tratamentos aos quais plantas de <i>Eugenia uniflora</i> foram submetidas no segundo experimento e suas respectivas representações.....	5
Figura 1: Diagrama da câmara utilizada na aplicação da deposição do material sólido particulado de ferro.....	6
Tabela 3: Caracterização da composição do sal marinho <i>in natura</i> usado para preparar a solução salina utilizada na simulação do aerosol marinho.....	7
Figura 2: Teores de Fe total (A), Cl ⁻ (B) e Na ⁺ (C) em folhas de plantas de <i>Eugenia uniflora</i> após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H ₂ O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP _{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H ₂ O+MSP _{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP _{Fe}).....	15
Figura 3: Teores de Ca ⁺² (A) e Mg ⁺² (B) em folhas de plantas de <i>Eugenia uniflora</i> após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H ₂ O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP _{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H ₂ O+MSP _{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP _{Fe}).....	16
Figura 4: Teores de K ⁺ em folhas de plantas de <i>Eugenia uniflora</i> após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H ₂ O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP _{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H ₂ O+MSP _{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP _{Fe}).....	17
Figura 5: Potencial osmótico total de folhas de plantas de <i>Eugenia uniflora</i> após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H ₂ O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP _{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H ₂ O+MSP _{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP _{Fe}).....	18

Figura 6: Taxa de assimilação líquida de carbono - A (A), condutância estomática - g_s (B), razão entre a concentração interna e externa de CO_2 - C_i/C_a (C) e transpiração - E (D) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H_2O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H_2O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro ($AM+MSP_{Fe}$).....20

Figura 7: Teores de clorofila a (A) e carotenóides (B) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H_2O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H_2O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro ($AM+MSP_{Fe}$).....21

Figura 8: Eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H_2O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H_2O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro ($AM+MSP_{Fe}$).....22

Tabela 4: Rendimento quântico efetivo do fotossistema II (ϕ_{II}), rendimento quântico da dissipação regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ_{NPQ}) e rendimento quântico da dissipação não-regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ_{NO}) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H_2O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H_2O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro ($AM+MSP_{Fe}$).....23

Figura 9: Distribuição percentual da dissipação energética em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H_2O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H_2O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro ($AM+MSP_{Fe}$).....24

Figura 10: Taxa linear de transporte de elétrons no fotossistema II (ETR) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H_2O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido

particulado de ferro (H_2O+MSP_{Fe}), aerossol marinho simulado (AM) e aerossol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro ($AM+MSP_{Fe}$).....25

Figura 11: *Quenching* fotoquímico (qL) dos tecidos foliares de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerossol com água desionizada (H_2O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerossol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H_2O+MSP_{Fe}), aerossol marinho simulado (AM) e aerossol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro ($AM+MSP_{Fe}$).....26

Figura 12: Permeabilidade relativa (A) e concentração de malonaldeído - MDA (B) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerossol com água desionizada (H_2O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerossol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H_2O+MSP_{Fe}), aerossol marinho simulado (AM) e aerossol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro ($AM+MSP_{Fe}$).....27

Figura 13: Alterações na morfologia foliar de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle- CONT, aerossol com água desionizada - H_2O , deposição de material sólido particulado de ferro - MSP_{Fe} , aerossol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro - H_2O+MSP_{Fe} , aerossol marinho simulado - AM e aerossol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro - $AM+MSP_{Fe}$29

Tabela 5: Resultado da análise GLM fatorial com medidas repetidas das variáveis de trocas gasosas: taxa de assimilação líquida de carbono (A), condutância estomática (g_s), razão entre a concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a) e transpiração (E) de plantas de *Eugenia uniflora* 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos: controle (CONT), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerossol marinho simulado (AM) e deposição material sólido particulado de ferro e aerossol marinho simulado ($MSP_{Fe}+AM$).....31

Figura 14: Taxa de assimilação líquida de carbono (A) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 0, 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos sem deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos AM e CONT) e dos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos MSP_{Fe} e $AM+MSP_{Fe}$).....31

Figura 15: Condutância estomática (g_s) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 0, 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos sem deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos AM e CONT) e dos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}) e dos tratamentos sem aerosol marinho simulado (MSP_{Fe} e CONT) e com aerosol marinho simulado (AM e AM+MSP_{Fe}).....34

Figura 16: Razão entre a concentração interna e externa de CO₂ (C_i/C_a) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 0, 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos sem deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos AM e CONT) e dos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}) e dos tratamentos sem aerosol marinho simulado (MSP_{Fe} e CONT) e com aerosol marinho simulado (AM e AM+MSP_{Fe}).....37

Figura 17: Transpiração (E) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 0, 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos sem deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos AM e CONT) e dos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}) e dos tratamentos sem aerosol marinho simulado (MSP_{Fe} e CONT) e com aerosol marinho simulado (AM e AM+MSP_{Fe}).....39

Tabela 6: Resultado da análise GLM fatorial com medidas repetidas das variáveis da fluorescência da clorofila *a*: eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m), rendimento quântico efetivo do fotossistema II (ϕ_{II}), rendimento quântico da dissipação regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ_{NPQ}), rendimento quântico da dissipação não-regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ_{NO}), taxa linear de transporte de elétrons no fotossistema II (ETR) e *quenching* fotoquímico.....41

Tabela 7: Eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 0, 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos.....41

Tabela 8: Médias das variáveis da fluorescência da clorofila *a* de plantas de *Eugenia uniflora* 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos sem deposição de material sólido particulado de ferro - ausência MSP_{Fe} (AM e CONT), com deposição material sólido particulado de ferro -presença MSP_{Fe} (MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}), sem aerosol marinho simulado - ausência AM (MSP_{Fe} e CONT) e com aerosol marinho simulado - presença AM (AM e AM+MSP_{Fe}).....43

Figura 18: Imagens das variáveis da fluorescência da clorofila *a* dos tecidos foliares de plantas de *Eugenia uniflora* 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos: controle (CONT), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e deposição material sólido particulado de ferro e aerosol marinho simulado (MSP_{Fe}+AM).....44

Tabela 9: Resultado da análise da interação entre o efeito da deposição de material sólido particulado de ferro e da simulação do aerosol marinho para os valores da clorofila *a*.....45

Tabela 10: Teor de carotenóides das folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos: controle (CONT), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e deposição material sólido particulado de ferro e aerosol marinho simulado (MSP_{Fe}+AM).....46

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

<i>A</i>	Taxa de assimilação líquida de carbono
C_i	Concentração de CO ₂ nos espaços intercelulares
C_a	Concentração de CO ₂ atmosférica
C_i	Condutividade inicial
C_f	Condutividade final
DCB	Solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio
DMSO	Dimetilsulfóxido
<i>E</i>	Taxa de transpiração
ETR	Taxa de transporte de elétrons no fotossistema II
<i>F</i>	Fluorescência após adaptação à luz antes do pulso de saturação
F_0	Fluorescência mínima após adaptação ao escuro
F_m	Fluorescência máxima após adaptação ao escuro
F_v	Fluorescência variável
F_v/F_m	Rendimento quântico potencial do fotossistema II
F_m'	Fluorescência máxima após adaptação à luz
F_0'	Fluorescência mínima após adaptação à luz
Fe-EDTA	Solução de FeSO ₄ .7H ₂ O e ácido etilenodiaminotetracético
GLM	Modelo linear geral (general linear model)
g_s	Condutância estomática
IRGA	Analisador de gás por infravermelho (infrared gas analyzer)
MDA	Malonaldeído
MS	Matéria seca
PAR	Fluxo de fótons fotossinteticamente ativos
PS II	Fotossistema II
qL	Estimativa de centros de reações abertos do fotossistema II com base no modelo “lake”
SOD	Superóxido dismutase
TCA	Ácido tricloroacético

UCP	Unidade de Crescimento de Plantas
ϕ_{II}	Rendimento quântico efetivo do fluxo linear de elétrons no fotossistema II
ϕ_{NPQ}	Rendimento quântico da dissipação regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II
ϕ_{NO}	Rendimento quântico da dissipação não-regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II
Ψ_s	Potencial osmótico do suco celular

RESUMO

CASTRO, Leticia Nalon, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2010. **Avaliação ecofisiológica do impacto causado pelo aerossol marinho e pela deposição de ferro particulado em *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae).** Orientador: Marco Antônio Oliva Cano. Co-orientadores: Kacilda Naomi Kuki e Luzimar Campos da Silva.

Para avaliar a ação conjunta do aerossol marinho e da deposição de material sólido particulado de ferro em plantas de *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae) foram realizados dois experimentos. No primeiro experimento plantas de *E. uniflora* foram submetidas aos tratamentos: controle, aerossol com água desionizada, deposição de material sólido particulado de ferro, aerossol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro, aerossol marinho simulado e aerossol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro, durante 55 dias seguidos da avaliação de parâmetros relacionados com a fotossíntese. O segundo experimento foi realizado para avaliar a progressão das alterações nos parâmetros fotossintéticos ao longo do tempo. Plantas de *E. uniflora* foram submetidas aos seguintes tratamentos: controle, aerossol marinho simulado, deposição de material sólido particulado de ferro e aerossol marinho simulado em conjunto com a deposição material sólido particulado de ferro. O experimento teve duração de 60 dias. As avaliações de parâmetros relacionados à fotossíntese foram realizadas periodicamente. No primeiro experimento, foi observado o aumento da concentração de Fe total, Cl⁻ e Na⁺ em resposta a deposição de ferro particulado, ao aerossol marinho simulado e ao efeito conjunto do aerossol marinho e da deposição de ferro particulado, respectivamente. Não foram observadas alterações no potencial osmótico. Nas plantas submetidas ao aerossol marinho em conjunto com a deposição de ferro particulado verificou-se a diminuição na taxa assimilatória líquida de CO₂, na condutância estomática, na transpiração, no rendimento quântico efetivo do fluxo linear de elétrons no fotossistema II e na taxa linear de transporte de elétrons no fotossistema II e o aumento na razão entre a concentração interna e externa de CO₂. Houve um decréscimo na estimativa de centros de reações abertos do fotossistema II com base no modelo “lake” das plantas submetidas à deposição de ferro particulado. No segundo experimento, foi observado, em resposta à deposição de ferro particulado um aumento na condutância estomática, na transpiração e na razão entre concentração interna e externa de CO₂ a partir do 35º, 21º, 49º dias, respectivamente. Os valores da

taxa assimilatória líquida de CO₂ não variaram. Foram observadas reduções no rendimento quântico da dissipação regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II e no rendimento quântico da dissipação não-regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II em resposta à deposição de ferro particulado e ao aerossol marinho simulado e um decréscimo nos valores de estimativa de centros de reações abertos do fotossistema II com base no modelo “lake” nas plantas submetidas à simulação do aerossol marinho. A simulação do aerossol marinho não gerou um estresse iônico nem um estresse osmótico. As alterações observadas em resposta à deposição de ferro particulado parecem estar relacionadas à diminuição da eficiência da absorção de luz pelo fotossistema II. O aerossol com água desionizada e o aerossol marinho simulado intensificaram os efeitos da deposição de material sólido particulado de ferro em plantas de *E. uniflora*.

ABSTRACT

CASTRO, Leticia Nalon, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2010. **Ecophysiological evaluation of the impact caused by marine aerosol and iron particulate matter deposition in *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae).** Advisor: Marco Antônio Oliva Cano. Co-Advisors: Kacilda Naomi Kuki and Luzimar Campos da Silva.

Two experiments were conducted in order to evaluate the effects of marine aerosol in conjunction with iron solid particulate matter deposition on *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae). In the first experiment, plants of *E. uniflora* were submitted to the following treatments: control, aerosol with deionized water, iron solid particulate matter deposition, aerosol with deionized water plus iron solid particulate matter deposition, simulated marine aerosol and simulated marine aerosol plus iron solid particulate matter deposition. After 55 days of treatment application, the assessments of parameters related to photosynthesis were performed. The second experiment was conducted to evaluate the progression of changes in photosynthetic parameters. Plants of *E. uniflora* were treated as follows: control, simulated marine aerosol, iron solid particulate matter deposition and simulated marine aerosol deposition plus iron solid particulate matter deposition. The experiment lasted 60 days. The evaluations of parameters related to photosynthesis were periodically made during the experiment. In the first experiment, an increase in Fe total, Cl⁻ and Na⁺ concentrations was observed in response to deposition of iron particulate matter, the simulated marine aerosol and the combined effect of marine aerosol and the deposition of iron particles, respectively. There were no changes in osmotic potential. A decrease in photosynthetic CO₂ assimilation rate, stomatal conductance, transpiration, quantum yield of photochemical energy conversion in photosystem II and electron transport rate through photosystem II and an increase in internal leaf CO₂ to external CO₂ ratio were observed in the plants exposed to the simulated marine aerosol plus iron solid particulate matter deposition. A decrease in photochemical quenching coefficient based on lake model was observed in the leaves of plants subjected to iron solid particulate matter deposition. On the second experiment, an increase in stomatal conductance, transpiration and internal leaf CO₂ to external CO₂ ratio from, respectively, 35th, 21st and 49th days of experiment was observed in response to the deposition of iron solid particulate matter. The values of photosynthetic CO₂ assimilation rate did not change. Reductions in quantum yield of regulated and non-regulated energy dissipation in photosystem II occurred in response to deposition of

iron particles plus the simulated marine aerosol. A decrease in the values of photochemical quenching coefficient based on lake model was observed in plants exposed to the simulation of marine aerosol. The simulated marine aerosol did not cause an ionic and neither an osmotic stress. The changes observed in response to deposition of iron particulate matter seem to be related to decreased efficiency of light absorption by photosystem II. The results indicate that the aerosol with deionized water and simulated marine aerosol intensified the effects of iron solid particulate matter deposition in *E. uniflora*.

1. Introdução

O litoral do estado do Espírito Santo abriga um número crescente de indústrias responsáveis pela exploração e beneficiamento do minério de ferro. Estas usinas se localizam próximo a fragmentos de restinga e emitem poluentes atmosféricos que podem alterar o ecossistema natural circundante (Kuki et al., 2008).

Dentre estes poluentes cita-se o material sólido particulado de ferro, gerado durante o beneficiamento do minério de ferro, que se caracteriza por ser constituído por pequenas partículas facilmente suspensas e carregadas pelo vento, depositando-se na vegetação (Kuki et al., 2008).

A deposição do material sólido particulado de ferro sobre a superfície das plantas causa efeitos físicos diretos como o bloqueio da radiação solar incidente, o abrasamento, o aquecimento foliar e a obstrução dos estômatos. (Grantz et al., 2003, Pereira et al., 2009). A síntese de clorofila pode ser reduzida devido ao bloqueio da radiação incidente e sua degradação pode ser aumentada devido ao estresse oxidativo gerado pelo excesso de íons de ferro livre nos tecidos vegetais (Gallego et al., 1996; Vansuyt et al., 1997; Fourcroy, 1999).

O excesso de ferro acumulado nos tecidos vegetais, pode causar danos aos complexos fotossintéticos (Suh et al., 2002) reduzindo os valores da eficiência quântica do PS II, da taxa de transporte de elétrons e aumentando os valores da dissipação não fotoquímica do excesso de energia (Pereira et al., 2009).

Outra situação agravante que ocorre nas imediações das usinas, por ser tratar de um ecossistema costeiro, é a constante exposição das plantas ao aerossol marinho (Pereira, 2006), que traz, em suspensão, gotículas da solução salina do mar (Poljakoff-Mayber e Gale, 1975).

O aerossol marinho é formado através da ação dos ventos na superfície do mar. O impacto do vento sobre a superfície marítima gera a formação de bolhas de ar que, em seguida, explodem produzindo gotículas que originam o aerossol marinho. Além da formação indireta do aerossol marinho através da ruptura de bolhas de ar, a agitação das cristas das ondas pelo vento produz diretamente gotículas, em forma de espuma, contribuindo para a formação deste aerossol (Fitzgerald, 1991).

Após a geração das gotículas, estas entram em equilíbrio com o ambiente e, dependendo das condições de temperatura e umidade relativa, adquirem a forma de partículas salinas (cristais) ou soluções salinas de diferentes concentrações (Zerra e Macri, 1995). Estas partículas suspensas no ar, na forma líquida ou sólida, são transportadas pelo vento em direção ao continente.

A exposição das plantas ao aerossol marinho pode favorecer a adesão das partículas de ferro na superfície das folhas. Além disso, é possível que os íons presentes no aerossol marinho penetrem no mesofilo através das fendas cuticulares das folhas e dos estômatos o que pode desencadear um estresse iônico e osmótico.

Apesar da superfície das dunas ser rica em sais clorídricos, a concentração de sais na areia não ultrapassa os valores mínimos necessários para que este solo seja classificado como salino (Boyce, 1954). Desta forma, acredita-se que nas regiões mais próximas às zonas das marés, a maior ação da salinidade ocorra através do aerossol marinho.

A salinidade pode causar desequilíbrios e deficiências nutricionais devido à competição de Na^+ e Cl^- com nutrientes como K^+ , Ca^{+2} e NO_3^- (Hu e Schmidhalter, 2005). A elevada concentração de Na^+ pode desequilibrar a absorção de Mg^{+2} (Hasegawa et al., 2000) e provocar o deslocamento do Ca^{+2} ligado às membranas, alterando a integridade estrutural e funcional destas estruturas celulares (Cramer et al., 1985).

Plantas submetidas ao estresse salino apresentam limitações estomática e mesofílica ao CO_2 (Flexas et al., 2004; 2007). Estas limitações podem acarretar a redução da fixação de CO_2 (Munns, 2002). Além disso, o decréscimo no teor de pigmentos fotossintéticos, a queda na taxa de transporte de elétrons e a produção de espécies reativas de oxigênio desencadeadas pelo estresse salino também podem reduzir a taxa fotossintética de plantas expostas ao estresse salino (Parida et al., 2003; Apel e Hirt, 2004; Sudhir e Murthy, 2004).

Eugenia uniflora L. é uma espécie sensível à deposição de material particulado de ferro e apresenta diversas variáveis que podem ser utilizados como biomarcadores para avaliação de risco ambiental (Silva et al., 2006; Neves et al., 2009). Amplamente distribuída na vegetação costeira, esta espécie desempenha um importante papel na

interface entre a vegetação costeira e as formações florestais, auxilia na fixação das dunas e contribui para a manutenção do ecossistema da restinga (Neves et al., 2009).

