

CLÁUDIO ROBERTO MEIRA DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS PELA DEPOSIÇÃO ÁCIDA E
DE FERRO PARTICULADO SOBRE PROCESSOS FISIOLÓGICOS E
REPRODUTIVOS EM ESPÉCIES DE RESTINGA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Botânica, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

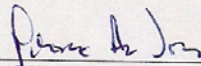
**VIÇOSA
MINAS GERAIS- BRASIL
2009**

CLÁUDIO ROBERTO MEIRA DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS PELA DEPOSIÇÃO ÁCIDA E DE FERRO
PARTICULADO SOBRE PROCESSOS FISIOLÓGICOS E REPRODUTIVOS EM
ESPÉCIES DE RESTINGA

Tese apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Botânica, para obtenção do título de
Doctor Scientiae.

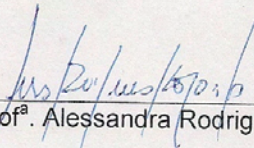
APROVADA: 2 de abril de 2009.



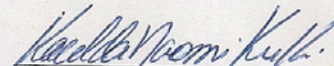
Prof^a. Milene Faria Vieira
(Coorientadora)



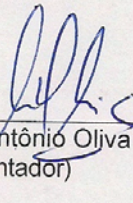
Prof^a. Aristéa Alves Azevedo
(Coorientadora)



Prof^a. Alessandra Rodrigues Kozovits



Pesq. Kacilda Naomi Kuki



Prof. Marco Antônio Oliva Cano
(Orientador)

DEDICO

A Deus

A meus pais Josedite e Zelândio

A meus irmãos Vivian e Júnior

*A Edite da Silva Meira, José Auto da Silva Meira (**in memoriam**), Dária*

Miranda de Oliveira e Joaquim Evangelista de Oliveira

A Denise

Por estarem sempre ao meu lado, pelo amor, carinho, incentivo e por serem muito importantes em minha vida.

*"...Não me dêem fórmulas certas, porque eu não espero acertar sempre.
Não me mostre o que esperam de mim, porque vou seguir meu coração!
Não me façam ser o que não sou, não me convidem a ser igual, porque
sinceramente sou diferente!
Não sei amar pela metade, não sei viver de mentiras, não sei voar com
os pés no chão.
Sou sempre eu mesmo, mas com certeza não serei o mesmo pra
SEMPRE!"*
(Clarice Lispector)

*"O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas na
intensidade com que acontecem.
Por isso, existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas
incomparáveis"*
(Fernando Pessoa)

"VALEU A PENA, sou pescador de ilusões"!!!!!!

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade concedida.
Ao Departamento de Biologia Vegetal (DBV) e ao programa de pós-graduação em Botânica.
A Universidade do Estado da Bahia (UNEB).
A CAPES pela bolsa de estudos.
A SAMARCO Mineração S. A. pelo apoio financeiro à pesquisa.
Ao professor Marco Oliva pela orientação e ensinamentos.
A professora Aristéa pela coorientação, ensinamentos e incentivo.
A professora Milene pela coorientação, confiança e palavras de incentivo.
A professora Alessandra por ter participado da banca e pelas sugestões.
A Dra. Kacilda pelos ensinamentos e amizade durante o doutorado.
A EMBRAPA/CNPCT por oportunizar a realização das análises polínicas e em especial a Dra. Maria do Carmo Bassols Raseira.
Ao professor Wagner Otoni, pelo exemplo de competência, inteligência e de ser humano preocupado com o próximo.
A professora Rosane Aguiar, pelo exemplo profissional.
Ao professor Aridelson Mendes, grande ser humano.
Ao professor Marcos Wanderlei e família.
Ao professor Edgar Lira pela ajuda e incentivo nos momentos difíceis
Aos funcionários da secretária do DBV: Ângelo (Baiano) pela amizade e companheirismo, Francine, Chiquino, Ilza e Luciene, muito obrigado!
Ao Rogério Gomide, amigo, companheiro e exemplo de profissional capacitado para as mais diversas funções. Ao João Bosco, Celso, José do Carmo, Gilmar, Carlos, Osvaldo, Toninho e Luis (SAMARCO) pela ajuda e colaboração.
Aos colegas de curso e de laboratório: Eduardo, Adrianeira e família, Elisa, Élcio, Clenilso, Letícias, Laisão, Pity, Claudinéia, Michele, Patrícias, Lud, Tiagos, Ricardo, Lílian, Carols, Michelia, Andreza, Rogério, Alan, Maione, Zanculino, Dayana, Amilcar, Walnir, Jaqueline, Vitor, Alice, Ana, Lourdes, Werner, Roberto, Elaine, Diego, Juliana, José, Graci, Kellen, Inês, Mara, Everton, Vivi, Gisele, Ronnie, Klever, Edmar, Eliane, Antonio, Érica, Regina, Daniela, Danilo, Tales, Paulo, ADV, Roberta, Kolberg, Klebs, Gilmar, Cristiano.
A todas as pessoas que direta ou indiretamente me ajudaram e apoiaram.

BIOGRAFIA

Cláudio Roberto Meira de Oliveira nasceu na cidade de Livramento de Nossa Senhora, no Estado da Bahia, a 14 de março de 1977. Viveu os primeiros anos da juventude no interior da Bahia. Aos quinze anos foi para Vitória da Conquista estudar Agronomia. Desde então, começou a patentear uma vocação na área do ensino, pesquisa e extensão participando de diversas atividades ligadas a vida acadêmica.

Em 2000, iniciou o mestrado em Fisiologia Vegetal na Universidade Federal de Lavras, em Minas Gerais. Em 2002 retornou para Bahia onde iniciou a carreira como docente em escola pública e particular. No mesmo ano foi aprovado em concurso público para docente da Universidade do Estado da Bahia (UNEB).

Em 2005 foi aprovado no doutorado em Botânica da Universidade Federal de Viçosa, também em Minas Gerais.

Em abril de 2009 submeteu-se à defesa da tese intitulada *Avaliação dos efeitos causados pela deposição ácida e de ferro particulado sobre processos fisiológicos e reprodutivos em espécies de Restinga*, regressando à Bahia no mesmo ano para lecionar na UNEB.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix	
ABSTRACT	xi	
1. Antecedentes e Justificativa	1	
2. Objetivo Geral	2	
3. Referências	3	
CAPÍTULO I		
AVALIAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS PELA DEPOSIÇÃO ÁCIDA E DE FERRO PARTICULADO NA FISIOLOGIA E FENOLOGIA REPRODUTIVA DE ESPÉCIES DE RESTINGA		5
Resumo	6	
Abstract:.....	7	
1. Introdução.....	8	
2. Material e Métodos	10	
2.1. Locais de estudo	10	
2.2. Material vegetal.....	11	
2.3 Avaliações em área de restinga.....	13	
2.4 Avaliações em laboratório.....	16	
2.5 Análise estatística	17	
3. Resultados e discussão.....	18	
- Partículas em suspensão.....	18	
- Dados climatológicos	19	
- Solo.....	19	
- Material particulado total (MPT) depositado na superfície foliar	20	
- Conteúdo de ferro e de enxofre no tecido foliar.....	24	
- Teor de pigmentos	28	
- Injúrias	32	
- Fenologia reprodutiva	35	
- Efeitos do MSPFe e da deposição ácida na biologia do pólen	40	
4. Conclusões	44	
5. Referências.....	45	