Neste trabalho, a hipótese estudada foi que a ação conjunta do aerossol marinho e da deposição de material particulado de ferro acarretariam alterações nos processos fotossintéticos de plantas de *E. uniflora*. O ferro na forma de Fe^{+2} poderia causar danos ao aparato fotossintético e o acúmulo de sal poderia causar um estresse osmótico e iônico que, em conjunto, poderiam afetar a assimilação de CO_2 .

2. Objetivo

Este trabalho pretendeu avaliar os efeitos da ação isolada ou conjunta do aerossol marinho e da deposição de material sólido particulado de ferro sobre fatores e processos que regulam a fotossíntese de *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae).

3. Material e Métodos

3.1 Material vegetal e condições experimentais

Sementes de *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae) obtidas de uma população homogênea oriunda de um fragmento de Mata Atlântica (20°51'24"S 42°48'10"W) foram selecionadas quanto ao tamanho e a forma. Em seguida, foram lavadas e esterilizadas com água e hipoclorito de sódio na razão de 1:1 (3,0%) durante 15 minutos, enxaguadas em água desmineralizada e tratadas com solução fungicida a base de Benlate a 0,2% (p/v). Posteriormente, foram colocadas para germinar em rolos de papel Germtest acomodados em vasos contendo solução de cloreto de cálcio 0,5 mM, sob aeração contínua e temperatura controlada de 25 ± 1 °C.

As plântulas obtidas com aproximadamente 7 dias foram transplantadas para vasos de 2,6 dm³ contendo substrato na proporção 2:1:1 de solo:areia:esterco. Após o transplante, as plantas foram transferidas para uma casa de vegetação na Unidade de Crescimento de Plantas (UCP) da Universidade Federal de Viçosa onde permaneceram para aclimação às condições experimentais e desenvolvimento durante um período de cerca de 6 meses, com suprimento constante de água próximo à capacidade de campo. Posteriormente, plantas de *E. uniflora* com aproximadamente 30 cm de altura foram selecionadas quanto à uniformidade de altura, número de folhas e estado fitossanitário.

Os experimentos foram realizados em condições semi-controladas de casa de vegetação, na UCP da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais (20°45'S, 42°15'W, 650 m de altitude). A temperatura média do período foi de 23 °C e a irradiância média de 31 MJ.

3.2 Delineamento experimental e aplicação dos tratamentos

Para avaliar a ocorrência de alterações na fotossíntese de *E. uniflora* em resposta à ação conjunta do aerosol marinho e da deposição de material sólido particulado de ferro foram realizados 2 experimentos com 4 repetições por tratamento.

No primeiro experimento, as plantas foram submetidas a 6 tratamentos independentes (Tabela 1). O tratamento controle consistiu em plantas de *E. uniflora* mantidas em casa de vegetação com suprimento de água no solo próximo à capacidade de campo.

Tabela 1: Tratamentos aos quais plantas de *Eugenia uniflora* foram submetidas no primeiro experimento e suas respectivas representações.

Tratamento	Representação
Controle	CONT
Aerosol com água desionizada	H ₂ O
Deposição de material sólido particulado de ferro	MSP _{Fe}
Aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro	H ₂ O+MSP _{Fe}
Aerosol marinho simulado	AM
Aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro	AM+MSP _{Fe}

O segundo experimento foi realizado para avaliar a progressão das alterações nas variáveis fotossintéticas e a verificar estatisticamente a ocorrência de interações entre os efeitos do aerosol marinho simulado e da deposição de material sólido particulado de ferro. Para isso, foi realizado um experimento em esquema fatorial 2x2 sendo dois níveis de exposição ao aerosol marinho (com aerosol marinho simulado e sem aerosol marinho simulado), dois níveis de exposição à deposição de material sólido particulado de ferro (com deposição de material sólido particulado de ferro e sem deposição de

material sólido particulado de ferro), e seis datas individuais de amostragem (avaliações realizadas no dia 0, anterior à aplicação dos tratamentos, e 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início do experimento). Neste experimento, plantas de *E. uniflora* foram submetidas a 4 tratamentos (Tabela 2).

Tabela 2: Tratamentos aos quais plantas de *Eugenia uniflora* foram submetidas no segundo experimento e suas respectivas representações.

Tratamento	Representação
Sem aerosol marinho simulado e sem deposição de material sólido particulado de ferro (controle)	CONT
Com aerosol marinho simulado e sem deposição de material sólido particulado de ferro	AM
Sem aerosol marinho simulado e com deposição de material sólido particulado de ferro	MSP _{Fe}
Com aerosol marinho simulado e com deposição de material sólido particulado de ferro	AM+MSP _{Fe}

Os dois experimentos seguiram o delineamento inteiramente casualizado e tiveram a duração de 60 dias, de fevereiro a abril de 2010. No final do primeiro experimento, foi realizada uma avaliação de variáveis fisiológicas relacionadas à fotossíntese e, no segundo experimento, foram realizadas análises periódicas de variáveis relacionadas à fotossíntese ao longo do período experimental.

Nos dois experimentos, a aplicação da deposição de material sólido particulado de ferro e a aplicação do aerosol, tanto marinho quanto com água desionizada, foram realizadas sempre no início da manhã e em dias alternados. Nos dias em que foram realizadas as avaliações não houve aplicação de nenhum tipo de tratamento. Antes da aplicação dos tratamentos (nos dois experimentos realizados), o solo de cada vaso foi coberto com um saco plástico, deixando exposta apenas a parte aérea das plantas. Impedindo, desta forma, a deposição de material particulado de ferro e/ou de solução salina no solo.

A deposição do material sólido particulado de ferro sobre a superfície foliar de plantas de *E. uniflora* foi realizada utilizando-se uma câmara (Figura 1), conforme modelo proposto por Hirano et al. (1995), com algumas modificações (Pereira, 2006).

Ao longo dos dois experimentos, foram realizadas 24 aplicações de material sólido particulado de ferro na superfície das plantas. Durante cada aplicação foram depositados em média $1,09 \text{ mg cm}^{-2}$ de ferro particulado, responsável pela formação de uma fina camada de ferro particulado na superfície das plantas.

A média diária de deposição de material sólido particulado de ferro foi de aproximadamente $0,5 \text{ mg cm}^{-2}$, uma concentração 12 vezes menor que a média de deposição diária encontrada nas áreas ao redor de uma usina de exploração e beneficiamento de minério de ferro ($6 \text{ mg cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) (Lopes et al., 2000).

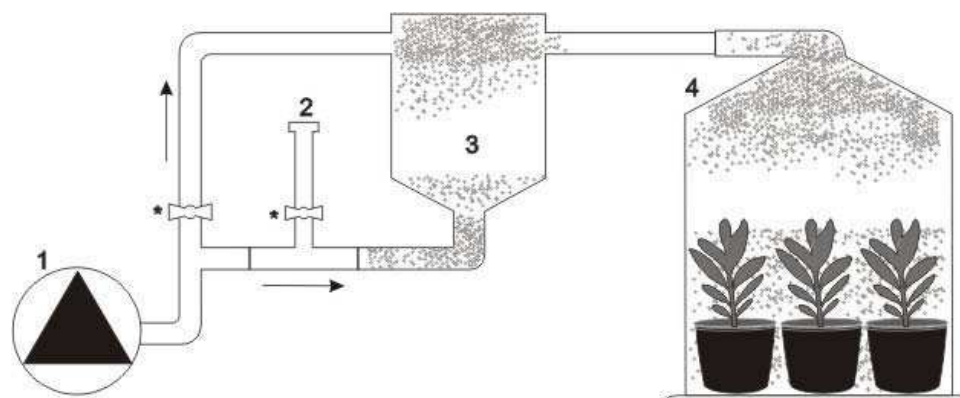


Figura 1: Diagrama da câmara utilizada na aplicação da deposição do material sólido particulado de ferro. O ferro particulado foi introduzido através de uma coluna (2), suspenso pela bomba compressora (1) na câmara de homogeneização (3) e conduzido até a câmara de deposição (4), onde foi lançado sobre as plantas. As setas indicam a direção do fluxo e os asteriscos indicam reguladores de fluxo. Fonte: Pereira, 2006.

A simulação do aerosol marinho e o aerosol com água desionizada foram realizados através da utilização de duas câmaras adaptadas por Alves (1988), a partir do modelo proposto por Evans et al. (1977), uma para a simulação do aerosol marinho e outra para o aerosol com água desionizada. As câmaras eram delimitadas por placas de acrílico transparente e possuíam um volume interno de $2,16 \text{ m}^3$ (1,80 m de altura, 1,20 m de largura e 1,0 m de profundidade). A parte superior de cada câmara apresentava quatro aspersores fixos, com sistema de *spray*, dispostos em um ângulo de 60° . Os

aspersores lançavam homoganeamente sobre as plantas finas gotículas a um fluxo de 83 ml min⁻¹, sob pressão de 4 Kg cm⁻².

As soluções eram colocadas em dois reservatórios, um utilizado somente para solução de sal marinho e outro somente para a água desionizada. As soluções eram conduzidas separadamente através de uma bomba compressora (Motobomba Centrífuga Standard, Eletroplas, Modelo ICS-50) às respectivas câmaras de aspersão onde finas gotículas eram lançadas sobre as plantas. Acima das câmaras, um painel luminoso composto por oito lâmpadas incandescentes de mercúrio (E-27, 220-230V, 250W) fornecia uma densidade de fluxo radiante de 95 W m⁻² s⁻¹.

Antes e depois de cada aplicação, as plantas ficaram expostas ao fluxo radiante oriundo do painel luminoso durante 15 minutos, para induzir a abertura estomática das plantas e garantir que o metabolismo estivesse ativo. Nos dois experimentos, foram realizadas 25 aplicações de aerosol marinho simulado ou de aerosol com água desionizada. Durante cada aplicação, as plantas permaneceram expostas ao aerosol durante 15 minutos, sendo que a aspersão da solução salina ou da água desionizada foi realizada durante 10 segundos, totalizando 0,04 mm dia⁻¹ de precipitação. Após aplicação do aerosol, as plantas foram mantidas em casa de vegetação, sob iluminação natural.

A solução salina utilizada para a simulação do aerosol marinho foi preparada através da dissolução de sal marinho *in natura* em água desionizada (35‰) para a obtenção de uma concentração de sais igual a da água do mar (450 mM).

Tabela 3: Caracterização da composição do sal marinho *in natura* usado para preparar a solução salina utilizada na simulação do aerosol marinho.

Componente	%
Cloreto	59,5
Sódio	38,55
Cálcio	1,35
Sulfato	0,20
Magnésio	0,094
Potássio	0,039
Ferro	< 0,00001

3.3 Variáveis analisadas

Ao final do primeiro experimento, as seguintes variáveis foram analisadas: teor de Fe total, Cl^- , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+ e potencial osmótico total das folhas, determinação das trocas gasosas, do teor de pigmentos fotossintéticos, das variáveis da fluorescência da clorofila *a*, da permeabilidade relativa das membranas celulares e da concentração de malonaldeído. O surgimento de alterações na morfologia das folhas foi acompanhado durante todo o experimento e registrado ao final do período experimental.

No segundo experimento, foram realizadas determinações das variáveis de trocas gasosas e dos valores e imagens da fluorescência da clorofila *a* no dia 0 (anterior ao início da aplicação dos tratamentos) e 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início do experimento. No final do período experimental, foi realizada a coleta de amostras foliares para a determinação do teor de pigmentos fotossintéticos. Ao longo do experimento foi observado o surgimento de alterações morfológicas nas folhas.

No início de cada experimento foi selecionada, em cada planta, uma folha do 3º ou 4º nó, completamente expandida, para a realização das avaliações de trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a* e determinação do teor de pigmentos fotossintéticos.

Antes de cada avaliação, as folhas previamente selecionadas foram limpas através da remoção do material sólido particulado de ferro e/ou de sais presentes na superfície adaxial das folhas, utilizando-se algodão e água desionizada.

Desta forma, no primeiro experimento ocorreu um acúmulo gradual de material sólido particulado de ferro e/ou de sal marinho na superfície das folhas ao longo de todo o período experimental. Entretanto, no segundo experimento não houve um acúmulo gradual de material sólido particulado de ferro e/ou o sal marinho, pois estes eram removidos da superfície foliar a ser analisada antes de cada avaliação.

3.3.1 Composição mineral das folhas

Para a determinação do teor de Fe total, Cl^- , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+ , folhas de *E. uniflora* foram destacadas, lavadas em água corrente e, em seguida, colocadas em solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) segundo a metodologia descrita por Taylor e Crowder (1983) com algumas modificações. As folhas permaneceram na solução de DCB durante 70 minutos sem agitação e, ao final deste período, foram

lavadas em água desionizada. Posteriormente, o material vegetal foi seco em estufa de ventilação forçada, a 75 °C, até atingir peso constante e reduzido a partículas com dimensões menores que 1 mm utilizando-se um moinho tipo Wiley.

Amostras de 200 mg do tecido vegetal seco e moído foram digeridas em solução nitro-perclórica (3:1). As quantificações de Na⁺ e K⁺ foram realizadas por fotometria de chama e as de Fe total, Mg⁺² e Ca⁺² por espectrofotometria de absorção atômica (Malavolta et al., 1989). Para determinação do íon cloro, foi realizada uma extração aquosa (25 mL) em agitador horizontal, a 100 rpm, durante 10 minutos. O extrato foi filtrado em papel Whatman n° 1, e o Cl⁻ presente foi titulado com AgNO₃, tendo como indicador K₂CrO₇ (Malavolta et al., 1989).

3.3.2 Potencial osmótico total

O potencial osmótico total foi determinado a partir do suco celular extraído mecanicamente de folhas congeladas a -20 °C. Foi utilizado o método crioscópico, no qual o ponto de congelamento das amostras foi obtido com auxílio de um microsmomêtro OSMETTE modelo 2007 (Precision Osmete, Precision Systems Inc., Natick, MA, USA).

3.3.3 Avaliação das trocas gasosas

As variáveis: taxa de assimilação líquida de carbono (*A*), condutância estomática (*g_s*), taxa de transpiração (*E*) e razão entre concentração interna e externa de CO₂ (*C_i/C_a*) foram determinadas em folhas completamente expandidas selecionadas no início do experimento. Para a realização destas medições utilizou-se um analisador de gás por infravermelho (IRGA) (LI-6400, LI-COR Biosciences Inc., Lincon, Nebraska, USA).

Antes das avaliações das trocas gasosas as plantas foram expostas a um painel luminoso composto por oito refletores com uma lâmpada halógena linear cada (J-118, 127V, 500W), sob uma irradiância média de 700 μmol m⁻² s⁻¹, durante 30 minutos. Abaixo dos refletores havia uma lâmina de fluxo contínuo de água para evitar o aquecimento do ambiente. As medições foram realizadas entre 7:00 e 11:00 horas sendo este, o melhor horário para a realização das medições, determinado mediante uma curva diária. Foram utilizadas luz actínica (*PAR*) constante (700 μmol fótons m⁻² s⁻¹), concentração atmosférica de CO₂ ambiente (aproximadamente 385 μmol mol⁻¹) e temperatura média de 25 ± 1°C.

3.3.4 Determinação do teor de pigmentos fotossintéticos

Para a determinação dos pigmentos fotossintéticos, 3 discos foliares de 5 mm de diâmetro, coletados na mesma área das folhas utilizadas para a determinação das trocas gasosas, foram pesados e colocados em recipientes de vidro cobertos com papel alumínio, contendo 7 mL de dimetilsulfóxido (DMSO) saturado com carbonato de cálcio. Os recipientes foram armazenados a 6 °C até a realização das etapas seguintes. A extração dos pigmentos foi realizada em banho-maria a 65 °C durante 8 horas (Hiscox e Israelstam, 1979). Foram retiradas de cada amostra 3 alíquotas de 250 µL para leitura da absorvância em leitor de placa de *Elisa* (Asys- UVM 340, Eugendorf, Áustria) a 480, 649 e 665 nm. Os teores de clorofila *a* e de carotenóides foram determinados segundo Wellburn (1994).

3.3.5 Avaliação das variáveis da fluorescência da clorofila *a*

No primeiro experimento, as variáveis de fluorescência da clorofila *a* foram avaliadas através da utilização de um fluorômetro de pulso modulado Mini-PAM (Heinz Walz, Effeltrich, Germany). Na antemanhã, os valores da fluorescência mínima (F_0) foram obtidos através da excitação da área foliar amostrada, adaptada ao escuro, por uma luz vermelha modulada de baixa intensidade ($0,03 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), e a fluorescência máxima (F_m) foi obtida através da aplicação de um pulso de 0,8 s de luz actínica saturante ($>6000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). A fluorescência variável (F_v) foi determinada pela diferença entre F_0 e F_m e o rendimento quântico potencial do FS II (F_v/F_m) (van Kooten e Snel, 1990) foi calculado conforme a equação: $F_v/F_m = F_m - F_0/F_m$.

Após a determinação do F_v/F_m , a área foliar amostrada foi exposta durante 60 segundos à radiação fotossinteticamente ativa (*PAR*) com intensidade de $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Após o período de iluminação, foi aplicado um pulso de luz saturante ($>6000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) por 0,8 segundo. Desta forma, foram determinados os valores da fluorescência em *steady state*, ou seja, da amostra adaptada à luz antes do pulso de saturação (F) e da fluorescência máxima em amostra adaptada à luz (F_m').

Devido ao fato do fluorômetro modulado Mini-PAM não possuir uma fonte de luz vermelho-distante, necessária para a correta determinação da fluorescência mínima adaptada à luz (F_0'), essa variável foi estimada de acordo com o fator de aproximação de Oxborough e Baker (1997): $F_0' = F_0/(F_v/F_m + F_0/F_m)$.

As variáveis da fluorescência da clorofila *a* utilizadas neste trabalho e suas respectivas fórmulas seguem:

$\phi_{II} = (F_m' - F) / F_m'$ - rendimento quântico efetivo do fluxo linear de elétrons no fotossistema II (PSII);

$\phi_{NPQ} = (F / F_m') - (F / F_m)$ - rendimento quântico da dissipação regulada de energia não-fotoquímica no FSII;

$\phi_{NO} = F / F_m$ - rendimento quântico da dissipação não-regulada de energia não-fotoquímica no FSII;

$ETR = Y(II) \times PAR \times 0,5 \times 0,84$ - taxa de transporte de elétrons no FSII;

$qL = (F_m' - F) \cdot F_0' / (F_m' - F_0')$ - *quenching* fotoquímico baseado no modelo *lake*;

No segundo experimento, os valores e as imagens das variáveis de fluorescência da clorofila *a* foram obtidas através da utilização de uma versão Standard do fluorômetro modulado imaging-PAM (Heinz Walz, Effeltrich, Germany).

Após um período de adaptação das plantas ao escuro de aproximadamente 60 minutos, os valores da fluorescência mínima (F_0) foram obtidos pela aplicação de pulsos de luz de $0,5 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de intensidade. Para a determinação dos valores da fluorescência máxima (F_m) foi aplicado um pulso saturante de luz azul (470 nm) de $2400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de intensidade. Estes valores foram utilizados para o cálculo da eficiência quântica máxima do PSII (F_v / F_m) (van Kooten e Snel, 1990).

Após o primeiro pulso de saturação, as folhas foram submetidas à luz actínica ($400 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$) durante o período de 2 minutos e, em seguida, foi aplicado um segundo pulso de saturação de $2400 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para obtenção dos valores das variáveis F e F_m' . A absorbância antes dos pulsos de saturação foi determinada através da emissão de pulsos de luz modulada, com comprimento de onda em 650 nm (vermelho) e 780 nm (próximo ao infra-vermelho).

As imagens dos sinais da fluorescência foram capturadas por uma câmera CCD (Charge Coupled Device) acoplada ao aparelho. Os valores das variáveis foram representados de acordo com uma escala de cor do preto ao rosa abaixo de cada imagem. As variáveis F_0' , qL , ϕ_{II} , ϕ_{NPQ} , ϕ_{NO} foram recalculadas de acordo com as fórmulas descritas anteriormente (Oxborough e Baker, 1997; Kramer et al., 2004; Genty et al., 1989).

Nos dois experimentos, foi utilizada, para a determinação das variáveis da fluorescência da clorofila *a*, a mesma região das folhas utilizada para a determinação da trocas gasosas e posterior análise dos pigmentos fotossintéticos.

As folhas de *E. uniflora* apresentam ondulações que dificultam a medição da fluorescência de imagem da clorofila *a*. Para a realização de uma adequada medição destas variáveis, somente foram consideradas, dentro das áreas amostradas, regiões que se apresentavam planas. As regiões amostradas que apresentavam ondulações não foram consideradas.

3.3.6 Permeabilidade de membranas

A permeabilidade das membranas foi determinada através do extravasamento de eletrólitos (Tarhanen et al., 1999). Dez discos foliares de 5 mm de diâmetro foram colocados em tubos de ensaio com tampa rosqueável, contendo 10 ml de água ultra-pura. Após 24 horas, a condutividade inicial (C_i) foi medida com auxílio de um condutivímetro (MacCann e Solomon, 2000). Posteriormente, os tubos foram colocados em banho-maria a 90 °C durante duas horas e, após este período foi medida a condutividade final (C_f). A permeabilidade relativa foi calculada através da relação $C_i/(C_i+C_f) \times 100$ (Tarhanen et al., 1999).

3.3.7 Conteúdo de malonaldeído (MDA)

A determinação da concentração de malonaldeído acumulado foi realizada em amostras foliares com cerca de 150 mg de tecido vegetal maceradas utilizando-se um triturador automático durante 2 a 3 minutos. Em seguida, adicionou-se 750 μL da solução de extração contendo 1% (p/v) de ácido tricloroacético (TCA). As amostras foram centrifugadas a 15.000 $\times g$ durante 10 minutos, a 4 °C. Foram coletadas amostras de 250 μL dos sobrenadantes, às quais foram adicionados 750 μL da solução de 0,5% (p/v) de ácido tiobarbitúrico (preparado em TCA 20% (p/v)). As amostras e o branco foram incubados a 90 °C, por 20 minutos, sob agitação. Após este período, a reação foi interrompida transferindo-se os tubos para banho de gelo. A absorbância foi medida a 532 e 600 nm em leitor de placa de “Elisa” (Asys- UVM 340, Eugendorf, Áustria). O valor da absorbância de 600 nm foi subtraído do valor correspondente à absorbância de 532 nm e a concentração de MDA foi calculada usando o coeficiente de extinção de 155 $\text{mM}^{-1} \text{cm}^{-1}$ (Heath e Packer, 1968).

3.3.8 Alterações na morfologia foliar

As modificações morfológicas na superfície das folhas, como aparecimento de cloroses ou necroses foram observadas ao longo do experimento e registradas visualmente, comparando-se os tratamentos, no final do período experimental.

3.4 Análises estatísticas

No primeiro experimento, os dados obtidos foram submetidos à análise de variância seguindo a metodologia GLM. A variável tratamentos foi utilizada como medidas independentes, com 4 repetições por tratamento. A comparação das médias obtidas foi realizada através do teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Para analisar os dados obtidos no segundo experimento foi realizado um GLM fatorial com medidas repetidas. Foi utilizada a variável tempo como medidas repetidas (6 níveis) e a variável tratamentos consistiu um fatorial 2x2, sendo dois níveis de aerosol (presença ou ausência de aerosol marinho) e dois níveis de deposição de ferro particulado (presença ou ausência de deposição de material sólido particulado de ferro), com 4 repetições por tratamento. Para as comparações múltiplas das médias obtidas foram realizados testes t a 5% de probabilidade com correção de Bonferroni.

As análises estatísticas dos dois experimentos foram realizadas com a utilização do programa PASW Statistics 18. Os gráficos foram construídos de acordo com os resultados das análises estatísticas através do programa SigmaPlot 11.0.

4. Resultados

4.1 Experimento 1

4.1.1 Composição mineral das folhas

Teores de Fe total, Cl⁻ e Na⁺

A análise dos teores de Fe total, Cl⁻ e Na⁺ indicou que estas variáveis diferiram estatisticamente em resposta aos tratamentos aplicados (P<0,001).

As folhas das plantas submetidas ao aerosol com água desionizada e ao aerosol marinho simulado (tratamentos H₂O e AM) apresentaram teores de Fe total estatisticamente iguais ao observado no controle (Figura 2-A).

Nas plantas expostas aos tratamentos MSP_{Fe} , $\text{H}_2\text{O}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$ e $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$ foi observado um aumento significativo no teor de Fe total. As plantas dos tratamentos MSP_{Fe} e $\text{H}_2\text{O}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$ apresentaram uma concentração total de Fe nas folhas 6,7 vezes maior que o observado no controle ($0,078 \text{ mg g}^{-1} \text{ MS}$). Este aumento foi mais acentuado nas folhas das plantas expostas ao tratamento $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$ que acumularam 11 vezes mais Fe total que o verificado nas folhas das plantas do controle (Figura 2-A).

Em relação ao teor de Cl^- nas folhas, foi observado um aumento significativo nas plantas em resposta à simulação do aerosol marinho. As folhas das plantas submetidas aos tratamentos AM e $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$ acumularam, respectivamente, 1,7 e 3,1 vezes mais Cl^- que o observado no controle ($0,50 \text{ mg g}^{-1} \text{ MS}$). Não foram verificadas alterações significativas no teor de Cl^- entre as plantas submetidas aos tratamentos H_2O , MSP_{Fe} e $\text{H}_2\text{O}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$ e as plantas do controle (Figura 2-B).

Não houve variação significativa no teor Na^+ presente nas folhas das plantas submetidas aos tratamentos H_2O , $\text{H}_2\text{O}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$ e AM em comparação com as do controle. Foram observadas diferenças significativas no teor de Na^+ nas plantas dos tratamentos MSP_{Fe} e $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$. As folhas das plantas submetidas ao tratamento MSP_{Fe} apresentaram um pequeno decréscimo no teor de Na^+ , enquanto as folhas das plantas expostas ao tratamento $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$ apresentaram um aumento significativo em relação ao controle. As folhas das plantas submetidas ao tratamento $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$ acumularam 3 vezes mais Na^+ que as plantas do controle e dos demais tratamentos que acumularam em média $0,371 \text{ mg g}^{-1} \text{ MS}$ (Figura 2- C).

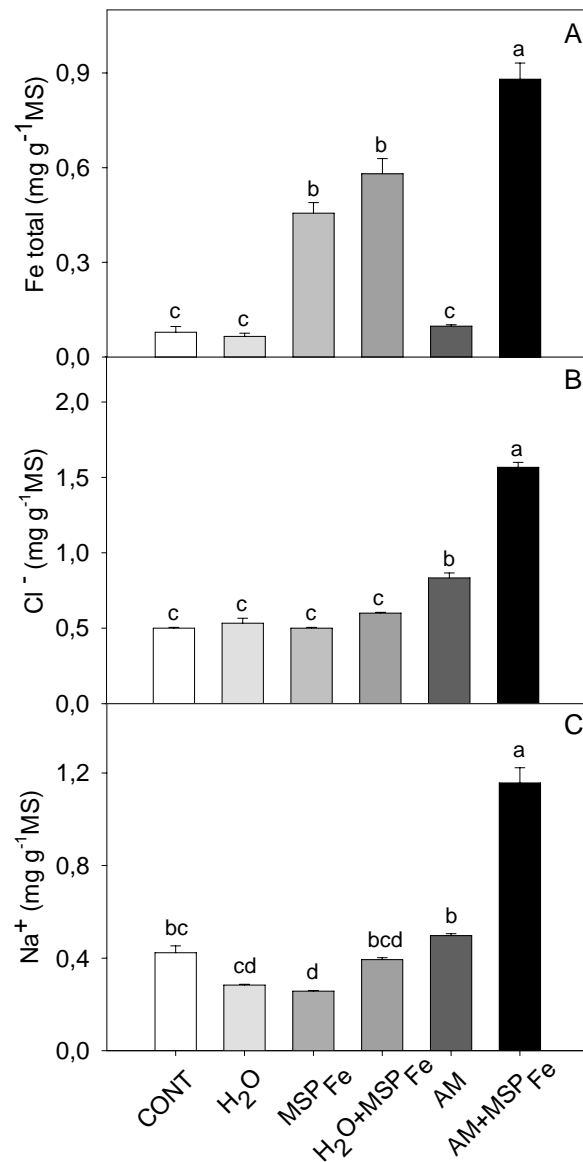


Figura 2: Teores de Fe total (A), Cl⁻ (B) e Na⁺ (C) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H₂O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H₂O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP_{Fe}). Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos.

Teores de Ca⁺², Mg⁺² e K⁺

Os teores de Ca⁺², Mg⁺² e de K⁺ apresentaram diferenças significativas entre as plantas dos tratamentos analisados (P<0,01; P<0,01 e P=0,05, respectivamente). Os

teores de Ca^{+2} das folhas das plantas submetidas aos tratamentos H_2O , MSP_{Fe} , e $\text{H}_2\text{O}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$ foram estatisticamente iguais ao das plantas do controle ($14,20 \text{ mg g}^{-1} \text{ MS}$). Nas plantas expostas aos tratamentos com simulação do aerosol marinho (AM e $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$), foi observada uma redução significativa no teor de Ca^{+2} em comparação com o verificado no controle. As plantas expostas a estes tratamentos (AM e $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$) apresentaram, em média, uma diminuição na concentração de Ca^{+2} de 25% em relação as plantas do controle (Figura 3-A).

Foi observado um decréscimo significativo, de 16,93%, no teor de Mg^{+2} presente nas folhas das plantas submetidas ao tratamento $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$ em comparação com o controle, no qual o valor observado foi de $3,13 \text{ mg g}^{-1} \text{ MS}$. Não foram observadas variações significativas entre os teores Mg^{+2} das folhas das plantas dos outros tratamentos e do controle (Figura 3-B).

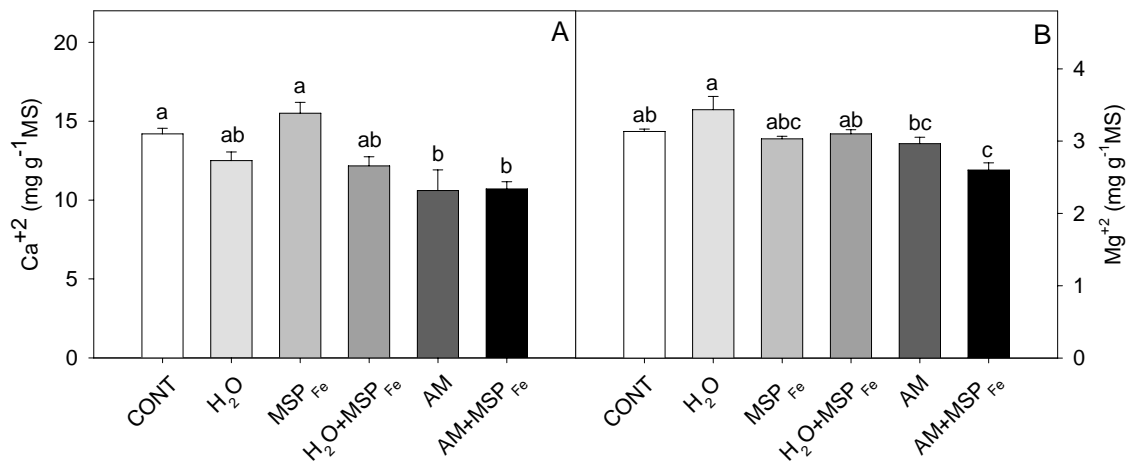


Figura 3: Teores de Ca^{+2} (A) e Mg^{+2} (B) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H_2O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro ($\text{H}_2\text{O}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro ($\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$). Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos.

Não foram observadas alterações significativas nos teores de K^{+} dos tecidos foliares em decorrência dos tratamentos que, apresentaram valores estatisticamente iguais ao observado nas plantas do controle ($11,27 \text{ mg g}^{-1} \text{ MS}$) (Figura 4).

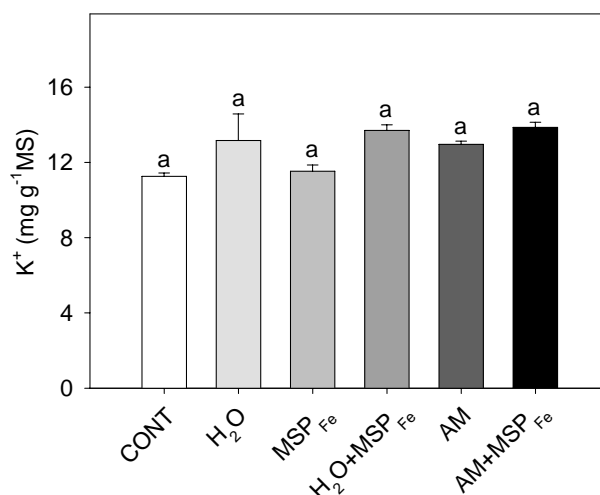


Figura 4: Teores de K⁺ em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H₂O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H₂O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP_{Fe}). Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos.

4.1.2 Potencial osmótico total

Apesar da variação na composição mineral das folhas, não foram observadas diferenças estatísticas no potencial osmótico do suco celular (Ψ_s) em resposta aos tratamentos analisados ($P=0,797$). As plantas dos tratamentos e do controle apresentaram, em média, o Ψ_s de -1,65 MPa (Figura 5).

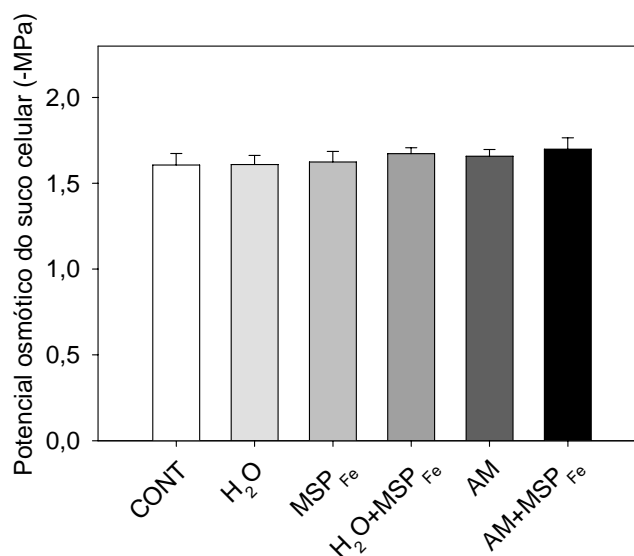


Figura 5: Potencial osmótico total de folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H₂O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H₂O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP_{Fe}). As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos.

4.1.3 Avaliação das trocas gasosas

Foram observadas alterações significativas na taxa assimilatória líquida de carbono (A) ($P < 0,001$), na condutância estomática (g_s) ($P < 0,01$), na razão entre a concentração interna e externa de CO₂ (C_i/C_a) ($P < 0,001$) e na transpiração (E) ($P = 0,01$) entre os tratamentos estudados.

As plantas expostas à deposição de material sólido particulado de ferro em conjunto com o aerosol com água desionizada ou com o aerosol marinho simulado (H₂O+MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}) apresentaram reduções significativas na A em comparação com o observado no controle. As plantas dos tratamentos H₂O+MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe} apresentaram, respectivamente, a média fotossintética de 3,94 e 2,79 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, o que representa uma redução de 45,2 e 61,2% em relação ao controle (7,19 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). As plantas submetidas aos tratamentos H₂O, AM e MSP_{Fe} não apresentaram alterações significativas na A , em comparação com as plantas do controle (Figura 6-A).

A avaliação da g_s indicou que as plantas submetidas ao tratamento AM+MSP_{Fe} apresentaram uma redução significativa de 44,4% em relação às plantas do controle (0,074 mol m⁻² s⁻¹). Os valores da g_s das plantas expostas aos demais tratamentos (H₂O, MSP_{Fe}, H₂O+MSP_{Fe} e AM) não diferiram estatisticamente do valor médio obtido nas plantas do controle (Figura 6-B).