CAPÍTULO II

RESPOSTAS FISIOLÓGICAS, ANATÔMICAS E FENOLÓGICAS DE ESPÉCIES DE RESTINGA SUBMETIDAS À DEPOSIÇÃO SIMULADA DE MSPFe NO SOLO E NA FOLHA..... 51

Resumo	52
Abstract.....	53
1. Introdução.....	54
2. Material e Métodos	56
2.1 Local de estudo e material vegetal.....	56
2.2 Avaliações.....	59
2.3 Análise estatística	62
3. Resultados e discussão	63
- Ferro total na matéria seca foliar	63
- Temperatura foliar e injúrias	65
- Teor de pigmentos	68
- Fluorescência da Clorofila a.....	70
- Trocas gasosas.....	72
- Histoquímica	74
- Fenologia reprodutiva	79
- Efeitos do MSPFe e da acidez na emergência de plântulas.....	81
4. Conclusões	84
5. Referências.....	85

CAPÍTULO III

EFEITOS DO Fe-EDTA NA FENOLOGIA REPRODUTIVA, BIOMASSA E DESEMPENHO FOTOSSINTÉTICO DE PLANTAS DE RESTINGA..... 90

Resumo	91
Abstract.....	92
1. Introdução.....	93
2. Materiais e Métodos	94
2.1 Local de estudo e material vegetal.....	94
2.2 Avaliações.....	96
2.3 Análise estatística	98
3. Resultados e discussão	99
- Ferro total na matéria seca	99

- <i>Injúrias foliares</i>	101
- <i>Teor de pigmentos</i>	104
- <i>Fluorescência da clorofila a</i>	106
- <i>Trocas gasosas</i>	108
- <i>Fenologia reprodutiva</i>	110
- <i>Biomassa vegetal</i>	113
4. Conclusões.....	117
5. Referências.....	118
CONCLUSÕES GERAIS.....	123

RESUMO

OLIVEIRA, Cláudio Roberto Meira de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2009. **Avaliação dos efeitos causados pela deposição ácida e de ferro particulado sobre processos fisiológicos e reprodutivos em espécies de restinga.** Orientador: Marco Antônio Oliva Cano. Coorientadoras: Aristéa Alves Azevedo e Milene Faria Vieira.

O bioma Mata Atlântica apresenta diferentes formações vegetacionais. Entre elas encontra-se a Restinga que, além de pouco estudada encontra-se exposta aos efeitos da deposição ácida e de material sólido particulado de ferro (*MSPFe*) emitidos pela atividade das indústrias mineradoras de ferro localizadas em suas adjacências, principalmente no litoral do Espírito Santo. O presente estudo foi realizado em área de Restinga (exposta e não exposta aos possíveis efeitos das emissões industriais) e em ambiente semi-controlado sendo avaliados parâmetros fisiológicos e ecológicos. Na área de Restinga foram estudadas seis espécies: *Lantana tiliaefolia*, *Cordia curassavica*, *Byrsonima sericea*, *Psidium guajava*, *Anacardium occidentale* e *Schinus terebinthifolius*. O monitoramento em área de Restinga revelou que as espécies localizadas na área exposta apresentaram um maior conteúdo de ferro nos tecidos foliares, o que pode colaborar para o desenvolvimento de toxidez e resultar no aparecimento de lesões. Os resultados do monitoramento fenológico indicaram que a produção de flores e frutos foi reduzida pela exposição à deposição ácida e de *MSPFe*, especialmente em *A. occidentale* e *P. guajava*. Em experimentos de germinação e emergência de plântulas observou-se que o *MSPFe* limitou a emergência das plântulas à medida que a quantidade depositada no solo ia aumentando. A associação do *MSPFe* com à acidez também causou reduções na emergência das plântulas possivelmente pelos efeitos químicos e físicos dos seus componentes. A deposição simulada de *MSPFe* sobre as folhas e solo de *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* e *S. terebinthifolius* promoveu o aparecimento de lesões foliares, redução no teor de pigmentos, afetou negativamente a fenologia reprodutiva dessas espécies e promoveu queda na taxa fotossintética e, aumento no conteúdo de ferro no tecido foliar. Com as mesmas espécies foi realizado um experimento com solução nutritiva de Hoagland & Arnon a meia força iônica e pH 5. Os

resultados demonstraram que as espécies apresentaram diferentes graus de sensibilidade aos efeitos tóxicos do Fe-EDTA sendo que da menos tolerante para a mais tolerante temos: *S. terebinthifolius* > *C. curassavica* > *L. tiliaefolia*. Em ordem inversa, observou-se em *L. tiliaefolia* um significativo acúmulo de ferro em seus tecidos ao passo que *S. terebinthifolius* o acúmulo foi até duas vezes menor, apesar de apresentar as maiores quedas na taxa fotossintética. De maneira geral, a produção de flores e frutos foi reduzida nas plantas expostas ao Fe-EDTA. Os resultados obtidos permitem concluir que as emissões provenientes das atividades da indústria mineradora de ferro podem afetar a vegetação da restinga em seus diferentes níveis em longo prazo, provocar um declínio na quantidade e diversidade das espécies mais sensíveis.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Cláudio Roberto Meira de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, april, 2009. **Evaluation of effects of acid deposition and iron particulate matter on physiological and reproductive process of restinga species.** Adviser: Marco Antônio Oliva Cano. Co-Advisers: Aristéa Alves Azevedo and Milene Faria Vieira.

The Mata Atlântica bioma includes different ecosystems. Between them the Restinga ecosystem is the less studied. It is continuously exposed to the effects of the acid deposition and iron solid particulate matter (SPM_{Fe}) released by the activity of iron ore mining industries in the coast of the Espírito Santo state in Brazil. The present study was carried out in Restinga area (exposed and not exposed to the industrial emissions) and in semi-controlled environment. Physiological and ecological parameters were evaluated. In the Restinga area six plant species were studied: *Lantana tiliaefolia*, *Cordia curassavica*, silky *Byrsonima*, *Psidium guajava*, *Anacardium occidentale* and *Schinus terebinthifolius*. The species monitored in the polluted area showed higher iron content into the leaves. This high iron concentration promoted the development of toxicity and thus the appearance of injuries. The flowers formation and fruits production was reduced in the area exposed to the SPM_{Fe} and acid deposition. The most sensitive species was *A. occidentale* and *P. guajava*. The germination and emergence of plantlets was limited by the SPM_{Fe} deposition principally with the increasing of SPM_{Fe} deposited. The association of SPM_{Fe} with the acidity also caused reductions in the emergence of the plantlets possibly due the chemical and physical effects of its components. The simulated deposition of SPM_{Fe} on the soil and on the leaves of *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* and *S. terebinthifolius* caused the appearance of injuries, reduction in the content of pigments, and change negatively the reproductive phenology of these species. Moreover, was reported reduction in photosynthesis and increased iron content in the leaves. An experiment was performed with the same plant species growing in Hoagland & Arnon nutrient solution with half ionic strength and pH 5. The results showed that the species presented different degrees of sensibility to the toxic effects of Fe-EDTA. The tolerance level decrease in the following order: *S. terebinthifolius* > *C. curassavica* > *L. tiliaefolia*. In reverse order, was