As plantas submetidas aos tratamentos com deposição de ferro particulado (MSP_{Fe}, H₂O+MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}) apresentaram um aumento significativo na razão C_i/C_a em comparação com o verificado no controle. Nas plantas dos tratamentos MSP_{Fe}, H₂O+MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe} foram verificados, respectivamente, incrementos na razão C_i/C_a de 15,8; 24,6 e 26,2% em relação ao observado nas plantas do controle (0,557). Não foram observadas diferenças significativas na razão C_i/C_a das plantas submetidas aos tratamentos H₂O e AM e das plantas do controle (Figura 6-C).

Foi observado nas plantas submetidas ao tratamento AM+MSP_{Fe} um decréscimo significativo na E de 39,6% em relação às plantas do controle (0,971 mmol m⁻² s⁻¹). Os valores da E das plantas expostas aos tratamentos H₂O, MSP_{Fe}, H₂O+MSP_{Fe} e AM foram estatisticamente iguais aos observados no controle (Figura 6-D).

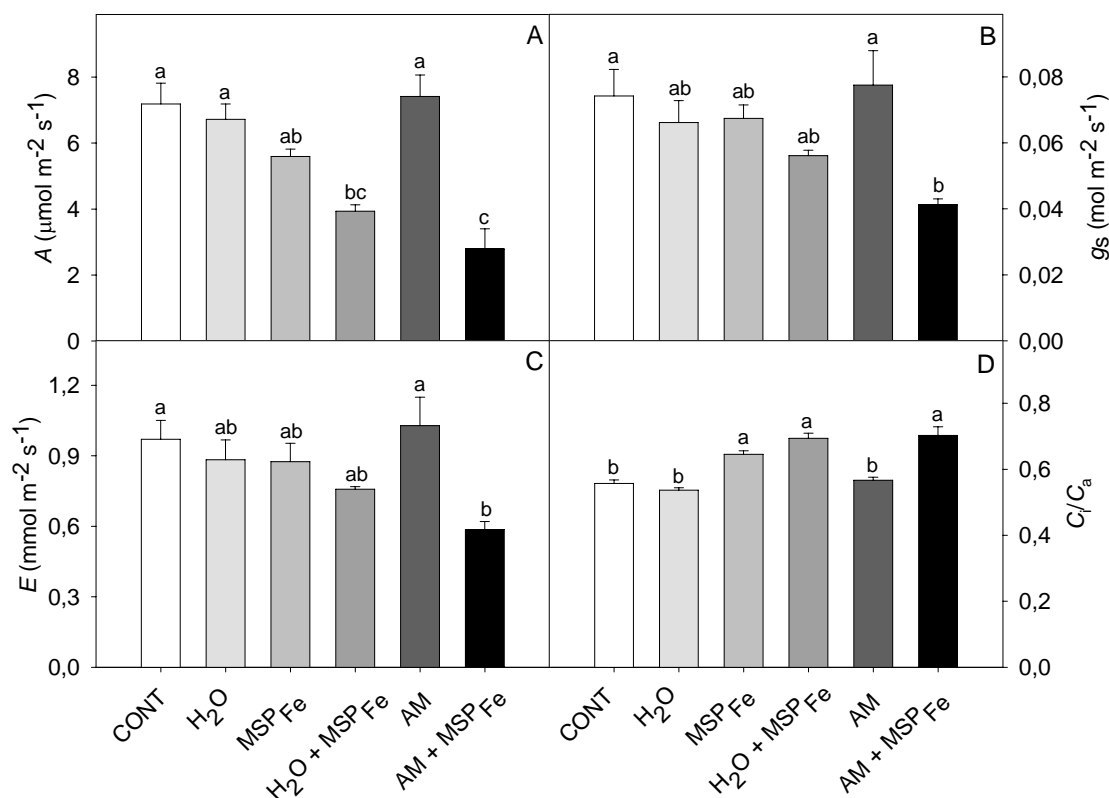


Figura 6: Taxa de assimilação líquida de carbono - A (A), condutância estomática - g_s (B), razão entre a concentração interna e externa de CO_2 - C_i/C_a (C) e transpiração - E (D) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H_2O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro ($\text{H}_2\text{O}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+ MSP_{Fe}). Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos.

4.1.4 Determinação do teor de pigmentos fotossintéticos

Não houve variação significativa nos teores de clorofila a entre as folhas dos tratamentos analisados e do controle ($P=0,483$), no qual o valor médio observado foi de $1,55 \text{ mg g}^{-1} \text{ MF}$ (Figura 7-A).

Os teores de carotenóides diferiram estatisticamente entre as plantas dos tratamentos analisados ($P<0,05$). As folhas das plantas submetidas ao tratamento H_2O apresentaram teores de carotenóides significativamente maiores que os das plantas dos

tratamentos H_2O+MSP_{Fe} e $AM+MSP_{Fe}$ embora, não tenha sido observada diferença estatística entre os valores das folhas submetidas aos tratamentos e o controle ($0,293 \text{ mg g}^{-1} \text{ MF}$)(Figura 7-B).

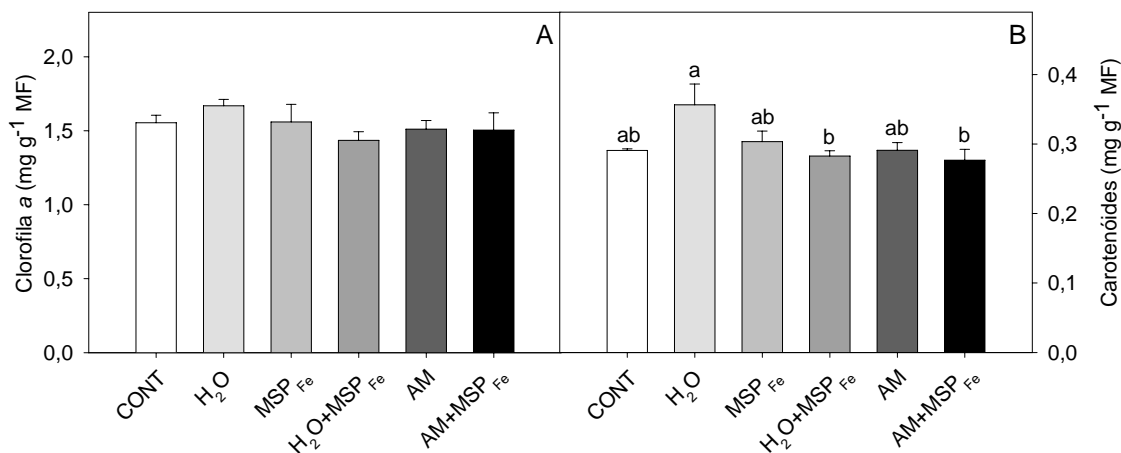


Figura 7: Teores de clorofila *a* (A) e carotenóides (B) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H_2O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H_2O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro ($AM+MSP_{Fe}$). Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos.

4.1.5 Avaliação das variáveis da fluorescência da clorofila *a*

Não foram observadas variações significativas nos valores da eficiência quântica máxima do PS II (F_v/F_m) entre as folhas dos tratamentos analisados e do controle ($P=0,044$), no qual o valor de F_v/F_m observado foi de 0,807 (Figura 8).

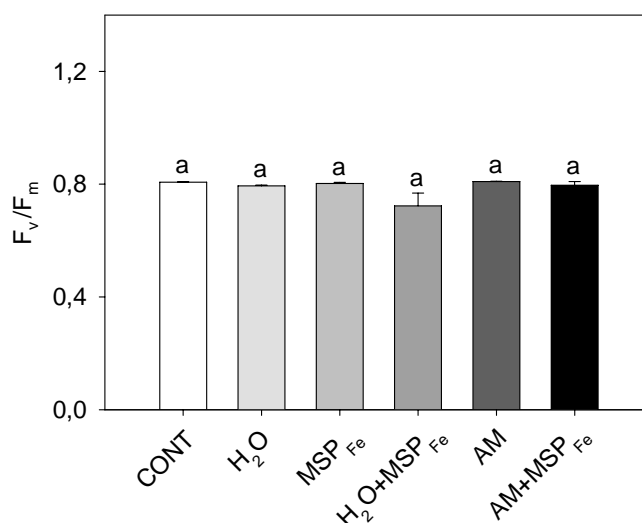


Figura 8: Eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H₂O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H₂O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP_{Fe}). Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos.

Foram observadas alterações significativas no rendimento quântico efetivo do PSII (ϕ II) entre as plantas dos tratamentos e do controle ($P < 0,001$). As folhas das plantas submetidas aos tratamentos H₂O, MSP_{Fe} e AM apresentaram o ϕ II estatisticamente igual ao observado no controle (0,426) (Tabela 2). Nestas plantas, o ϕ II foi responsável pela dissipação média de 41,8% de energia (Figura 9).

Os tecidos foliares das plantas submetidas aos tratamentos H₂O+MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}, expostas à deposição de material sólido particulado de ferro e ao aerosol marinho simulado ou ao aerosol com água desionizada, apresentaram uma diminuição significativa no ϕ II. O decréscimo nos valores do ϕ II foram de 40,4% nas plantas do tratamento H₂O+MSP_{Fe} e de 38% nas plantas do tratamento AM+MSP_{Fe} em comparação com o controle (Tabela 2). A média da dissipação energética do ϕ II observada nas plantas destes tratamentos foi de 25,5% (Figura 9).

Não foram observadas diferenças estatísticas nos valores do ϕ NPQ entre as plantas dos tratamentos analisados e do controle ($P = 0,081$) (Tabela 4). A porcentagem

dos valores da dissipação energética das plantas dos tratamentos H₂O+MSP_{Fe}, AM+MSP_{Fe} e AM foram de 30%, 35% e 24%, respectivamente. Nas plantas do controle este valor foi de 29% (Figura 9).

Em relação ao ϕ NO, não houve variação significativa entre os valores das folhas das plantas submetidas aos tratamentos e o verificado no controle (P=0,082) (Tabela 4). Nas plantas dos tratamentos MSP_{Fe}, H₂O+MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe} a dissipação energética através do ϕ NO foi de 33%, 34% e 39%. Nas plantas do controle e dos tratamentos H₂O e AM a média deste valor foi de 29% (Figura 9).

Tabela 4: Rendimento quântico efetivo do fotossistema II (ϕ II), rendimento quântico da dissipação regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ NPQ) e rendimento quântico da dissipação não-regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ NO) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H₂O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H₂O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP_{Fe}). Os dados representam a média de 4 repetições \pm o erro padrão da média.

	ϕ II	ϕ NPQ	ϕ NO
CONT	0,426 \pm 0,030 ab	0,286 \pm 0,050	0,289 \pm 0,020
H₂O	0,422 \pm 0,013 ab	0,296 \pm 0,021	0,282 \pm 0,008
MSP_{Fe}	0,361 \pm 0,009 b	0,306 \pm 0,006	0,332 \pm 0,004
H₂O+MSP_{Fe}	0,254 \pm 0,022 c	0,393 \pm 0,047	0,353 \pm 0,038
AM	0,461 \pm 0,011 a	0,241 \pm 0,011	0,298 \pm 0,001
AM+MSP_{Fe}	0,264 \pm 0,009 c	0,348 \pm 0,042	0,387 \pm 0,049

Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

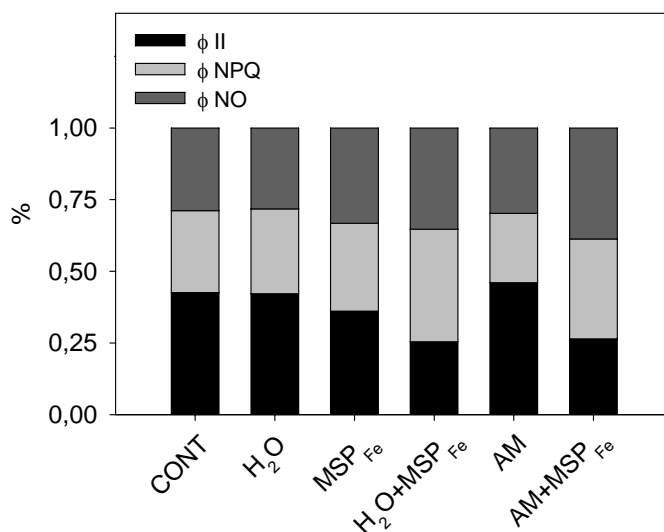


Figura 9: Distribuição percentual da dissipação energética em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H₂O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H₂O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP_{Fe}). Rendimento quântico efetivo do fotossistema II (ϕ II), rendimento quântico da dissipação regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ NPQ) e rendimento quântico da dissipação não-regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ NO).

Em relação à taxa linear de transporte de elétrons no fotossistema II (ETR), foram verificadas variações significativas entre as plantas dos tratamentos e do controle ($P < 0,001$). Observou-se que as folhas das plantas submetidas aos tratamentos H₂O, MSP_{Fe} e AM, apresentaram valores de ETR estatisticamente iguais ao observado no controle. As folhas das plantas submetidas aos tratamentos H₂O+MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe} apresentaram uma diminuição significativa nos valores de ETR quando comparados com o valor médio obtido nas plantas do controle. Esta redução foi de 34,5% nas plantas submetidas ao tratamento H₂O+MSP_{Fe} e de 38,6% nas plantas submetidas ao tratamento AM+MSP_{Fe} (Figura 10).

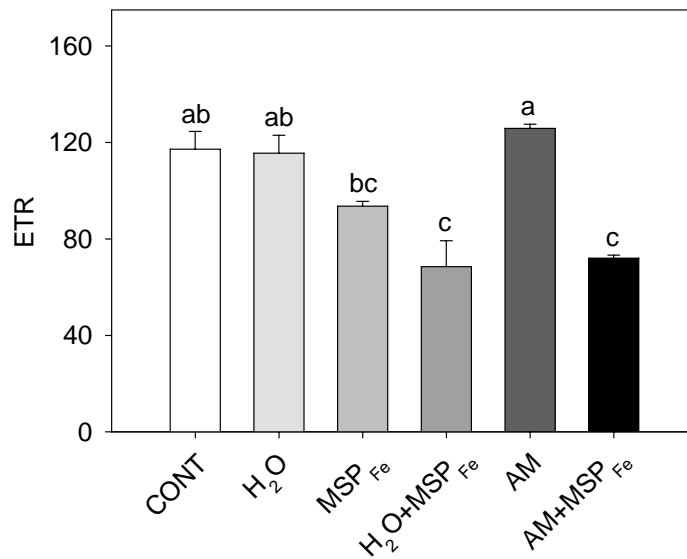


Figura 10: Taxa linear de transporte de elétrons no fotossistema II (ETR) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H₂O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H₂O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP_{Fe}). Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos.

Foram verificadas alterações significativas *quenching* fotoquímico (qL) entre as plantas dos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro e do controle ($P < 0,001$). Nas folhas das plantas submetidas aos tratamentos MSP_{Fe} e H₂O+MSP_{Fe} foi observado, respectivamente, um decréscimo em qL de 17,6 e 20,1% em relação ao controle. Esta diminuição foi mais acentuada nas folhas das plantas submetidas ao tratamento AM+MSP_{Fe} que apresentaram um redução de 48,2% em relação às folhas das plantas do controle. As folhas das plantas submetidas aos tratamentos H₂O e AM apresentaram valores do qL estatisticamente iguais ao observado no controle (Figura 11).

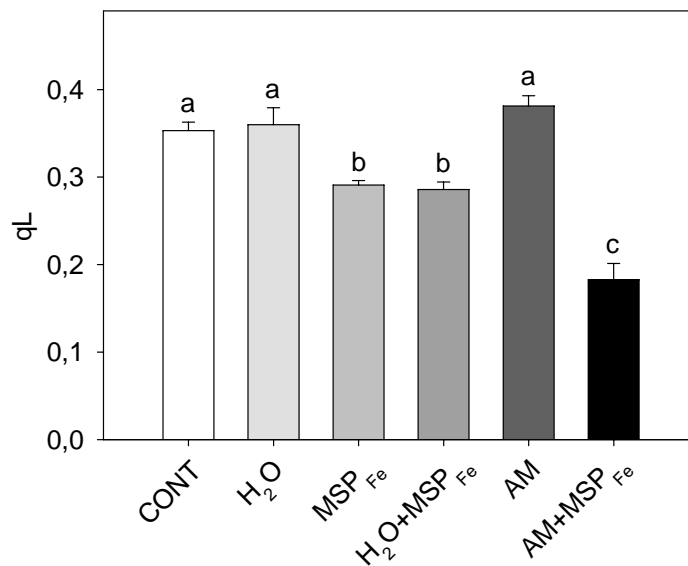


Figura 11: *Quenching* fotoquímico (qL) dos tecidos foliares de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H₂O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H₂O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP_{Fe}). Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos.

4.1.6 Permeabilidade de membranas e conteúdo de malonaldeído (MDA)

Não foi observada nenhuma variação significativa na permeabilidade relativa de membranas, medida com base na perda de eletrólitos, entre as plantas dos tratamentos analisados e do controle ($P=0,170$). As plantas dos tratamentos e do controle apresentaram em média a permeabilidade relativa de 16,5% (Figura 12-A).

A análise do conteúdo de malonaldeído (MDA) acumulado indicou a ocorrência de alterações significativas entre as plantas dos tratamentos e do controle ($P<0,001$). O conteúdo de MDA foi mais elevado nas plantas submetidas aos tratamentos AM+MSP_{Fe} e AM que apresentaram um aumento respectivo de 48,31 e 90,2% em relação ao controle. No entanto, somente os valores das plantas do tratamento AM diferiram estatisticamente do valor observado no controle. As folhas das plantas dos tratamentos H₂O, MSP_{Fe} e H₂O+MSP_{Fe} apresentaram concentrações de MDA estatisticamente iguais as do controle (7,55 nmol g⁻¹MF) (Figura 12-B).

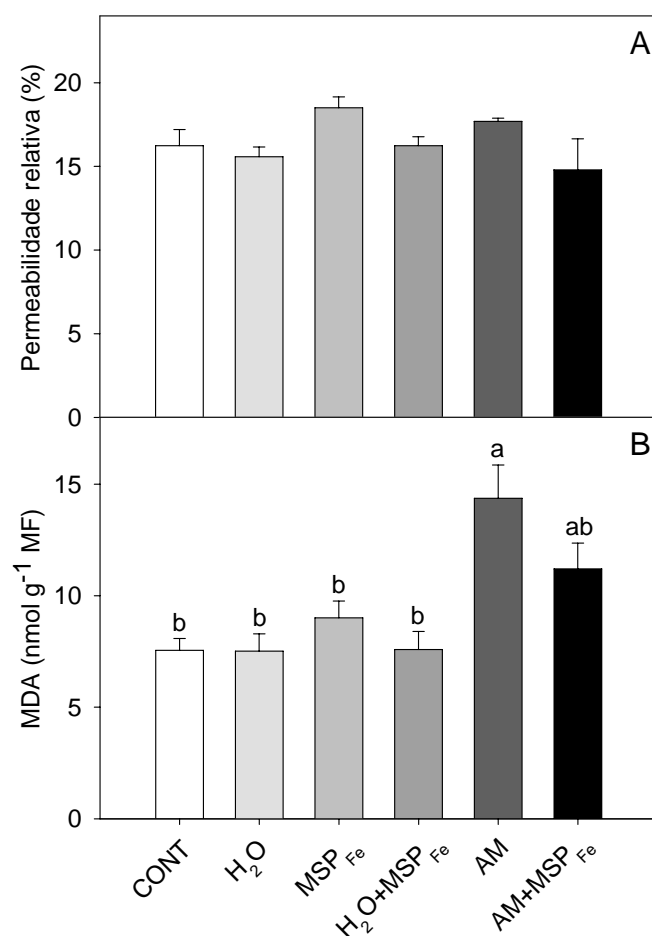


Figura 12: Permeabilidade relativa (A) e concentração de malonaldeído - MDA (B) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle (CONT), aerosol com água desionizada (H₂O), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro (H₂O+MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro (AM+MSP_{Fe}). Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos.

4.1.7 Alterações na morfologia foliar

A deposição de material sólido particulado de ferro foi responsável pela formação de uma camada de ferro particulado na superfície das folhas (Figura 13-C, D e F). A aplicação do aerosol marinho simulado acarretou, nas plantas do tratamento AM, a formação de pequenos cristais de sal na superfície das folhas (Figura 13-E).

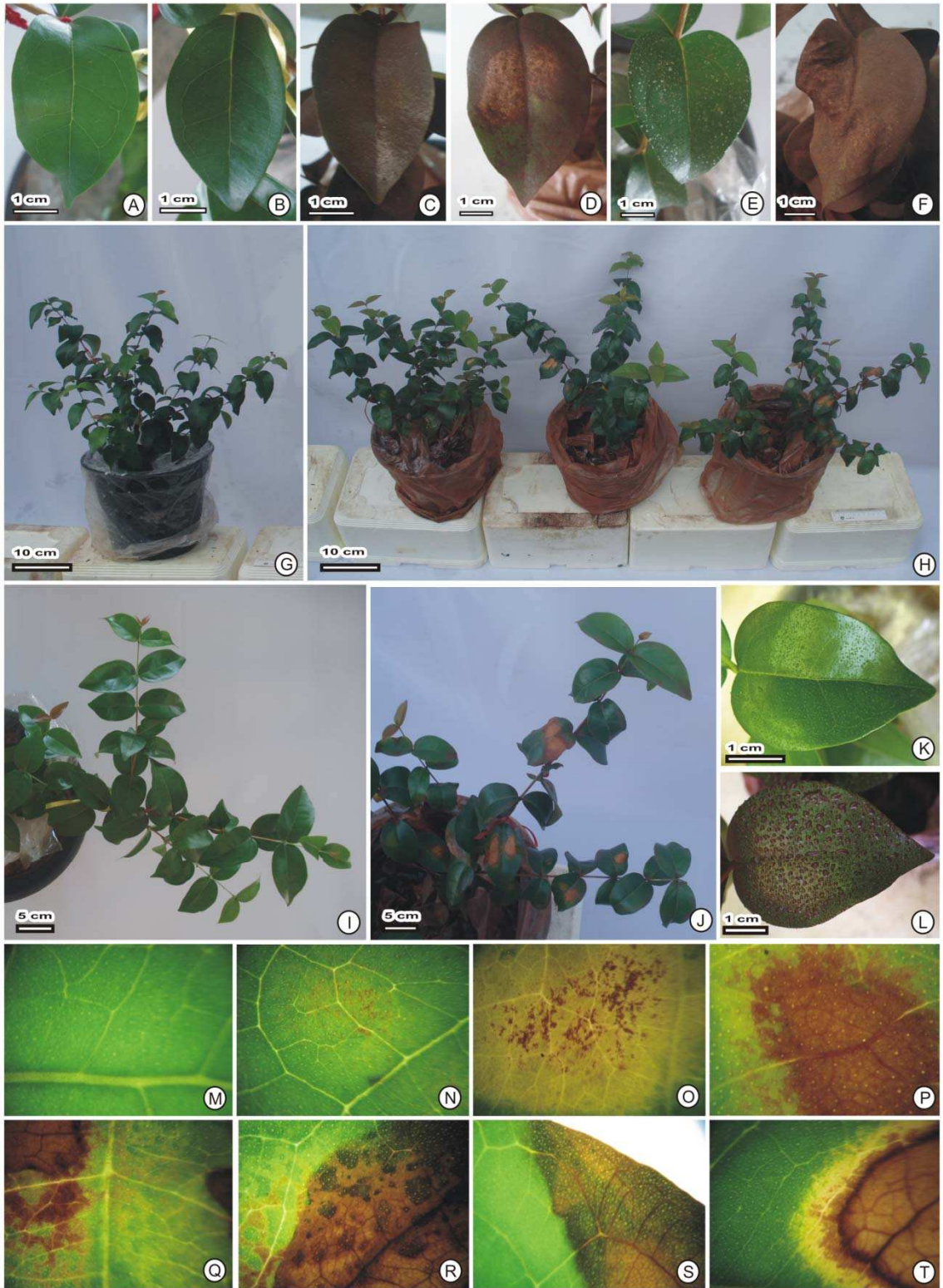
A simulação do aerosol causou a formação de pequenas gotículas de água desionizada ou de solução salina na superfície foliar das plantas (Figura 13-K). Nos tratamentos H_2O+MSP_{Fe} e $AM+MSP_{Fe}$, as gotículas formadas pela aplicação do aerosol nas folhas cobertas por ferro particulado concentraram o material particulado, aplicado no dia anterior, em pequenos pontos por toda a extensão do limbo foliar (Figura 13-L).

Foi observado, ao longo do experimento, o surgimento de cloroses que evoluíram rapidamente para necroses nos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe} , H_2O+MSP_{Fe} e $AM+MSP_{Fe}$) (Figura 13-G a J e Figura 13-N a T). Estas alterações morfológicas ocorreram na região entre e nervura central e a margem do limbo foliar, avançando em direção à margem das folhas.

Estas alterações foram mais pronunciadas nas plantas do tratamento $AM+MSP_{Fe}$, que apresentaram o maior número e extensão das lesões foliares seguidas pelas plantas do tratamento H_2O+MSP_{Fe} (Figura 13- G a J). Nas plantas submetidas ao tratamento AM foi verificada a ocorrência de um número reduzido de necroses nas folhas com desenvolvido foliar mais avançado. Nas plantas submetidas ao aerosol com água desionizada (tratamento H_2O) não foram observadas alterações na morfologia foliar das plantas em decorrência dos tratamentos.

Nas plantas dos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro, o surgimento de cloroses e necroses também foi observado nas folhas selecionadas para as avaliações de trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a* e para a determinação do teor de pigmentos fotossintéticos. No entanto, a área da superfície foliar utilizada para a realização destas análises não apresentava alterações visuais.

Figura 13: Alterações na morfologia foliar de plantas de *Eugenia uniflora* após 55 dias de exposição aos tratamentos: controle- CONT (A), aerosol com água desionizada - H₂O (B), deposição de material sólido particulado de ferro - MSP_{Fe} (C), aerosol com água desionizada e deposição de material sólido particulado de ferro - H₂O+MSP_{Fe} (D), aerosol marinho simulado - AM (E) e aerosol marinho simulado e deposição de material sólido particulado de ferro - AM+MSP_{Fe} (F). Aspecto geral de uma planta do CONT (G). Aspecto geral, da esquerda para a direita, de plantas dos tratamentos MSP_{Fe}, H₂O+MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe} (H). Detalhe de uma planta do controle (I) e de uma planta do tratamento AM+MSP_{Fe} (J). Aspecto geral de folhas após a simulação do aerosol, na ausência da deposição de ferro particulado (K) e na presença da deposição de ferro particulado (L). Detalhe de uma região sadia de uma folha do controle (M) e detalhes de regiões foliares com alterações visuais em resposta à deposição de ferro particulado (N-T). Imagens (M-T): aumento 52x.



4.2 Experimento 2

4.2.1 Avaliação das trocas gasosas

A avaliação dos valores da A indicou o efeito significativo da interação entre o tempo e a deposição de material sólido particulado de ferro (Tabela 5). Os valores da A das plantas que não foram expostas à deposição de ferro particulado (tratamentos AM e CONT) foram estatisticamente iguais, durante todo o experimento, ao valor observado no dia 0 ($6,11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Os valores da A das plantas submetidas à deposição de ferro particulado (tratamentos MSP_{Fe} e $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$) observados no 7º e 49º dias de experimento diferiram significativamente dos valores observados no 35º e no 56º dias de experimento. Entretanto, não foram observadas diferenças significativas entre o valor observado no dia 0 ($5,67 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e os valores verificados ao longo do período experimental.

No 35º dia de experimento verificou-se um aumento significativo de 60,31 % na A das plantas submetidas à deposição de material sólido particulado de ferro em relação às plantas que não receberam deposição de ferro particulado nas quais, o valor médio observado foi de $3,83 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Nas outras avaliações, realizadas no dia 0 e no 7º, 21º, 49º e no 56º dias de experimento, não foram observadas alterações significativas entre os valores da A das plantas expostas ou não à deposição de ferro particulado (Figura 14).

Não foram encontradas diferenças significativas nos valores da A em resposta ao efeito principal da deposição de material sólido particulado de ferro, ao efeito principal do aerosol marinho simulado, à interação do aerosol marinho simulado e da deposição de ferro particulado, à interação entre o tempo e o aerosol marinho simulado e à interação entre o tempo, o aerosol marinho simulado e a deposição de ferro particulado (Tabela 5).

Tabela 5: Resultado da análise GLM fatorial com medidas repetidas das variáveis de trocas gasosas: taxa de assimilação líquida de carbono (A), condutância estomática (g_s), razão entre a concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a) e transpiração (E) de plantas de *Eugenia uniflora* 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos: controle (CONT), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e deposição material sólido particulado de ferro e aerosol marinho simulado ($\text{MSP}_{\text{Fe}}+\text{AM}$).

	A	g_s	C_i/C_a	E
MSP_{Fe}	n.s.	*	***	*
AM	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
$\text{MSP}_{\text{Fe}}*\text{AM}$	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Tempo	***	***	***	***
$\text{MSP}_{\text{Fe}}*\text{Tempo}$	***	***	***	***
AM*Tempo	n.s.	**	**	*
$\text{MSP}_{\text{Fe}}*\text{AM}*\text{Tempo}$	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Nível de significância: $P < 0,05$ (*), $P < 0,01$ (**), $P < 0,001$ (***), não significativo (n.s.).

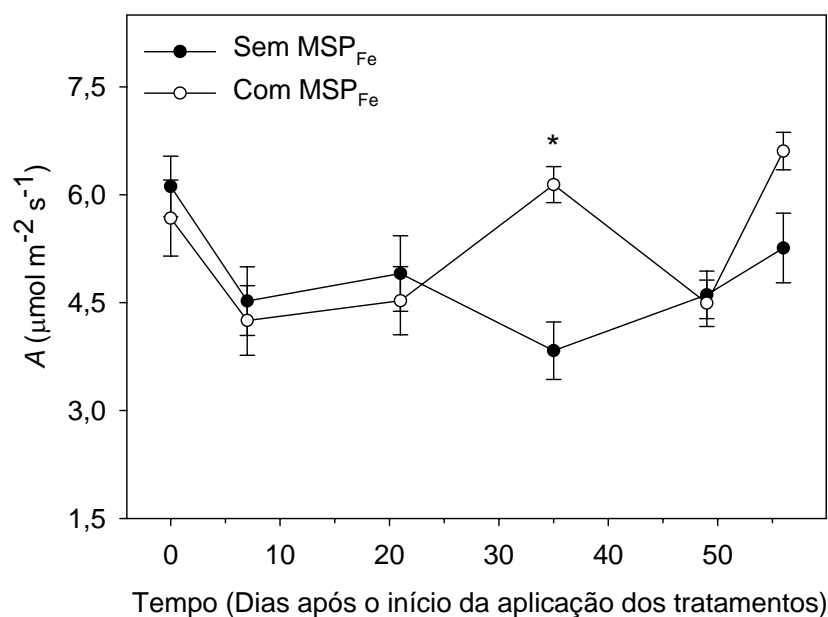


Figura 14: Taxa de assimilação líquida de carbono (A) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 0, 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos sem deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos AM e CONT) e dos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos MSP_{Fe} e $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$). As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos. (*) significa que as médias dos tratamentos diferem significativamente entre si pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade com correção de Bonferroni.

Em relação à g_s , foi verificado o efeito significativo da interação entre o tempo e a deposição de material sólido particulado de ferro (Tabela 5). Nas plantas dos tratamentos em que não houve deposição de ferro particulado os valores da g_s observados no 7º e no 35º dias de experimento diferiram estatisticamente dos valores observados no 49º e 56º dia, no entanto, os valores da g_s , observados durante o experimento foram estatisticamente iguais ao observado no dia 0 ($0,039 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 15-A).

As plantas dos tratamentos com deposição de ferro particulado apresentaram um aumento significativo na g_s a partir do 35º dia de experimento. A média dos valores da g_s observados no 35º e 49º dia foi 1,6 vezes maior que o valor obtido no dia 0 ($0,035 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Este aumento foi mais acentuado no 56º dia de experimento no qual as plantas submetidas à deposição de ferro particulado apresentaram o valor de g_s 2,4 vezes maior que o observado no dia 0 (Tabela 15-A).

No 35º dia de experimento, as plantas que receberam a deposição de ferro particulado apresentaram um aumento significativo de 83,9% na g_s em comparação com o valor médio das plantas que não receberam a deposição de ferro particulado ($0,031 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). No 56º dia de experimento este aumento foi de 51,9% em relação ao valor médio das plantas que não foram submetidas à deposição de ferro particulado ($0,054 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Os valores da g_s das plantas expostas ou não à deposição de ferro particulado verificados nas outras datas de amostragem foram estatisticamente iguais (Figura 15-A).

A análise dos valores da g_s indicou também a significância da interação entre o aerosol marinho simulado e o tempo (Tabela 5). As plantas dos tratamentos CONT e MSP_{Fe} que não receberam a simulação do aerosol marinho, apresentaram no 56º dia de experimento, um valor de g_s estatisticamente maior que o valor observado 7 e 21 dias após o início do experimento. Entretanto não foram observadas diferenças significativas entre o valor observado no dia 0 ($0,038 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e os valores observados ao longo do período experimental (Figura 15-B).

Os valores da g_s das plantas submetidas ao aerosol marinho simulado (tratamentos AM e $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$) observados ao longo do período de aplicação dos tratamentos não diferiram do valor observado no dia 0 ($0,036 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 15-B).

Apesar do efeito significativo da interação entre o tempo e o nevoeiro marinho simulado, o teste t não identificou alterações significativas entre os valores médios de g_s das plantas submetidas aos tratamentos com aplicação do nevoeiro marinho simulado (tratamentos AM e AM+MSP_{Fe}) e sem aplicação do nevoeiro marinho (tratamentos MSP_{Fe} e CONT) (Tabela 5).

O efeito principal da deposição de material sólido particulado de ferro, o efeito principal do aerosol marinho simulado, a interação do aerosol marinho simulado e da deposição de ferro particulado e a interação entre o tempo, o aerosol marinho simulado e a deposição de ferro particulado não foram significativos para os valores da g_s (Tabela 5).

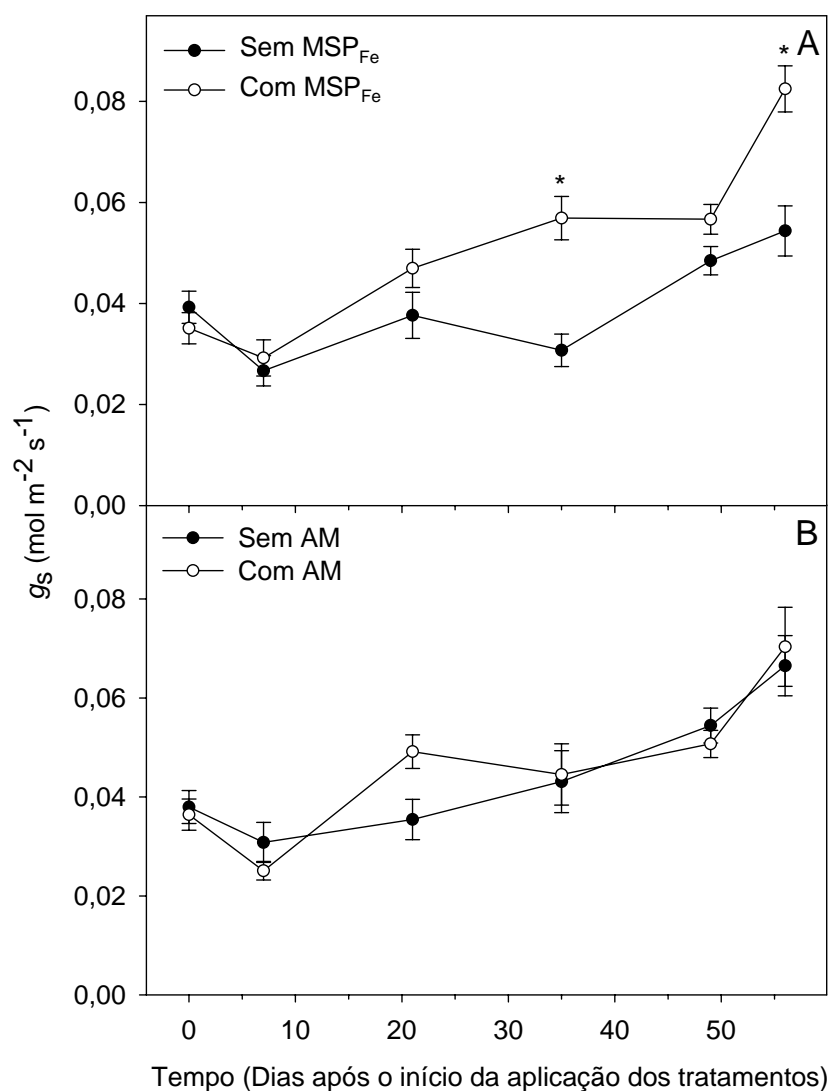


Figura 15: Condutância estomática (g_s) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 0, 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos sem deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos AM e CONT) e dos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}) (A) e dos tratamentos sem aerosol marinho simulado (MSP_{Fe} e CONT) e com aerosol marinho simulado (AM e AM+MSP_{Fe}) (B). As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos. (*) significa que as médias dos tratamentos diferem significativamente entre si pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade com correção de Bonferroni.