observed a significant iron accumulation in the roots and leaves of *L. tiliaefolia* twice bigger than the values found in *S. terebinthifolius*, in spite of the reductions in photosynthetic rate in these species. In general, the flowers and fruits production was reduced in plants exposed to the Fe-EDTA treatment. The results showed that the emissions released from iron mining activities can affect the Restinga vegetation in different levels. In long term it can cause a decline in quantity and diversity of the most sensitive species.

1. Antecedentes e Justificativa

Poluentes são definidos como qualquer substância adicionada ao ambiente em concentração suficientemente alta para causar efeito mensurável nos seres vivos (Freedman, 1995). Os poluentes podem ser de origem natural e antrópica. Os de origem natural são provenientes da atividade vulcânica, de incêndios florestais e da suspensão de partículas, como os sais marinhos e as partículas de solo. Os de origem antrópica provem de fontes móveis, como os veículos automotores e de fontes estacionárias como as indústrias (Krupa, 1997).

A presença de uma fonte estacionária de poluentes como uma indústria mineradora pode gerar e emitir quantidade significativa de poluentes, especialmente o material sólido particulado e o dióxido de enxofre (SO₂) que podem causar alterações na fitofisionomia da vegetação exposta ao longo do tempo (Yunus & Iqbal, 1996; Silva, 2003; Pereira *et al.*, 2009).

Diversas unidades de processamento de minério de ferro encontram-se instaladas em regiões vizinhas às formações de Restinga, como as encontradas em certas localidades litorâneas do Espírito Santo. Ao se instalarem nessas localidades, as indústrias trazem consigo muitos benefícios sócio-econômicos, mas, agregado aos benefícios existe risco eminente de impacto ao ambiente pelas descargas que são lançadas durante o processo de beneficiamento e produção (Silva *et al.*, 2006; Kuki, 2007).

As alterações causadas na vegetação por este tipo de poluição podem resultar em mudanças nos padrões de desenvolvimento e na dinâmica populacional, podendo levar ao desaparecimento das espécies mais sensíveis pelo longo tempo de exposição. Contudo, nem todas as espécies vegetais apresentam o mesmo grau de sensibilidade aos poluentes ambientais, sendo comum encontrar nas plantas graus de tolerância diferenciados (Lopes *et al.*, 2000; Grantz *et al.*, 2003).

Algumas espécies vegetais apresentam sensibilidade e especificidade a uma série de poluentes exibindo sintomas precoces de injúria (Treshow, 1984). Nesse sentido, o estágio de desenvolvimento em que a planta se encontra durante o período de exposição também pode acentuar as respostas ao agente

estressor (Alexeyev, 1995). Além disso, os efeitos causados pela emissão de poluentes como o *MSPFe* podem ser agravados pelas condições meteorológicas e pela localização topográfica do terreno (Silva, 2003; Kuki, *et al.*, 2008).

Existe pouca informação disponível acerca dos efeitos tóxicos do ferro em espécies vegetais tropicais. A ação conjunta da deposição úmida ácida e do *MSPFe* configura uma situação de distúrbio às comunidades vegetais localizadas no entorno das fontes emissoras, uma vez que o efeito de um pode ser potencializado pela ação do outro. A produtividade, o vigor, a formação de flores e frutos, o processo germinativo e o estabelecimento inicial das plântulas são particularmente susceptíveis a esta forma de estresse (Wong *et al.*, 1978; Agrawal & Agrawal, 1999; Peña *et al.*, 2001).

Diferentes trabalhos (Lopes *et al.*, 2000; Silva, 2003; Neves, 2004; Pereira, 2006; Oliveira *et al.*, 2007; Kuki *et al.*, 2008) já foram realizados em área de Restinga do Espírito Santo e em ambiente semi-controlado de casa de vegetação para se avaliar os efeitos da deposição ácida e de *MSPFe* sobre a fisiologia, a anatomia e a produção de espécies de Restinga. Informações dos efeitos do *MSPFe* e da deposição ácida sobre a formação do pólen, a produção de flores e frutos e a germinação de sementes se faz necessária para estabelecer relações entre este tipo de poluição e a reprodução das espécies expostas.

2. Objetivo Geral

Avaliar os efeitos da deposição ácida e de *MSPFe* sobre processos fisiológicos e reprodutivos em espécies de Restinga localizadas em área exposta (poluída) e não exposta (referência) e em ambiente semi-controlado de casa de vegetação. Assim, foram utilizadas seis espécies encontradas na Restinga local: *Lantana tiliaefolia* Cham. (Verbenaceae), *Cordia curassavica* (Jack.) Roem. & Shult. (Boraginaceae), *Byrsonima sericea* DC. (Malpighiaceae), *Anacardium occidentale* L. (Anacardiaceae), *Psidium guajava* L. (Myrtaceae) e *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae).

3. Referências

AGRAWAL, M. & AGRAWAL, S. B. (1999) Effects of air pollution on plant diversity. In: Agrawal, M. and Agrawal. (eds.): **Environmental Pollution and Plants Responses**. Lewis Publishers, Florida, p. 137- 152.

ALEXEYEV, V. A. (1995) Impacts of air pollution on far north forest vegetation. **Science of Total Environment**.160: 605-617.

FREEDMAN, B. (1995) **Environmental ecology. The ecological effects of pollution, disturbance and other stresses**. 2nd. Academic Press Inc. San Diego.

GRANTZ, D. A., GARNER, J. H. B. & JOHNSON, D. W. (2003) Ecological effects of particulate matter. **Environmental international**. 29: 213- 239.

KRUPA; S. V.; KICKERT, R. N. (1989) The greenhouse effect: impacts of ultraviolet-B (UV-B) radiation, carbon dioxide (CO₂) and ozone (O₃) on vegetation. **Environmental Pollution**. 61: 263-391.

KUKI, K. N. (2007) **Emissões da indústria de minério de ferro como fatores de risco ecológico em espécies ocorrentes na restinga de Anchieta, Espírito Santo, Brasil**. Tese de Doutorado em Botânica, UFV, 95p.

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

LOPES, S. A., OLIVA, M. A. & MARTINEZ, C. A. (2000) Impacto das imissões de dióxido de enxofre e deposição de material 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, São Carlos, p. 53- 71.

NEVES, N. R. (2004) **Fotossíntese e estresse oxidativo em plantas de Eugenia uniflora L. submetidas ao excesso de ferro particulado e chuva ácida**. Dissertação de Mestrado em Fisiologia Vegetal, UFV, 45p.