A análise dos valores da razão C_i/C_a indicou o efeito significativo da interação entre o tempo e a deposição material sólido particulado de ferro (Tabela 5). As plantas que não receberam a deposição de ferro particulado apresentaram um aumento significativo nos valores da C_i/C_a a partir do 35º dia de experimento, em comparação

com o valor observado no dia 0. No 35º, 49º e 56º dias de experimento este aumento foi, em média, de 60,7% em relação ao verificado no dia 0 (0,336) (Figura 16-A).

Comparando os valores da razão C_i/C_a ao longo do experimento, foi observado, em resposta à deposição de ferro particulado, um aumento significativo na razão C_i/C_a a partir do 21º dia de experimento. As plantas expostas à deposição de ferro particulado apresentaram no 21º, 35º, 49º e no 56º dias de experimento um aumento médio de 74,2% em relação ao valor observado no dia 0 (0,346) (Figura 16-A).

Os valores da razão C_i/C_a das plantas expostas ou não a deposição de ferro particulado não diferiram entre si no dia 0. A partir do 7º dia de experimento foi observado um aumento nos valores da razão C_i/C_a das plantas expostas à deposição de material sólido particulado de ferro em comparação com o valor observado nas plantas que não receberam a deposição de ferro particulado (Figura 16-A). Este aumento foi mais acentuado no 21º dia de experimento (32,9%).

A interação entre o aerosol marinho simulado e o efeito principal do tempo foi significativa (Tabela 3). As plantas dos tratamentos sem simulação do aerosol marinho apresentaram, a partir do 35º dia, um aumento nos valores da razão C_i/C_a em relação ao valor observado no dia 0 (0,336). No 35º, 49º e 56º dias de experimento, este aumento foi, em média, de 67,5% (Figura 16-B).

A simulação do aerosol marinho acarretou um aumento significativo nos valores da razão C_i/C_a a partir do 21º dia de experimento. A média dos valores de C_i/C_a das plantas expostas ao aerosol marinho simulado no 21º, 35º, 49º e no 56º dias de experimento foi de 0,580, o que representa um aumento de 67,4% em relação ao valor observado no dia 0 (0,346) (Figura 16-B).

Embora o efeito da interação entre o tempo e o aerosol marinho tenha sido significativo, o teste t não foi capaz de encontrar variações significativas entre as plantas dos tratamentos com aerosol marinho simulado e sem aerosol marinho simulado (Tabela 5).

A avaliação do efeito principal do aerosol marinho simulado, da interação do aerosol marinho simulado e da deposição de material sólido particulado de ferro e da interação entre o tempo, o aerosol marinho simulado e a deposição de material sólido

particulado de ferro não revelaram nenhuma diferença estatística nos valores da razão C_i/C_a entre os tratamentos estudados (Tabela 5).

A interação do tempo e da deposição de material sólido particulado de ferro foi significativa para os valores da E (Tabela 5). O valor da E das plantas que não receberam a deposição de ferro particulado no 56º dia de experimento foi significativamente maior que os valores observados no 21º e 35º dias de experimento. Entretanto, não foram observadas alterações significativas nos valores de E das avaliações realizadas ao longo do experimento em comparação com o valor observado no dia 0 ($0,623 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 17-A).

Nas plantas expostas à deposição de ferro particulado, foi observado um aumento significativo de 19,3% nos valores da E no 49º dia de experimento. Este aumento foi mais acentuado no 56º dia de experimento no qual foi as plantas submetidas à deposição de ferro particulado apresentaram a E de $0,959 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ o que representa um aumento de 80,4% em relação ao valor observado no dia 0 ($0,531 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 17-A).

Foi verificado, no 35º e 56º dia de experimento, aumentos significativos de 73,4 e 46,2%, respectivamente, na E das plantas submetidas à deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos MSP_{Fe} e $\text{AM}+\text{MSP}_{\text{Fe}}$) em relação à média dos valores observados nas plantas do controle e do tratamento AM ($0,352$ e $0,656 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Nas avaliações realizadas no dia 0 e 7, 21 e 49 dias após o início da aplicação dos tratamentos não foram encontradas diferenças estatísticas entre os valores da E das plantas que receberam e que não receberam a deposição de ferro particulado (Figura 17-A).

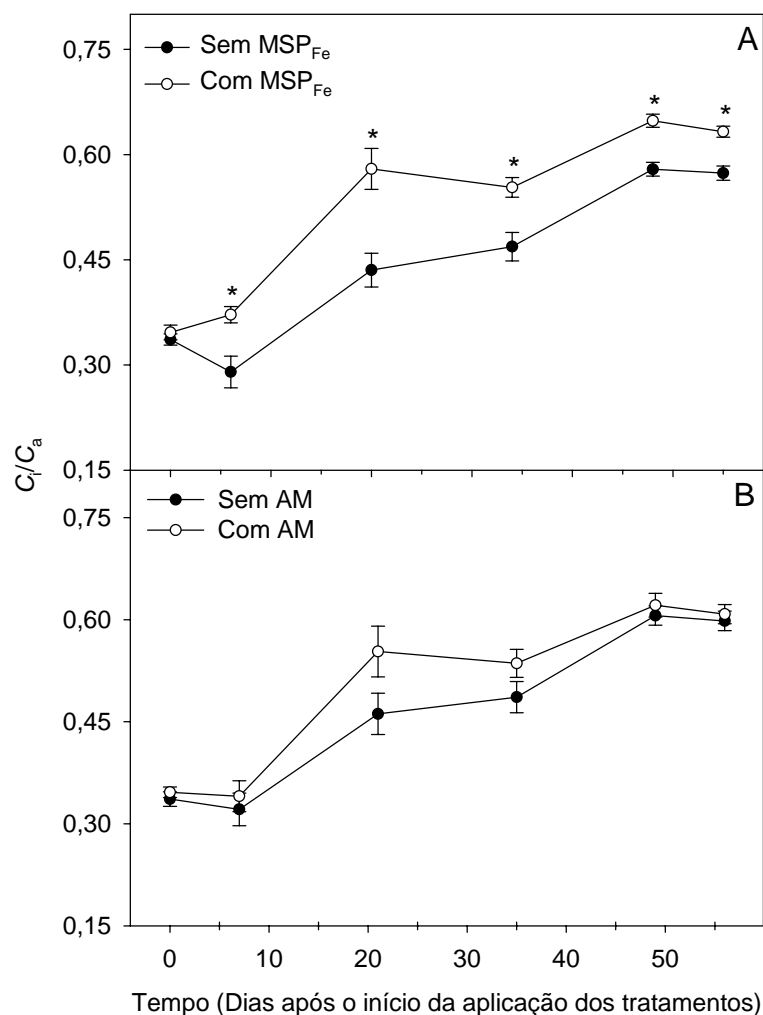


Figura 16: Razão entre a concentração interna e externa de CO₂ (C_i/C_a) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 0, 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos sem deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos AM e CONT) e dos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}) (A) e dos tratamentos sem aerosol marinho simulado (MSP_{Fe} e CONT) e com aerosol marinho simulado (AM e AM+MSP_{Fe}) (B). As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos. (*) significa que as médias dos tratamentos diferem significativamente entre si pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade com correção de Bonferroni.

O efeito da interação do tempo e do aerosol marinho foi significativo (Tabela 5). As plantas que não receberam o aerosol marinho simulado apresentaram no 49º e 56º dias de experimento valores de E estatisticamente maiores que os observados 21 e 35 dias após o início da aplicação dos tratamentos, respectivamente. Entretanto, os valores da E observados, ao longo do experimento, foram estatisticamente iguais ao observado no dia 0 ($0,554 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 17-B).

Em resposta ao aerosol marinho simulado, as plantas apresentaram no 49° e no 56° dias de experimento valores da E estatisticamente maiores que o observado 7 dias após o início da aplicação dos tratamentos. O valor da E verificado no 56° dia de experimento também diferiu significativamente dos valores observados no 21° e no 35° dia de experimento. Apesar destas variações, os valores observados ao longo do experimento foram estatisticamente iguais ao observado no dia 0 ($0,554 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 17-B).

Embora o efeito da interação do tempo e do aerosol marinho tenha sido significativo, o teste t não identificou diferenças estatísticas entre as plantas submetidas aos tratamentos com simulação do aerosol marinho (AM e AM+MSP_{Fe}) e sem simulação do aerosol marinho (MSP_{Fe} e CONT) (Tabela 5).

O efeito principal do aerosol marinho simulado, a interação do aerosol marinho simulado e da deposição material sólido particulado de ferro e a interação entre o tempo, o aerosol marinho simulado e a deposição de material sólido particulado de ferro não foram significativas para os valores de E das plantas dos tratamentos analisados (Tabela 5).

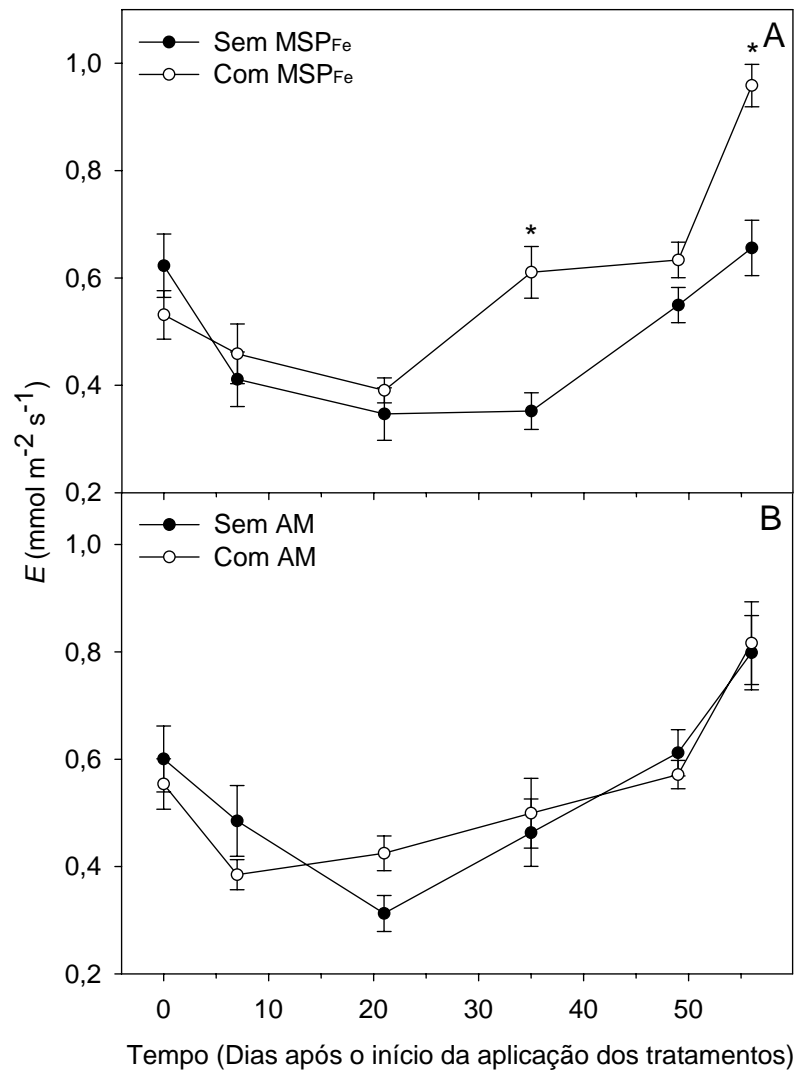


Figura 17: Transpiração (E) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 0, 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos sem deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos AM e CONT) e dos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro (tratamentos MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}) (A) e dos tratamentos sem aerosol marinho simulado (MSP_{Fe} e CONT) e com aerosol marinho simulado (AM e AM+MSP_{Fe}) (B). As barras verticais indicam o erro padrão das médias dos tratamentos. (*) significa que as médias dos tratamentos diferem significativamente entre si pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade com correção de Bonferroni.

4.2.2 Avaliação das variáveis da fluorescência da clorofila *a*

Muitas dificuldades foram encontradas durante as medições das variáveis da fluorescência da clorofila *a* através do fluorômetro imaging-PAM.

As ondulações naturais das folhas dificultaram a obtenção de uma área amostral plana, necessária para a correta medição destas variáveis, sendo necessário desconsiderar regiões das áreas amostradas que não se apresentavam planas.

Além disso, devido a esta característica própria das folhas de *E. uniflora*, na maioria das vezes, foi necessária uma excessiva manipulação das folhas para a realização das medições. Em algumas folhas, foram observadas inclusive injúrias decorrentes deste procedimento.

Foram selecionadas para a figura 18 as imagens das variáveis da fluorescência da clorofila *a* de repetições mais representativas de cada tratamento e que apresentaram áreas amostrais planas para que as alterações causadas pelos tratamentos não fossem confundidas com as interferências causadas pelas regiões onduladas.

A análise dos valores de F_v/F_m indicou a significância do efeito do tempo (Tabela 6). As plantas de *E. uniflora* apresentaram, independente dos tratamentos aos quais estavam sendo submetidas, valores de F_v/F_m estatisticamente iguais no dia 0 e no 7º e 21º dias de experimento. Os valores de F_v/F_m observados 35, 49 e 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos foram em média 3,4% maior que o valor verificado no dia 0 (0,777) (Tabela 7).

Tabela 6: Resultado da análise GLM fatorial com medidas repetidas das variáveis da fluorescência da clorofila *a*: eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m), rendimento quântico efetivo do fotossistema II (ϕ_{II}), rendimento quântico da dissipação regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ_{NPQ}), rendimento quântico da dissipação não-regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ_{NO}), taxa linear de transporte de elétrons no fotossistema II (ETR) e *quenching* fotoquímico (qL).

	F_v/F_m	ϕ_{II}	ϕ_{NPQ}	ϕ_{NO}	ETR	qL
MSP_{Fe}	n.s.	n.s.	***	***	n.s.	n.s.
AM	n.s.	n.s.	*	**	n.s.	*
MSP_{Fe}*AM	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Tempo	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*
MSP_{Fe}*Tempo	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
AM*Tempo	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
MSP_{Fe}*AM*Tempo	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Nível de significância: P<0,05 (*), P<0,01 (**), P<0,001 (***), não significativo (n.s.)

Tabela 7: Eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) em folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 0, 7, 21, 35, 49 e 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos. Os dados representam a média de 16 repetições \pm o erro padrão da média.

Tempo	F_v/F_m
0	0,777 \pm 0,004 d
7	0,787 \pm 0,003 bcd
21	0,780 \pm 0,010 cd
35	0,804 \pm 0,002 ac
49	0,809 \pm 0,002 ac
56	0,797 \pm 0,004 abc

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de t ao nível de 5% de probabilidade com correção de Bonferroni.

Não foram verificadas diferenças estatísticas entre os valores do ϕ_{II} em decorrência dos tratamentos, do tempo e de suas interações (Tabela 6). Em relação ao ϕ_{NPQ} foram observadas alterações significativas em resposta ao efeito principal da deposição de material sólido particulado de ferro e ao efeito principal da simulação do aerosol marinho (Tabela 6).

As plantas dos tratamentos com deposição de ferro particulado apresentaram um decréscimo significativo de 6% no valor do ϕ NPQ, em relação ao valor médio observado nas plantas dos tratamentos que não receberam a deposição de material sólido particulado de ferro (0,636) (Tabela 8 e Figura 18).

Nas plantas expostas à simulação do aerosol marinho foi observada uma redução significativa no ϕ NPQ de 2,8% em comparação com a média dos valores verificados nas plantas que não foram submetidas ao aerosol marinho simulado (0,626) (Tabela 8 e Figura 18).

Os valores do ϕ NO apresentaram alterações significativas em resposta ao efeito principal da deposição de ferro particulado e da simulação do aerosol marinho (Tabela 6). As plantas submetidas à deposição de ferro particulado apresentaram um valor do ϕ NO 13,5% maior que o observado nas plantas que não foram expostas à deposição de material sólido particulado de ferro (0,302) (Tabela 8).

A mesma resposta foi observada nas plantas submetidas ao aerosol marinho simulado (Tabela 6 e Figura 18) que apresentaram um aumento no valor do ϕ NO de 7,7% em relação ao valor médio obtido pelas plantas que não foram submetidas ao aerosol marinho simulado (0,310) (Tabela 8 e Figura 18).