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

PEÑA, C. E.; CARTER, D. E.; AYALA-FIERRO, F. (2001) **Toxicologia Ambiental de Riesgos y Restauración Ambiental**. Southwest Hazardous Waste Program. University of Arizona. 204p.

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

PEREIRA, E. G. (2006) **Efeitos fisiológicos e bioquímicos causados pela deposição de ferro particulado em *Clusia hilariana*, uma espécie CAM de restinga**. Tese de Mestrado em Fisiologia Vegetal, UFV.

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

SILVA, L. C. (2003) **Avaliações bioquímicas, fisiológicas e anatômicas dos efeitos de poluentes atmosféricos sobre espécies vegetais de restinga**. Tese de Doutorado em Fisiologia Vegetal, UFV 132p.

TRESHOW, M. (1984) **Air pollution and plant life**. John Wiley and Sons Publish, 486 p.

WONG, M.H., CHAN, K.C. AND CHOY, C.K. (1978) The effect of the iron ore tailing on the costal environment of Tolo harbor, Hong Kong. **Environmental Research**. 15: 342-356

YUNUS, M. & IQBAL, M. (Eds.) (1996) **Plant response to air pollution**. John Wiley & Sons: New York.

CAPÍTULO I

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS CAUSADOS PELA DEPOSIÇÃO ÁCIDA E DE FERRO PARTICULADO NA FISIOLOGIA E FENOLOGIA REPRODUTIVA DE ESPÉCIES DE RESTINGA

Resumo: No litoral brasileiro é possível encontrar um mosaico vegetacional de alta relevância ambiental. Entre as diferentes formações encontra-se a Restinga, ambiente pouco estudado e que vem sofrendo com a constante emissão de poluentes devido à presença de diferentes indústrias, principalmente as do setor minerador, localizadas em suas adjacências, como observado no litoral sul do Espírito Santo. O presente estudo avaliou os efeitos das emissões provenientes de uma indústria mineradora de ferro na fisiologia e fenologia reprodutiva de espécies representativas da restinga local. *Lantana tiliaefolia*, *Cordia curassavica*, *Byrsonima sericea*, *Psidium guajava*, *Anacardium occidentale* e *Schinus terebinthifolius* foram monitoradas através de parâmetros fisiológicos e fenológicos em uma área exposta a deposição ácida e de material sólido particulado de ferro (MSPFe) e em uma área não exposta. Para avaliação fisiológica, folhas maduras foram coletadas para determinação do teor de pigmentos, conteúdo de ferro e enxofre e também para quantificar a deposição de material particulado total. Sementes das espécies estudadas foram coletadas e postas para germinar em casa de vegetação. O monitoramento fenológico avaliou além da formação de flores e frutos, o índice meiótico e a viabilidade do pólen. Os resultados indicam que as características das espécies avaliadas foram afetadas pelas emissões da indústria mineradora de ferro. Além disso, o teor de clorofila e o conteúdo de ferro das espécies avaliadas na área exposta foram superiores ao das espécies localizadas na área não exposta. O índice meiótico e a viabilidade do pólen das espécies localizadas na área exposta também foram reduzidos. Na área exposta, a produção de frutos também foi comprometida, principalmente em *A. occidentale* e *P. guajava*. A partir da integração das avaliações fisiológicas e ecológicas é possível sugerir que a flora da Restinga pode, a longo prazo, ter sua riqueza comprometida devido às emissões da indústria localizadas em sua adjacência.

Palavras-chave: Deposição ácida e de MSPFe, vegetação de Restinga, fenologia reprodutiva,

Abstract: In the Brazilian coast it is possible to find a plant structure mosaic of high environmental relevance. Between the different formations, the Restinga is an environment with few studies and which is suffering with the constant emission of pollutants due to the presence of different industries, especially those of the mining sector, located in adjacent areas, like in the south coast of the Espírito Santo state (Brazil). The present study evaluated the effects of the emissions from an iron mining industry in the physiology and reproductive phenology of representative species of the local Restinga. *Lantana tiliaefolia*, *Cordia curassavica*, *Byrsonima sericea*, *Psidium guajava*, *Anacardium occidentale* and *Schinus terebinthifolius* were monitored through physiologic and phenology parameters in an area exposed the acid deposition and iron solid particulate matter (SPMFe) or in a non-exposed area. For physiological evaluations, mature leaves were collected to determinate the content of pigments, iron and sulfur and also to quantify the deposition of total SPMFe. Seeds of the studied species were collected and germinated at greenhouse. With the phenology monitoring was evaluated the formation of flowers and fruits, the meiotic rate and the viability of the pollen. The results indicated that the characteristics evaluated in the species were affected by the emissions of the iron mining industry. Also, the iron and chlorophyll content in the plants growing in the exposed area were higher compared to the plants located in the non-exposed area. The meiotic rate and the viability of the pollen of the species located in the exposed area were reduced. In the exposed area, the fruit production was also reduced, especially in *A. occidentale* and *P. guajava*. From the integration of the physiological and ecological evaluations it is possible to suggest that the flora of the Restinga can, in the long term, have it's biodiversity changed due to the emissions of the industry located in his adjacency.

Keywords: Acid deposition and iron ore dust, Restinga structure plant, reproductive fenology

1. Introdução

O material sólido particulado de ferro (*MSPFe*) quando depositado sobre a parte aérea das plantas pode afetar a fisiologia, a anatomia, a reprodução das espécies e, eventualmente, ocasionar alterações na composição florística da vegetação a longo prazo (Silva, 2003; Kuki *et al.*, 2008).

O estado do Espírito Santo tem, nos últimos anos, apresentado um forte crescimento econômico, principalmente em seu litoral, devido a significativa quantidade de indústrias do setor petrolífero e minerador em operação. A emissão de poluentes como o *MSPFe* pode afetar o desenvolvimento de plantas e alterar a fitofisionomia de áreas adjacentes à fonte emissora, provocando uma situação de risco ambiental uma vez que as emissões de *MSPFe* são potencialmente deletérias (Silva, 2003; Neves, 2004; Pereira, 2006; Kuki, 2007).

No litoral do Espírito Santo, a deposição de *MSPFe* composto por micro e nano partículas, atinge o valor de $6\text{mg cm}^{-2}\text{ dia}^{-1}$ (Lopes *et al.*, 2000), cuja dispersão pelas áreas de restinga é favorecida pelos ventos originários do litoral em direção ao interior do continente carregados pelo aerossol marinho. Além destes, os diferentes compostos trazidos pelos ventos quando associados ao *MSPFe* podem também afetar o desenvolvimento das plantas localizadas nessas regiões (Silva, 2003; Kuki, 2007).

Embora a vegetação litorânea seja adaptada a diferentes fontes de estresse, como a alta radiação, temperatura elevada, aerossol marinho e disponibilidade hídrica (McCune, 1991; Barrick, 2003), a presença de uma fonte estacionária de poluentes como uma indústria mineradora, que lança no ambiente o *MSPFe* pode, ao longo do tempo, causar sérias alterações locais na composição florística da Restinga. Várias espécies vegetais apresentam elevada sensibilidade e especificidade a uma série de poluentes, exibindo sintomas decorrentes da ação dos agentes estressores (Yunus & Iqbal, 1996; Silva *et al.*, 2005; Pereira, 2006).

A deposição de *MSPFe* sobre as plantas ocasiona alterações físicas sobre a superfície foliar resultando na redução da energia solar para as células do mesófilo além de causar abrasão e aquecimento e interferir nas trocas gasosas (Farmer, 1993; Hirano *et al.*, 1995; Kampfenkel *et al.*, 1995; Grantz *et*

al., 2003; Silva, 2003; Kuki, 2007). Os efeitos químicos são decorrentes da reação dos constituintes do material particulado que entram em contato os componentes da epiderme foliar, resultando na lixiviação de nutrientes (Naidoo & Chirkoot, 2004; Prusty *et al.*, 2005; Pereira, 2006).

Quando depositado no solo, os metais oriundos de usinas mineradoras podem atingir níveis fitotóxicos e, em associação com a chuva ácida podem modificar a composição do substrato e a disponibilidade de nutrientes para as plantas (Farmer, 1993; Uhling & Juntilla, 2001). A combinação destes efeitos resulta, em geral, na produção de compostos indesejáveis ao metabolismo celular e alterações no crescimento e reprodução das plantas, causando, ao longo do tempo, mudanças no equilíbrio e composição do ecossistema (Bartakova *et al.*, 2001; Alvarez, *et al.*, 2003; Kozlov & Zvereva, 2004).

A Restinga é um ecossistema litorâneo do bioma Floresta Atlântica que pertence ao grupo das formações pioneiras com influência marinha que recobre cerca de 79% da costa (Lacerda *et al.*, 1993); encontrada em estreitas até extensas faixas de areia, sendo considerada uma comunidade edáfica. É formada por um mosaico de tipos vegetacionais localizados em praias, cordões arenosos, dunas e depressões, apresentando de acordo com o estágio sucessional, estrato herbáceo, arbustivo e arbóreo, este último mais para o interior do continente (CONAMA, 1993).

A presente pesquisa buscou avaliar os efeitos, a longo prazo, da deposição ácida e de *MSPFe* sobre processos que podem influenciar a composição florística da vegetação, como o índice meiótico, a viabilidade do pólen, a produção de flores e frutos e a germinação de sementes de diferentes espécies de Restinga.

2. Material e Métodos

2.1. Locais de estudo

Foram realizadas avaliações *in situ*, no período compreendido entre março de 2004 a dezembro de 2006, em duas áreas de vegetação de restinga localizadas nos municípios de Anchieta e Guarapari, Estado do Espírito Santo (Figura 1), sendo uma considerada área exposta ao *MSPFe* (usina de pelotização de minério de ferro) e outra tida como não exposta ao *MSPFe* (Parque Estadual Paulo César Vinha).

Foi considerada área exposta, fragmentos de restinga pertencentes a uma usina de pelotização de minério de ferro no município de Anchieta. A usina de pelotização de ferro localiza-se a 0,5 km do mar nas coordenadas geográficas 20°46'21.0" S e 40°34'52.3" W.

A área considerada como não exposta localiza-se no Parque Estadual Paulo César Vinha, a qual se compõe de fragmentos preservados com vegetação de restinga e localiza-se no município de Guarapari, com coordenadas geográficas 20°40'00" S e 40°29'51" W, a 30 km do complexo industrial minerador de ferro.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen é Aw, tropical quente e úmido com uma estação chuvosa predominante e uma estação seca não pronunciada durante os meses de inverno. A precipitação anual média é de aproximadamente 900 mm, a umidade relativa média do ar 70% e a temperatura média anual de 23,4°C.

Na usina mineradora o principal minério explorado é o itabirito, composto basicamente de hematita (Fe_2O_3) e quartzo (SiO_3) cujo beneficiamento gera pelotas de minério de ferro e material particulado grosso, rico em Fe^{+3} . Este, ao ser lançado na atmosfera aumenta a quantidade de material particulado total em suspensão (*MPT*). Também SO_2 e NO_2 são emitidos pelos fornos durante o processo de pelotização aumentando a quantidade de poluentes na atmosfera.



Figura 1: Localização das áreas de estudo. A área em preto no mapa do Brasil representa o Estado do Espírito Santo. O círculo evidencia a localização dos municípios de Anchieta e Guarapari, onde foram realizadas as avaliações.

2.2. Material vegetal

A escolha das espécies foi feita baseando-se na abrangência das mesmas nas áreas de estudo. Assim, as seis espécies vegetais selecionadas na restinga dos municípios de Anchieta e Guarapari foram: *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae), *Anacardium occidentale* L. (Anacardiaceae), *Psidium guajava* L. (Myrtaceae), *Byrsonima sericea* DC. (Malpighiaceae), *Cordia curassavica* (Jack.) Roem. & Shult. (Boraginaceae) e *Lantana tiliaefolia* Cham. (Verbenaceae). Foram marcados quatro indivíduos de cada espécie para os estudos em cada área.

Lantana tiliaefolia (Verbenaceae) é originária das Américas e África (Watanabe, 2005), conhecida como mal-me-quer, lantana ou cambará. Apresenta-se como arbusto de caule ramificado, possui pequenos espinhos nos ramos, as folhas são ovaladas, opostas, crenado-serradas, e a inflorescência capituliforme com flores perfeitas, vermelhas ou amarelas. O fruto é globuloso com uma semente no centro (drupa) (Corrêa, 1984). É encontrada em áreas tropicais e subtropicais; no Brasil, é encontrada em todos os Estados, desde o Amazonas até o Rio Grande do Sul (Zenimori & Passin, 2006).

Cordia curassavica (Boraginaceae) conhecida como guaimbé ou erva baleeira é originária das Américas, sendo encontrada desde a América Central até a região central da Argentina (Barroso *et al.*, 2002). No Brasil, tem maior distribuição na Floresta Atlântica e em regiões baixas da Amazônia (Lorenzi, 2003). Apresenta-se como arbusto muito ramificado. Suas folhas são simples, alternas, coriáceas, aromáticas, com margem denteada, superfície superior verde-escura e áspera. Inflorescências terminais reunidas em espigas laterais com flores perfeitas, brancas, pequenas e; frutos drupáceos e vermelhos quando maduros (Barroso *et al.*, 2002). As espécies de *Cordia* apresentam importância econômica, pois são amplamente utilizadas na indústria farmacêutica (Oliveira, 2006; Silva *et al.*, 2007).