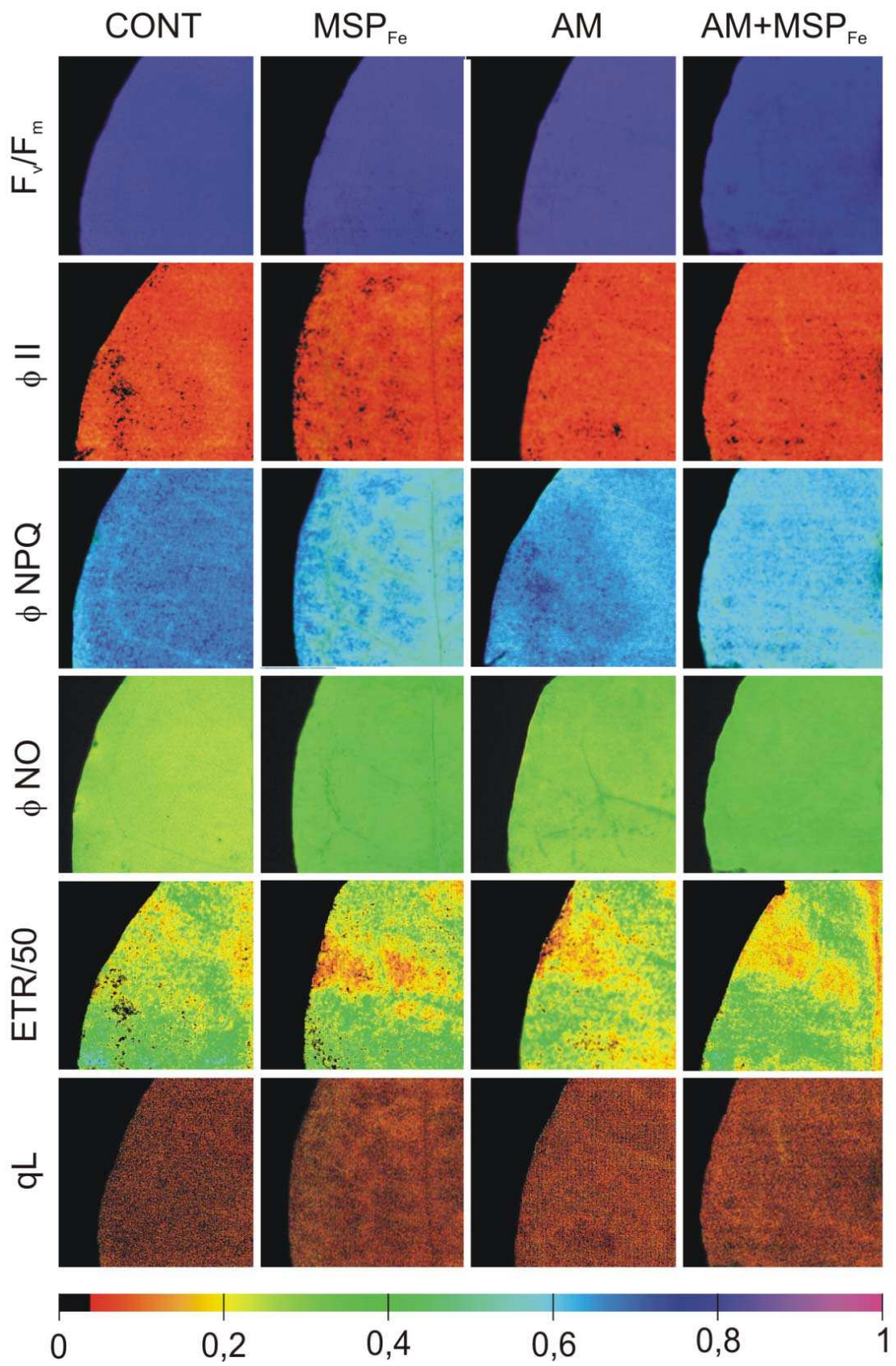
Os efeitos dos tratamentos, do tempo e de suas interações não foram significativos para os valores da ETR (Tabela 8). O efeito do tempo e do aerosol marinho foram significativos para os valores do qL (Tabela 8). No entanto, o teste t não identificou nenhuma diferença estatística entre os valores médios do qL das plantas ao longo do tempo no qual a média observada foi de 0,053. A análise do efeito principal do aerosol marinho indicou uma redução significativa de 15,7% no valor médio do qL nas plantas submetidas à simulação do aerosol marinho em comparação com as plantas que não foram expostas ao aerosol marinho simulado (0,057) (Tabela 8 e Figura 18).

Tabela 8: Médias das variáveis da fluorescência da clorofila *a* de plantas de *Eugenia uniflora* 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos sem deposição de material sólido particulado de ferro - ausência MSP_{Fe} (AM e CONT), com deposição material sólido particulado de ferro - presença MSP_{Fe} (MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}), sem aerosol marinho simulado - ausência AM (MSP_{Fe} e CONT) e com aerosol marinho simulado - presença AM (AM e AM+MSP_{Fe}). Variáveis da fluorescência da clorofila *a*: eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m), rendimento quântico efetivo do fotossistema II (φII), rendimento quântico da dissipação regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (φNPQ), rendimento quântico da dissipação não-regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (φNO), taxa linear de transporte de elétrons no fotossistema II (ETR) e *quenching* fotoquímico (qL). Os dados representam a média de 48 repetições (8 repetições*6 níveis de tempo) ± o erro padrão da média.

	F _v /F _m	φII	φNPQ	φNO	ETR	qL
Ausência MSP_{Fe}	0,792 ± 0,003	0,062 ± 0,002	0,636 ± 0,006 a	0,302 ± 0,006 b	16 ± 0,436	0,057 ± 0,003
Presença MSP_{Fe}	0,793 ± 0,004	0,058 ± 0,002	0,598 ± 0,006 b	0,342 ± 0,007 a	15 ± 0,426	0,049 ± 0,003
Ausência AM	0,791 ± 0,002	0,063 ± 0,002	0,626 ± 0,006 a	0,310 ± 0,007 b	16 ± 0,450	0,057 ± 0,003 a
Presença AM	0,793 ± 0,004	0,057 ± 0,002	0,608 ± 0,007 b	0,334 ± 0,007 a	15 ± 0,404	0,048 ± 0,003 b

Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade com correção de Bonferroni.

Figura 18: Imagens das variáveis da fluorescência da clorofila *a* dos tecidos foliares de plantas de *Eugenia uniflora* 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos: controle (CONT), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerossol marinho simulado (AM) e deposição material sólido particulado de ferro e aerossol marinho simulado (MSP_{Fe}+AM). Eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m), rendimento quântico efetivo do fotossistema II (ϕ_{II}), rendimento quântico da dissipação regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ_{NPQ}), rendimento quântico da dissipação não-regulada de energia não-fotoquímica no fotossistema II (ϕ_{NO}), taxa linear de transporte de elétrons no fotossistema II (ETR) e *quenching* fotoquímico (qL). Os valores da ETR foram divididos por 50 para se adequarem à escala de cores.



4.2.3 Determinação do teor de pigmentos fotossintéticos

O efeito da interação entre a deposição de material sólido particulado de ferro e o aerosol marinho simulado foi significativo para os valores do teor de clorofila *a* ($P < 0,05$). Entretanto, tanto na presença quanto na ausência da deposição de material sólido particulado de ferro, os valores observados nas plantas dos tratamentos com e sem o aerosol marinho simulado foram estatisticamente iguais (Tabela 9).

Da mesma forma, não houve diferença significativa nos teores de clorofila *a* das plantas dos tratamentos com e sem deposição de material sólido particulado de ferro tanto na presença quanto na ausência do aerosol marinho simulado (Tabela 9). Os efeitos principais da deposição de ferro particulado e da simulação do aerosol marinho não foram significativos ($P > 0,05$).

Tabela 9: Resultado da análise da interação entre o efeito da deposição de material sólido particulado de ferro e da simulação do aerosol marinho para os valores da clorofila *a*. Os dados representam a média de 4 repetições \pm o erro padrão da média.

		Clorofila <i>a</i> (mg g ⁻¹ MF)
Ausência MSP_{Fe}	Ausência AM	1,710 \pm 0,092 Aa
	Presença AM	1,447 \pm 0,138 Aa
Presença MSP_{Fe}	Ausência AM	1,480 \pm 0,040 Aa
	Presença AM	1,694 \pm 0,082 Aa

Letras maiúsculas comparam os efeitos da deposição de material sólido particulado de ferro. Letras minúsculas comparam os efeitos do aerosol marinho simulado. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de t ao nível de 5% de probabilidade com correção de Bonferroni.

A avaliação dos teores de carotenóides indicou que os efeitos principais do tempo, da deposição de material sólido particulado de ferro e do aerosol marinho simulado não foram significativos ($P > 0,05$). A média do teor de carotenóides das plantas do controle e dos tratamentos foi de 30 mg g⁻¹ MF (Tabela 10)

Tabela 10: Teor de carotenóides das folhas de plantas de *Eugenia uniflora* 56 dias após o início da aplicação dos tratamentos: controle (CONT), deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe}), aerosol marinho simulado (AM) e deposição material sólido particulado de ferro e aerosol marinho simulado (MSP_{Fe}+AM).

		Carotenóides (mg g⁻¹ MF)
Ausência MSP_{Fe}	Ausência AM	0,312 ± 0,019
	Presença AM	0,282 ± 0,018
Presença MSP_{Fe}	Ausência AM	0,297 ± 0,009
	Presença AM	0,296 ± 0,008

4.2.4 Alterações na morfologia foliar

A deposição de material sólido particulado de ferro e a simulação do aerosol marinho acarretaram os mesmos efeitos descritos no primeiro experimento. Da mesma maneira, foi observada a formação de uma camada de ferro particulado na superfície das folhas submetidas aos tratamentos MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe} e a formação de pequenos cristais de sal na superfície das folhas expostas à simulação do aerosol marinho (tratamentos AM e AM+MSP_{Fe}).

Nas plantas que receberam o aerosol marinho simulado e a deposição de ferro particulado, a simulação do aerosol causou a formação de pequenas gotículas de solução salina na superfície foliar das plantas que concentraram o material particulado, aplicado no dia anterior, em pequenos pontos por toda a extensão do limbo foliar.

Também foi observado, ao longo do segundo experimento, o surgimento de cloroses que evoluíram rapidamente para necroses nos tratamentos com deposição de material sólido particulado de ferro (MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}). Estas alterações morfológicas também ocorreram na região entre e nervura central e a margem do limbo foliar, avançando em direção à margem das folhas e foram mais pronunciadas nas plantas do tratamento AM+MSP_{Fe}. Nas plantas submetidas ao tratamento AM foram verificadas a ocorrência de um número reduzido de necroses nas folhas com desenvolvido foliar mais avançado.

Nas folhas selecionadas para as avaliações de trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a* e para a determinação do teor de pigmentos fotossintéticos, a limpeza das folhas antes da cada avaliação acarretou a remoção periódica do material sólido

particulado de ferro depositado e dos cristais de sal formados na superfície das folhas. Nestas folhas houve a formação de uma camada de ferro visivelmente mais fina e de cristais de sal menores que os verificados nas outras folhas e não foi observado o surgimento de alterações visuais.

5. Discussão

A deposição de material sólido particulado de ferro causou, no primeiro experimento, o aumento da concentração de ferro nos tecidos vegetais ultrapassando o valor médio requerido para suprir a necessidade normal deste nutriente (Larcher, 2004). A concentração de ferro nos tecidos foliares das plantas submetidas ao tratamento MSP_{Fe} ficou muito próxima do nível considerado fitotóxico ($> 0,5 \text{ mg g}^{-1} \text{ MS}$) para a maioria das plantas (Pugh et al., 2002) e ultrapassou este nível, atingindo valores fitotóxicos, nas plantas dos tratamentos H_2O+MSP_{Fe} e $AM+MSP_{Fe}$.

A presença de água facilita a oxidação do ferro metálico (Fe^0), obtido após o processamento industrial, à Fe^{+2} (Pereira e Freire, 2005) contribuindo para o aumento da absorção foliar de ferro. Entretanto, a concentração de ferro observada nos tecidos foliares das plantas submetidas à deposição de material sólido particulado de ferro em conjunto com o aerosol com água desionizada (tratamento H_2O+MSP_{Fe}) foi estatisticamente igual a verificada nas plantas expostas à deposição de ferro particulado (tratamento MSP_{Fe}).

Diferentemente do que foi observado no primeiro experimento, em *Sophora tomentosa*, o acúmulo de ferro nos tecidos vegetais foi maior nas plantas expostas ao nevoeiro em comparação com as plantas que receberam somente a deposição de ferro particulado (Kuki et al., 2008b).

O Cl^- e Na^+ são os principais componentes do sal marinho *in natura* utilizado para preparar a solução salina utilizada na simulação do aerosol marinho e correspondem, respectivamente, a 59,5 e 38,6% da sua composição. Estes íons possivelmente penetraram no mesofilo através das fissuras cuticulares das folhas e dos estômatos (Kuki, 1997) como pôde ser observado, no primeiro experimento, através do aumento nas concentrações de Cl^- e de Na^+ presentes nas folhas, especialmente nas plantas submetidas à deposição de material sólido particulado de ferro em conjunto com o aerosol marinho simulado.

No primeiro experimento, o decréscimo da assimilação de CO₂ observado nas plantas de *E. uniflora* submetidas à deposição de material sólido particulado de ferro em conjunto com o aerosol com água desionizada ou com solução salina (tratamentos H₂O+MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}) possivelmente está relacionado à diminuição da radiação luminosa incidente devido à deposição de ferro particulado na superfície foliar (Hirano et al., 1995).

O bloqueio da radiação solar incidente diminui a eficiência da absorção de luz pelo PS II e, possivelmente, foi responsável pelas reduções na ϕ II e na ETR contribuindo para a diminuição da assimilação de CO₂ nos tratamentos H₂O+MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}. A diminuição no ϕ II e na ETR decorrentes da deposição de material sólido particulado de ferro na superfície folhas também foi verificada por Pereira et al. (2009).

Nos dois experimentos realizados, o teor de clorofila *a* não foi alterado em resposta à deposição de material sólido particulado de ferro. Possivelmente, no segundo experimento, a remoção do material sólido particulado de ferro depositado na superfície das folhas selecionadas para a realização das avaliações e a exposição das plantas ao painel luminoso antes de cada medição propiciou um temporário aumento na síntese de clorofila *a* reduzindo os efeitos do bloqueio da radiação solar incidente e do excesso de íons ferro livre.

De maneira semelhante ao observado neste experimento, plantas de *Schinus terebinthifolius* também não apresentaram alterações nos teores de pigmentos (clorofila *a*, *b* e carotenóides) em resposta às imissões provenientes de uma usina de pelotização de ferro (Oliveira et al., 2007).

Os valores da F_v/F_m observados, nos dois experimentos, não apresentaram variações significativas em resposta aos tratamentos e foram próximos ao valor médio para plantas saudáveis ($0,832 \pm 0,004$) proposto por Björkman e Demming (1987). Neves et al. (2009) também não verificaram alterações significativas na F_v/F_m de plantas de *E. uniflora* em resposta ao excesso de ferro nos tecidos foliares.

Além de interferir na intensidade da radiação luminosa absorvida pelas folhas, a deposição de material sólido particulado de ferro forma uma camada de coloração escura na superfície da planta que pode contribuir para o aumento da temperatura foliar (Pereira et al., 2009).

No primeiro experimento, a redução na g_s e na E devido à obstrução estomática associada ao possível aumento da temperatura foliar podem contribuir para o decréscimo da assimilação de CO_2 e para a manutenção ou incremento da respiração que, em conjunto favorecem o aumento da razão C_i/C_a (Pereira, 2006). O aumento desta razão foi verificado, no primeiro experimento, nas plantas expostas aos tratamentos MSP_{Fe} , H_2O+MSP_{Fe} e $AM+MSP_{Fe}$. Decréscimos na A , na g_s e na E também foram observados após apenas 3 dias de aplicação de material sólido particulado de ferro na superfície foliar de plantas de *Clusia hilariana* (Pereira et al., 2009).

No segundo experimento, a deposição de uma camada mais fina de material sólido particulado de ferro na superfície das folhas, devido à remoção periódica do ferro particulado antes de cada avaliação, possivelmente não acarretou a obstrução dos estômatos o que pôde ser evidenciado pelo aumento na g_s , na E e na razão C_i/C_a .

Além disso, os efeitos decorrentes da possível diminuição da radiação luminosa incidente, devido à deposição do material sólido particulado de ferro, observados no primeiro experimento não foram verificados no segundo experimento no qual os valores da A , do ϕ_{II} e da ETR não apresentaram alterações significativas em decorrência da deposição de material sólido particulado de ferro.

No segundo experimento, apesar do aumento na g_s , na E e na razão C_i/C_a , ao longo do período experimental, mais especificamente, a partir do 35º, 21º, 49º dias, respectivamente, não foram observadas alterações na A .

Apesar dos dois experimentos terem sido realizados simultaneamente, durante o mesmo período experimental, utilizando-se plantas de *E. uniflora* com a mesma idade e origem e as mesmas metodologias para as aplicações dos tratamentos e para a realização das avaliações foram observados resultados bastante distintos.

A frequência das avaliações realizadas no segundo experimento propiciou um menor acúmulo de material sólido particulado de ferro ao longo do período experimental, devido à remoção do material sólido particulado de ferro depositado na superfície foliar avaliada.

Este fator possivelmente foi responsável pelas diferenças encontradas entres os resultados observados nos dois experimentos. Deste modo, no segundo experimento,

não foi possível avaliar a progressão das alterações fisiológicas observadas no primeiro experimento.

O conteúdo elevado de ferro nas células vegetais pode desencadear um estresse oxidativo, através do aumento da produção de espécies reativas de oxigênio como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), superóxido (O_2^-) e especialmente do radical hidroxil ($OH\cdot$) através da reação de Fenton (Haber e Weiss, 1943; Becana et al., 1998). Estas espécies reativas de oxigênio, em excesso, podem causar danos a proteínas, lipídeos de membrana e ao DNA (Becana et al., 2008).

O nível de tolerância das plantas depende do controle efetivo das espécies reativas de oxigênio através dos mecanismos enzimáticos e não-enzimáticos (Schützendubel e Polle, 2002). O sistema não-enzimático é constituído por moléculas antioxidativas como o ascorbato, a glutathiona, os tocoferóis, os flavonóides, os alcalóides e os carotenóides. O sistema enzimático inclui as enzimas superóxido dismutase, ascorbato peroxidase, glutathiona peroxidase e catalases (Apel e Hirt, 2004).

Apesar do nível fitotóxico possivelmente gerar a produção de espécies reativas de oxigênio, acredita-se que, no primeiro experimento, o aumento no conteúdo de íons de ferro não foi suficiente para desencadear um estresse oxidativo pois, não foram observadas alterações no teor de pigmentos, na permeabilidade das membranas e no acúmulo de malonaldeído em resposta à deposição de ferro particulado.