Schinus terebinthifolius (Anacardiaceae) conhecida como aroeira-vermelha é nativa da América tropical. No Brasil, é encontrada em várias formações vegetacionais, desde Pernambuco até o Rio Grande do Sul (Carvalho, 1994). Por adaptar-se aos mais diferentes ambientes, é considerada uma espécie com grande plasticidade fenotípica (Lenzi & Orth, 2004). Apresenta-se como árvore de pequeno a médio porte e até mesmo como arbusto. As folhas são imparipinadas com dois a seis pares de folíolos verdes, elípticos a obovados, com nervuras claras e evidentes. É uma planta monóica (Ceruks *et al.*, 2007) apresentando flores pequenas, branco-esverdeadas, dispostas em inflorescências axilares e terminais do tipo racemo. Os frutos são pequenas drupas, esféricas, rosadas a avermelhadas (Lorenzi, 2002).

Anacardium occidentale (Anacardiaceae), conhecida como caju, apresenta porte arbóreo. Planta de clima tropical encontrada no litoral e nordeste do Brasil. Apresenta folhas alternas, pecioladas, onduladas, simples, glabras, de cor rósea quando jovens. As flores são dispostas em panículas terminais ramificadas. É uma planta andromonóica, com flores estaminadas produzidas em maior número (Freitas, 1997). O fruto é uma drupa reniforme sobre pedúnculo carnoso (Andersen & Andersen, 1989; Lorenzi & Souza, 2004).

Psidium guajava (Myrtaceae) conhecida como araçá ou goiaba é uma planta rústica, apresenta-se como arbusto ou árvore de pequeno porte. Originária da América tropical é amplamente encontrada no Brasil. Suas folhas são oblongo-elípticas, opostas, inteiras, de coloração verde clara, pubescente

quando jovens e com nervuras salientes. As flores são perfeitas, axilares, de coloração branca, com numerosos estames. Os frutos são do tipo baga, ovóides, de casca fina, lisa e verde, que se torna amarela quando madura (Andersen & Andersen, 1989; Lorenzi & Matos, 2002).

Byrsonima sericea (Malpighiaceae) encontrada em diferentes ambientes na América tropical, apresentando cerca de 150 espécies. Conhecida como murici apresenta-se como árvore ou arbusto. As folhas são simples, coriáceas, glabras e pubescentes na face inferior, com ápice ou ponta lanceolada. As flores são perfeitas, amarelas, dispostas em pequenos racemos (Mabberley 1993; Barros, 2002). A maioria das flores das espécies neotropicais de Malpighiaceae produz óleo em glândulas (elaióforos) localizadas no cálice como recompensa aos polinizadores (Teixeira & Machado, 2000).

As espécies estudadas apresentam exigências diferenciadas quanto ao ambiente. O murici (*B. sericea*) e o caju (*A. occidentale*) são mais exigentes em termos de hábitat para o crescimento e estabelecimento enquanto as demais espécies apresentam comportamento oportunista, explorando várias formações vegetacionais e áreas alteradas.

O material testemunho foi depositado no Herbário VIC (31849, 31851, 31848, 31850, 27181 e 27188), da Universidade Federal de Viçosa.

2.3 Avaliações em área de restinga

- Partículas em suspensão, dados climáticos e de solo

A quantidade de material particulado em suspensão na atmosfera foi determinada na área da usina por estações de monitoramento HI-VOL pertencentes à usina de pelotização de minério de ferro.

Os dados de precipitação foram coletados de estações meteorológicas instaladas na área da usina de pelotização de minério de ferro (Anchieta).

Foram retiradas amostras compostas de solo a 20 cm de profundidade dos locais onde as plantas estudadas estavam localizadas para a determinação da composição física e química. As análises foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo da UFV.

- *Deposição de material particulado total (MPT)*

Na área exposta o *MPT* depositado na superfície foliar foi considerado como *MSPFe* devido a grande quantidade de ferro presente no ambiente oriundo das emissões da usina de pelletização e, na área não exposta como *MPT* uma vez que o material particulado depositado é originário de diferentes fontes.

Nas áreas estudadas, as análises da deposição de *MSPFe* e *MPT* foram realizadas em cinco folhas coletadas no terceiro ou quarto nó de ramos localizados no terço-médio das plantas, em cada indivíduo marcado, nas seis espécies, na estação seca e na estação chuvosa de cada ano.

Com o auxílio de um pincel macio, as folhas foram lavadas individualmente com água e o conteúdo depositado em frascos de vidro com peso conhecido. Após um período de 30 horas de decantação, os frascos foram transferidos para uma estufa até evaporação completa da água. Após resfriamento, os frascos foram pesados novamente (adaptado de Kuki, 2007).

As folhas foram prensadas e transportadas para determinação da área foliar. Para tal determinação, utilizou-se um medidor vertical de área foliar (Delta MK2- Delta Devices Ltd, England). A quantidade de *MSPFe* e *MPT* depositada foi expressa em mg mm^{-2} de área foliar ao ano.

- *Conteúdo de ferro, enxofre e nitrogênio em tecidos foliares*

Para determinação do conteúdo de Fe total, folhas foram lavadas com água deionizada, solução de EDTA (1mM) e, novamente água deionizada para garantia da total remoção do material particulado depositado. A secagem do material fresco foi realizada em estufa com circulação de ar a $75\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 72 horas. Posteriormente, o material vegetal foi reduzido em moinho de inox a partículas com dimensões menores que 1 mm. Quinhentos miligramas do material foram digeridos em solução nitro-perclórica (3:1v/v) a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o conteúdo de Fe do eluído foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica (Kampfenkel *et al.*, 1995).

O conteúdo de S e N total foi determinado mediante rotina do Laboratório de análise de tecidos vegetais do DPS da UFV.

- Teor de pigmentos

Os teores de clorofilas *a* (Cl_a), *b* (Cl_b) e de carotenóides foram determinados mensalmente nas espécies estudadas utilizando-se dimetilsulfóxido (DMSO) como extrator (Wellburn, 1994). Três discos foliares de 5 mm de diâmetro foram coletados de folhas expandidas do terceiro nó e incubados em 7 mL de DMSO saturado com carbonato de cálcio em recipientes cobertos com papel alumínio. O período de incubação foi de 24 horas para *C. curassavica* e *A. occidentale* e 48 para as outras espécies. As absorvâncias do extrato 665,1; 649,1 e 480,0 foram lidas para determinação da Cl_a , Cl_b e carotenóides respectivamente, em espectrofotômetro (U- 2000 UV/Vis- Hitachi Ltd, Japan) e os valores expressos em $\mu\text{g cm}^{-2}$.

- Fenologia reprodutiva e injúrias

O monitoramento da fenologia e das injúrias das seis espécies estudadas foi realizado no período compreendido entre janeiro de 2004 a dezembro de 2006.

Foram contadas flores e frutos por inflorescência em três ramos, por planta avaliada (adaptado de Silva, 2003).

Para de obter um indicativo da produção, foi calculado o índice de pegamento de frutos (*IPF*), sendo:

$$IPF = NF/NB$$

Onde: **NB**= número de flores emitidas e contadas durante as avaliações fenológicas e, **NF**= número de frutos produzidos (adaptado de Corrêa *et al.*, 2002).

As injúrias nas folhas das espécies estudadas foram definidas pela presença de manchas (clorose, necrose) ou lesões. Para tal definição, dois avaliadores atribuíram notas de acordo com a porcentagem da área foliar injuriada, obedecendo a seguinte escala: 0- sem injúrias; 1- com injúrias em até 25% da área foliar; 2- com injúrias de 26 a 50% da área foliar; 3- de 51 a 75%

da área foliar com injúrias; e 4- com injúrias de 76 a 100% da área foliar. As observações foram realizadas juntamente com aquelas da fenologia.

- *Caracterização do indumento foliar*

Nas espécies estudadas, foram realizadas observações do indumento em folhas expandidas com o auxílio de um estereomicroscópio Zeiss.

2.4 Avaliações em laboratório

- *Efeitos do MSPFe na biologia do pólen*

Índice meiótico (IM)

Gemas e botões florais de tamanho e diâmetro variados foram coletados para observação do *IM* das espécies estudadas. As gemas e botões florais dessas espécies foram acondicionados em frascos contendo solução de etanol-ácido propiônico (2:1) e conservados a 4°C. As análises foram feitas no Laboratório de Melhoramento Genético da EMBRAPA Clima Temperado, Pelotas, RS.

Para a montagem das lâminas procedeu-se ao esmagamento das anteras em solução de carmim propiônico 1%. Em seguida, as lâminas foram ligeiramente aquecidas em chama (Jelenkovic & Harrington, 1972). Para a determinação do *IM* foi considerada a fase de formação das tétrades.

O *IM* foi calculado seguindo a fórmula proposta por Love (1949), sendo:

$$IM = TN / TT$$

Onde: **TN**= número de tétrades normais e **TT**= número total de tríades, tétrades e políades analisadas.

Foram consideradas tétrades normais (quatro células de tamanho uniforme) e anormais, todas aquelas que apresentaram número diferente de quatro (tríades, políades). Procedeu-se a observação de pelo menos 100 células em fase final de meiose por gema ou botão floral.

Viabilidade do pólen

De cada planta marcada em área de Restinga, exceto as de *A. occidentale* e *P. guajava* que somente apresentaram flores na área não exposta, foram coletadas quatro flores em pré-antese e estocadas em etanol 70%. As lâminas foram confeccionadas macerando-se as anteras em uma gota de carmim-acético 2% (Rardford *et al.* 1974), seguida da contagem de 1000 polens por espécie e por área estudada. Desta contagem foi calculada a proporção de polens viáveis em relação ao total. Os polens foram considerados viáveis quando totalmente corados e esféricos.

2.5 Análise estatística

O delineamento estatístico utilizado na área de restinga foi inteiramente casualizado com quatro repetições. Os valores de cada parâmetro foram submetidos à análise de variância e comparados pelo teste de Tukey a 5% e apresentados como médias. As análises estatísticas foram realizadas por meio do software Sistema de Análises Estatísticas Gerais 9.1 (SAEG- UFV 9.1 Viçosa- MG).

3. Resultados e discussão

- Partículas em suspensão

Os valores estimados de SO_2 e MPS na área exposta são apresentados na Figura 2.

As concentrações atmosféricas de SO_2 e MPS nos anos avaliados estiveram dentro dos níveis estabelecidos pela Resolução CONAMA de 2006 que é de $80\mu\text{g m}^{-3}$ (Figura 2). Os valores referentes ao SO_2 emitido no ano de 2004 não foram apresentados pela usina de pelletização.

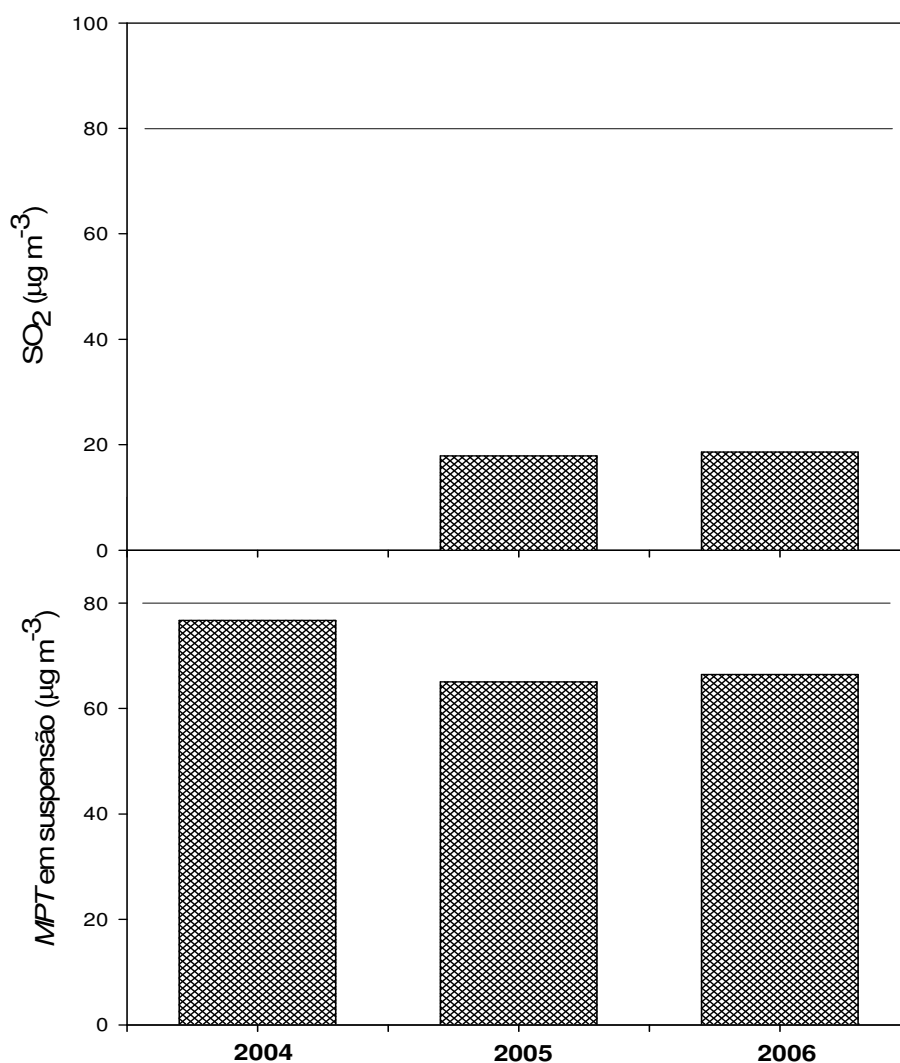


Figura 2: Concentrações de enxofre (SO_2) e material particulado total em suspensão (MPS) na área exposta (município de Anchieta-ES) nos anos de 2004, 2005 e 2006. – indica o limite primário (CONAMA, 2006).