Os mecanismos de eliminação destes intermediários possivelmente foram capazes de amenizar ou eliminar os efeitos nocivos causados pelas espécies reativas de oxigênio ou parte do conteúdo de ferro presente nos tecidos foliares poderia estar sendo quelado e armazenado como no apoplasto em uma forma não tóxica para a planta (Connolly e Guerinot 2002).

Danos à membranas celulares indicados pelo aumento no extravazamento de eletrólitos mostraram uma ligação direta com o conteúdo de ferro em folhas de *E. uniflora* submetidas à deposição de material sólido particulado de ferro e à solução de Fe-EDTA no solo (Neves et al., 2009). A peroxidação de lipídeos também foi observada em várias espécies de plantas expostas ao excesso de ferro (Fang et al., 2001; Souza-Santos et al., 2001).

A deposição de material sólido particulado de ferro também pode causar o surgimento de alterações visuais, o que foi observado nos dois experimentos realizados e também foi verificado por Silva et al. (2006) em plantas expostas, em condições de campo, à deposição de ferro particulado nas proximidades de uma usina de pelotização de ferro durante o período de 7 meses.

As plantas submetidas somente ao aerosol com água desionizada e ao aerosol marinho simulado (tratamentos H₂O e AM) em geral, não apresentaram alterações fisiológicas em decorrência dos tratamentos. Entretanto, no primeiro experimento, o aumento no acúmulo de malonaldeído indicou a ocorrência da peroxidação de lipídeos nas plantas submetidas ao aerosol marinho simulado. Este aumento pode estar relacionado à diminuição no teor de Ca⁺² já que o Na⁺ presente em elevadas concentrações pode deslocar o Ca⁺² ligado às membranas, alterando a integridade estrutural e funcional destas estruturas celulares (Cramer *et al.*, 1985).

O aumento na concentração de Na⁺ também observado em resposta ao aerosol marinho simulado, pode causar um desequilíbrio momentâneo no potencial de membranas que pode desencadear o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio. Por outro lado, concentrações elevadas de Na⁺ podem suprimir a atividade da SOD contribuindo para o aumento da concentração de espécies reativas de oxigênio (Zhu et al., 2004; Goreta et al., 2007). Entretanto, o possível aumento na concentração de espécies reativas de oxigênio, no primeiro experimento, não causou danos aos complexos fotossintéticos, pois não foram observadas alterações nos parâmetros de fluorescência da clorofila *a* e nas trocas gasosas em resposta à simulação do aerosol marinho.

A diminuição na concentração de Mg⁺², um componente central das moléculas de clorofila, observada nas plantas submetidas à deposição de ferro particulado em conjunto com o aerosol marinho simulado, pode contribuir para a redução do conteúdo de clorofila (Fan e Wang, 2000) e conseqüente diminuição na assimilação de CO₂. Entretanto, este decréscimo não foi suficiente para alterar o conteúdo de pigmentos fotossintéticos e a assimilação de CO₂, pois não foram observadas alterações nestas variáveis em decorrência do aerosol marinho simulado.

As alterações fisiológicas observadas especialmente nas plantas submetidas à deposição de ferro particulado em conjunto com o aerosol com água desionizada ou

com o aerossol marinho simulado parecem estar mais relacionadas à diminuição da eficiência da absorção de luz pelo PS II devido ao bloqueio da radiação solar incidente, do que a possíveis danos no aparato fotossintético.

No primeiro experimento, o aerossol marinho simulado possivelmente contribuiu para o decréscimo da assimilação de CO₂ observado nas plantas submetidas ao tratamento AM+MSP_{Fe}. Esta contribuição pode estar relacionada à maior adesão das partículas de ferro na superfície foliar favorecida pelo aerossol marinho (Pereira, 2006) contribuindo, desta forma, para a redução na radiação luminosa incidente.

No entanto, a duração do primeiro experimento pode ter sido insuficiente para diferenciar mais significativamente os efeitos dos tratamentos H₂O+MSP_{Fe} e AM+MSP_{Fe}. Em longo prazo, o aumento expressivamente maior da concentração de Fe total, Cl⁻ e Na⁺ nos tecidos foliares, em resposta ao aerossol marinho simulado em conjunto com a deposição de material sólido particulado de ferro, pode afetar negativamente o metabolismo das plantas.

Os resultados observados nos dois experimentos indicam que os efeitos da deposição do material sólido particulado de ferro estão mais associados aos efeitos físicos da deposição sobre a superfície das folhas que a possíveis danos tóxicos devido ao aumento da concentração de ferro nos tecidos vegetais.

Em condições de campo, especialmente nas regiões costeiras, a deposição de material particulado é perturbada pelo vento (Kuki et al., 2009) e pelas chuvas. Em condições semi-controladas de casa de vegetação, estes efeitos são minimizados. Desta maneira, acredita-se que as alterações observadas neste trabalho possam ocorrer de maneira mais intensa em condições de campo nas quais a deposição de material sólido particulado de ferro é significativamente maior.

Além disso, em condições de campo, a deposição de ferro particulado no solo pode aumentar a concentração de ferro e, em associação com baixos valores de pH, pode modificar a composição e a disponibilidade de nutrientes do solo (Silva et al., 2006; Kuki et al., 2008a). Estas alterações causam danos tóxicos e desequilíbrios nutricionais que podem afetar negativamente o metabolismo das plantas (Connolly e Guerinot, 2002).

6. Conclusões

Os efeitos da deposição de ferro particulado foram mais intensos no primeiro experimento no qual houve o acúmulo gradual de ferro particulado na superfície foliar das plantas ao longo de todo o período experimental do que no segundo experimento no qual houve a remoção periódica da camada de ferro particulado depositada.

Em geral, as plantas submetidas somente ao aerosol com água desionizada e ao aerosol marinho simulado não apresentaram alterações fisiológicas em resposta aos tratamentos, apresentando valores semelhantes aos observados nas plantas do controle.

O efeito conjunto do aerosol com água desionizada e da deposição de ferro particulado e o efeito conjunto do aerosol marinho simulado e da deposição de ferro particulado intensificaram os efeitos da deposição de material sólido particulado de ferro em plantas de *Eugenia uniflora*.

Os resultados observados neste trabalho, especialmente no primeiro experimento, indicam que o aerosol marinho é capaz de potencializar os efeitos causados pela deposição de material sólido particulado de ferro na superfície foliar de plantas de restinga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, P. L. C. A. *Efeitos nutricionais, fisiológicos e bioquímicos da chuva ácida simulada e do latossolo Vermelho-Amarelo de Cubatão-SP, em soja (Glycine max L.) Merrill*. Viçosa, MG: UFV, 1988. 144 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal - Universidade Federal de Viçosa, 1988.
- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, v. 55, p. 373-99, 2004.
- BARRICK, K. A. Comparison of the nutrient ecology of coastal *Banksia grandis* elfin wood (windwept shrub-like form) and low trees, Cape Leeuwin-Natural site National Park, Western Australia. *Austral Ecology*, v. 28, p. 252-262, 2003.
- BECANA, M.; MORAN J. F.; INTURBE-ORMAETXE, I. Iron-dependent oxygen free radical generation in plants subjected to environmental stress: toxicity and antioxidant protection. *Plant and Soil*, v. 201, p. 137-147, 1998.
- BJÖRKMAN, O.; DEMMING, B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K amongst plants of diverse origins. *Planta*, v. 170, p. 489-504, 1987.
- BOYCE, S. G. The salt spray community. *Ecological Monographs*, v. 24, n. 1, p. 29-64, 1954.
- CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, v. 103, p.551-560, 2009.
- CONNOLLY, E. L.; GUERINOT, M. L. Iron stress in plants. *Genome Biology*, v. 3, p. 10241-10245, 2002.
- CRAMER, G. R.; LÄUCHLI, A.; POLITO, V. S. Displacement of Ca²⁺ by Na⁺ from the plasmalemma of roots cells. A primary response to salt stress? *Plant Physiology*, v. 79, p. 207-211, 1985.
- EVANS, L. S.; GMUR, N. F.; COSTA, F. Leaf surface and histological perturbations of leaves of *Phaseolus vulgaris* and *Helianthus annuus* after exposure to simulated acid rain. *American Journal of Botany*, v. 64, p. 903-913, 1977.
- FAN, H. B.; WANG, Y. H. Effects of simulated acid rain on germination, foliar damage, chlorophyll contents and seedling growth of five hardwood species growing in China. *Forest Ecology and Management*, v. 126, p. 321-329, 2000.
- FANG, W. C.; WANG, J. W.; LIN, C. C.; KAO, C. H. Iron induction of lipid peroxidation and effects on antioxidative enzyme activities in rice leaves. *Plant Growth Regulation*, v. 35, p. 75-80, 2001.
- FITZGERALD, J. W. Marine aerosols: a review. *Atmospheric Environment*, v. 25A, p. 533-545, 1991.

- FLEXAS, J.; BOTA, J.; LORETO, F.; CORNIC, G.; SHARKEY, T. D. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biology*, v. 6, p. 269-279, 2004.
- FLEXAS, J.; DIAZ-ESPEJO, A.; GALME'S, J.; KALDENHOFF, R.; MEDRANO, H.; RIBAS-CARBO, M. Rapid variations of mesophyll conductance in response to changes in CO₂ concentration around leaves. *Plant, Cell and Environment*, v. 30, p. 1284-1298, 2007.
- FOURCROY, P. Iron and oxidative stress in plants. In: SMALLWOOD, M.F., CALVERT, C.M., BOWLES, D.J. (Eds.). *Plant Responses to Environmental Stress*. Oxford: BIOS Scientific Publishers Limited, 1999. p. 51-57.
- GALLEGO, S. M.; BENAVIDES, M. P.; TOMARO, M. L. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stress. *Plant Science*, v. 121, n. 1, p. 151-159, 1996.
- GENTY, B.; BRIANTAIS, J. M.; BAKER, N. R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta*, v. 990, p. 87-92, 1989.
- GORETA, S.; BUCEVIC-POPOVIC, V.; PAVELA-VRANCIC, M.; PERICA, S. Salinity-induced changes in growth, superoxide dismutase, and ion content of two olive cultivars. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 170, p. 398-403, 2007.
- GRANTZ, D. A.; GARNERB, J. H. B.; JOHNSON, D. W. Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, v. 29, p. 213-239, 2003.
- HABER, F.; WEISS, J. The catalytic decomposition of hydrogen peroxide by iron salts. *Proceedings of the Royal Society of London*, v.174, p. 332-351, 1934.
- HASEGAWA, P. M.; BRESSAN, R. A.; ZHU, J-K.; BOHNRET, H. J. Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 51, p. 463-99, 2000.
- HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplast. I. kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, v. 125, p. 189-198, 1968.
- HIRANO, T.; KIYOTA, M.; AIGA, I. Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. *Environmental Pollution*, v. 89, p. 255-261, 1995.
- HISCOX, J. D.; ISRAELSTAM, G. F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany*, v. 57, p. 1332-1334, 1979.
- HU, Y.; SCHMIDHALTER, U. Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v.168, p. 541-549, 2005.
- van KOOTEN O.; SNEL J. F. H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. *Photosynthesis Research*, v. 25, p. 147-150, 1990.

KRAMER, D. M.; JOHNSON, G.; KIIRATS, O.; EDWARDS, G. E. New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes *Photosynthesis Research*, v.79, p. 209-218, 2004.

KUKI, K. N. *Efeito de estresses hídrico e salino sobre algumas espécies nativas da restinga*. Viçosa, MG: UFV,1997. 78 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal - Universidade Federal de Viçosa, 1997.

KUKI, K. N.; OLIVA, M. A.; PEREIRA, E. G. Iron Ore Industry Emissions as a Potential Ecological Risk Factor for Tropical Coastal Vegetation. *Environmental Management*, v. 42, p. 111-121, 2008a.

KUKI, K. N.; OLIVA, M. A.; PEREIRA, E. G.; COSTA, A. C.; CAMBRAIA, J. Effects of simulated deposition of acid mist and iron ore particulate matter on photosynthesis and the generation of oxidative stress in *Schinus terebinthifolius* Raddi and *Sophora tomentosa* L. *Science of The Total Environment*, v. 403, p. 207-214, 2008b.

KUKI, K. N.; OLIVA, M. A.; COSTA, A. C. The simulated effects of iron dust and acidity during the early stages of establishment of two coastal plant species. *Water, Air and Soil Pollution*, v. 196, p. 287-295, 2009.

KURTH, E.; CRAMER, G.R.; LAUCHLI, A.; EPSTEIN, E. Effects of NaCl and CaCl₂ on cell enlargement and cell production in cotton roots. *Plant Physiology*, v. 82, p. 1102-1106, 1986.

LARCHER, W. *Ecofisiologia Vegetal*. RiMa Artes e Textos, 2004. 531 p.

LOPES, S. A.; OLIVA, M. A.; MARTINEZ, C. A. Impacto das imissões de dióxido de enxofre e deposição de material sólido particulado de ferro em espécies vegetais de restinga: avaliação ecofisiológica. In: Espíndola E., Paschoal C., Rocha, o., Bohrer, M., Oliveira Neto, A. (eds) *Ecotoxicologia*. RiMa Artes e Textos, 2000, PP.53-71.

MACCANN, J. H.; SOLOMON, K. R. The effect of creosote on membrane ion leakage in *Myriophyllum spicatum* L. *Aquatic Toxicology*, v. 50, p. 274-284, 2000.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. *Avaliação do estado nutricional das plantas*. Piracicaba: Potafós, 1989. 201p.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment*, v. 25, p. 239-250, 2002.

NEVES, N. R.; OLIVA, M. A.; CENTENO, D. C.; COSTA, A. C.; RIBAS, R. F.; PEREIRA, E. G. Photosynthesis and oxidative stress in the restinga plant species *Eugenia uniflora* L. exposed to simulated acid rain and iron ore dust deposition: Potential use in environmental risk assessment. *Science of the Total Environment*, v. 407, p. 3740-3745, 2009.

OLIVEIRA, C. R. M.; OLIVA, M. A.; PEREIRA, E. G. Efeito do material particulado de ferro no teor de pigmentos de *Schinus terebinthifolius* Raddi. *Revista Brasileira de Biociências*, v. 5, p. 681-683, 2007.

OXBOROUGH, K.; BAKER, N.R. An instrument capable of imaging chlorophyll a fluorescence from intact leaves at very low irradiance and at the cellular and sub-cellular levels of organisation. *Plant, Cell and Environment*, v. 20, p. 1473-1483, 1997.

PARIDA, A. K.; DAS, A. B.; MITTA, B. Effects of NaCl stress on the structure, pigment complex composition, and photosynthetic activity of mangrove *Bruguiera parviflora* chloroplasts. *Photosynthetica*, v. 41, n. 2, p. 191-200, 2003.

PEREIRA, W. S.; FREIRE, R. S. Ferro zero: uma nova abordagem para o tratamento de águas contaminadas com compostos orgânicos poluentes. *Química Nova*, v. 28, p. 130-136, 2005.

PEREIRA, E. G. *Efeitos fisiológicos e bioquímicos causados pela deposição de ferro particulado em Clusia hilariana, uma espécie de restinga*. Viçosa, MG: UFV, 2006. 64 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal - Universidade Federal de Viçosa, 2006.

PEREIRA, E. G.; OLIVA, M. A.; KUKI, K. N.; CAMBRAIA, J. Photosynthetic changes and oxidative stress caused by iron ore dust deposition in the tropical CAM tree *Clusia hilariana*. *Trees*, v. 23, p. 277-285, 2009.

POLJAKOFF-MAYBER, A.; GALE, J. *Plants in saline environment: ecological studies*. New York: Springer-Verlag, 1975. 15 v., 213 p.

PRUSTY, B. A. K.; MISHRA, P. C.; AZZEZ, P. A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national high way at Sambalpur, Orissa, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 60, p. 228-235, 2005.

PUGH R. E.; DICK, D. G.; FREDEEN, A.L. Heavy metal (Pb, Zn, Cd, Fe and Cu) contents of plant foliage near the Anvil Range lead/zinc mine, Faro, Yukon Territory. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 52, p. 273-279, 2002.

SAIRAM, R. K.; TYAGI, A. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Current Science*, v. 86, p. 407-421, 2004.

SCHÜTZENDÜBEL, A.; POLLE, A. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. *Journal of Experimental Botany*, v. 53, p. 1351-1365, 2002.

SILVA, L. C.; OLIVA, M. A.; AZEVEDO, A. A.; ARAÚJO, J. M. Responses of restinga plant species to pollution from an iron pelletization factory. *Water, Air and Soil Pollution*, v. 175, p. 241-256, 2006.

SOUZA-SANTOS, P.; RAMOS, R. S.; FERREIRA, S. T.; CARVALHO-ALVES, P. C. Iron-induced oxidative damage of corn root plasma membrane H⁺-ATPase. *Biochimica et Biophysica Acta*, v. 1512, p. 357-366, 2001.

SUDHIR, P.; MURTHY, S. D. S. Effects of salt stress on basic processes of photosynthesis. *Photosynthetica*, v. 4, p. 481-486, 2004.

SUH, H.; KIM, C. S.; LEE J.; JUNG, J. Photodynamic effect of iron excess on photosystem II function in pea plants. *Photochemistry and Photobiology*, v. 75, p. 513-518, 2002.

TARHANEN, S.; METSÄRINNE, S.; HOLOPAINEN, T.; OKSANEN, J. Membrane permeability response of lichen *Bryoria fuscescens* to wet deposited heavy metals and acid rain. *Environmental Pollution*, v. 104, p. 121-129, 1999.

TAYLOR, G. J.; CROWDER, A. A. Use of the DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants. *American Journal of Botany*, v. 70, p. 1254-1257, 1983.

VANSUYT, G.; LOPEZ, F.; INZÉ, D.; BRIAT, J.; FOURCROY, P. Iron triggers a rapid induction of ascorbate peroxidase gene in *Brassica napus*. *FEBS Letters*, v. 410, n. 1, p. 195-200, 1997.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophyll a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*, v. 144, p. 307-313, 1994.

ZERRA, F.; MACRI, F. Marine aerosol and stone decay. *The Science of The Total Environment*, v. 167, p. 123-143, 1995.

ZHU, Z. J.; WEI, G. Q.; LI, J.; QIAN, Q. Q.; YU, J. Q. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Science*, v. 167, p. 527-533, 2004.