- *Dados climatológicos*

A precipitação nas áreas estudadas concentra-se no início e no fim de cada ano. A partir do mês de março/abril o período chuvoso começa a diminuir atingindo o ápice nos meses de inverno (Figura 3). A temperatura máxima e mínima não ultrapassou a 27°C e 16°C, respectivamente nos anos avaliados. A direção dos ventos é noroeste, com velocidade média de aproximadamente 1,9 m s⁻¹.

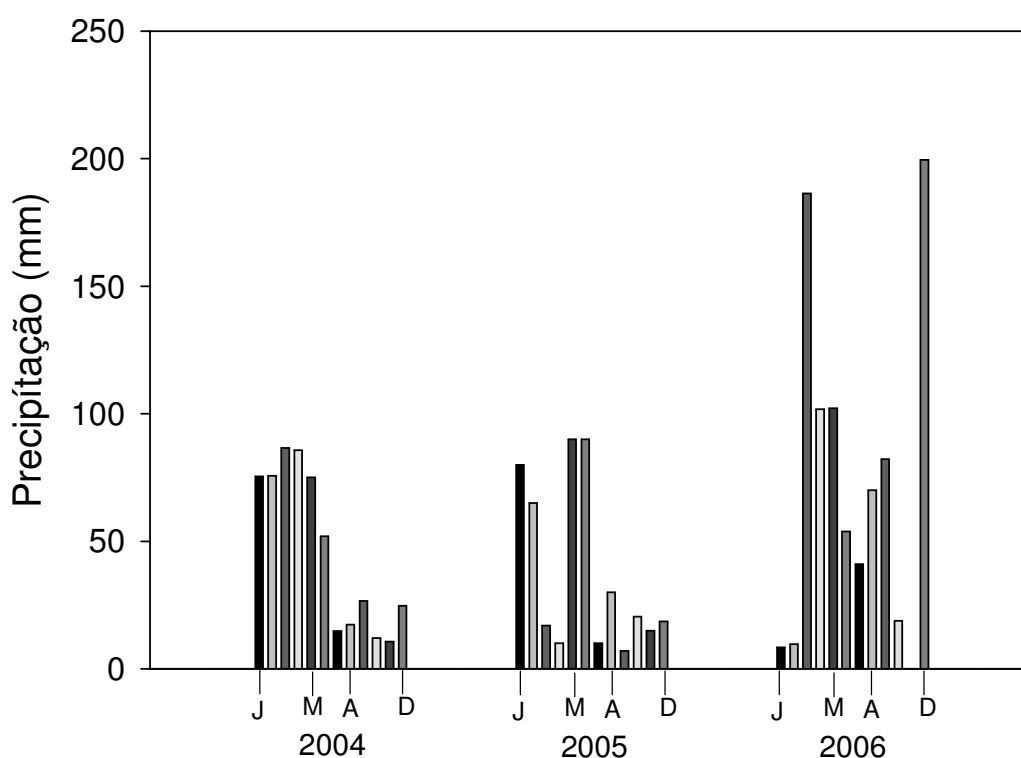


Figura 3: Valores mensais de precipitação (mm) observados durante o período de condução do experimento (março de 2004 a dezembro de 2006).

- *Solo*

O resultado da análise de solos das áreas estudadas apresentou algumas diferenças (Tabela 1). Na área exposta o teor de nutrientes, exceto o P, foi maior que aquele da área não exposta. Ressalta-se que os teores de enxofre, ferro e outros elementos como Ca, Al e a MO foram, respectivamente, três e quatro vezes maiores que aqueles da área não exposta. O pH das áreas estudadas variou de ácido a moderadamente ácido.

Tabela 1. Análise de solo apresentando as características químicas e físicas de amostras coletadas na área exposta e não exposta a deposição de *MSPFe*.

Componentes	Área exposta	Área não exposta
pH (H ₂ O)	5,13	4,93
P (mg dm ⁻³)	1,5	3,1
K (mg dm ⁻³)	11	6
S (mg dm ⁻³)	9,1	3,6
Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	1,58	0,53
Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,5	0,12
Al ³⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,19	0,0
Fe (mg dm ⁻³)	28,8	7,1
Mn (mg dm ⁻³)	4,3	4,0
H + Al (cmolc dm ⁻³)	4,6	2,5
V (índice de sat. de bases)	31,4	21,1
Matéria orgânica (dag kg ⁻¹)	0,97	0,32
Argila	15	4
Classe textural	Franco arenoso	Arenoso

Os solos analisados apresentaram características distintas quanto à composição química, física, concentração de matéria orgânica e de argila, podendo levar a diferenças na vegetação, tornando-a mais fechada na área exposta.

- Material particulado total (MPT) depositado na superfície foliar

Entre as espécies estudadas, *A. occidentale* apresentou a maior área foliar (Tabela 2) e a menor quantidade de *MPT* depositado na superfície foliar, evidenciando que não existe relação direta entre a área foliar e a quantidade de *MPT* depositado.

Tabela 2: Área foliar média de seis espécies vegetais estudadas na Restinga em área exposta (Anchieta-ES) e em área não exposta (Guarapari-ES) à deposição de material sólido particulado de ferro (*MSPFe*).

Espécies	Área foliar (mm ²)*		Características foliares
	Área exposta	Área não exposta	
<i>Lantana tiliaefolia</i>	1691,75	930,0	Limbo com tricomas, secreta mucilagem
<i>Cordia curassavica</i>	760,75	535,75	Limbo com tricomas, rugoso
<i>Anacardium occidentale</i>	3522,25	2499,5	Limbo glabro
<i>Byrsonima sericea</i>	1514,0	1216,25	Limbo glabro
<i>Psidium guajava</i>	2306,5	1452,25	Limbo glabro
<i>Schinus terebinthifolius</i>	1881,5	1440,75	Limbo glabro

* Coletas realizadas a cada trimestre durante o período experimental.

Na Tabela 2 observa-se que a área foliar das plantas localizadas na área exposta foi maior que a das plantas da área não exposta. Esta característica pode ser devido ao sombreamento causado pelo *MSPFe* depositado sobre as folhas, simulando uma condição de floresta que levaria ao aumento da área foliar, como observado em folhas de sombra. Observa-se também que na área exposta, as condições edáficas são mais propícias, favorecendo assim o desenvolvimento das plantas (Tabela 1).

As características do tecido epidérmico (micromorfologia foliar, características do indumento e da cutícula) podem também influenciar na maior aderência do *MPT* a folha, especialmente naquelas que apresentaram o maior acúmulo (Figura 4). Resultado similar foi encontrado por Silva (2003) ao estudar os efeitos do *MSPFe* em espécies de restinga que cresciam na mesma área observou que plantas de *Clusia hilariana* (Clusiaceae) apresentaram um menor acúmulo de *MSPFe* em suas folhas, provavelmente devido a característica da micromorfologia foliar.

Apesar das emissões estarem abaixo dos níveis estabelecidos (Figura 2), observa-se que o aumento na produção de pelotas de minério de ferro promove aumento na emissão de partículas na atmosfera, como se observa nas folhas das plantas localizadas na área exposta apresentaram um acúmulo significativamente maior de *MSPFe* em relação aquelas da área não exposta (Figura 4).

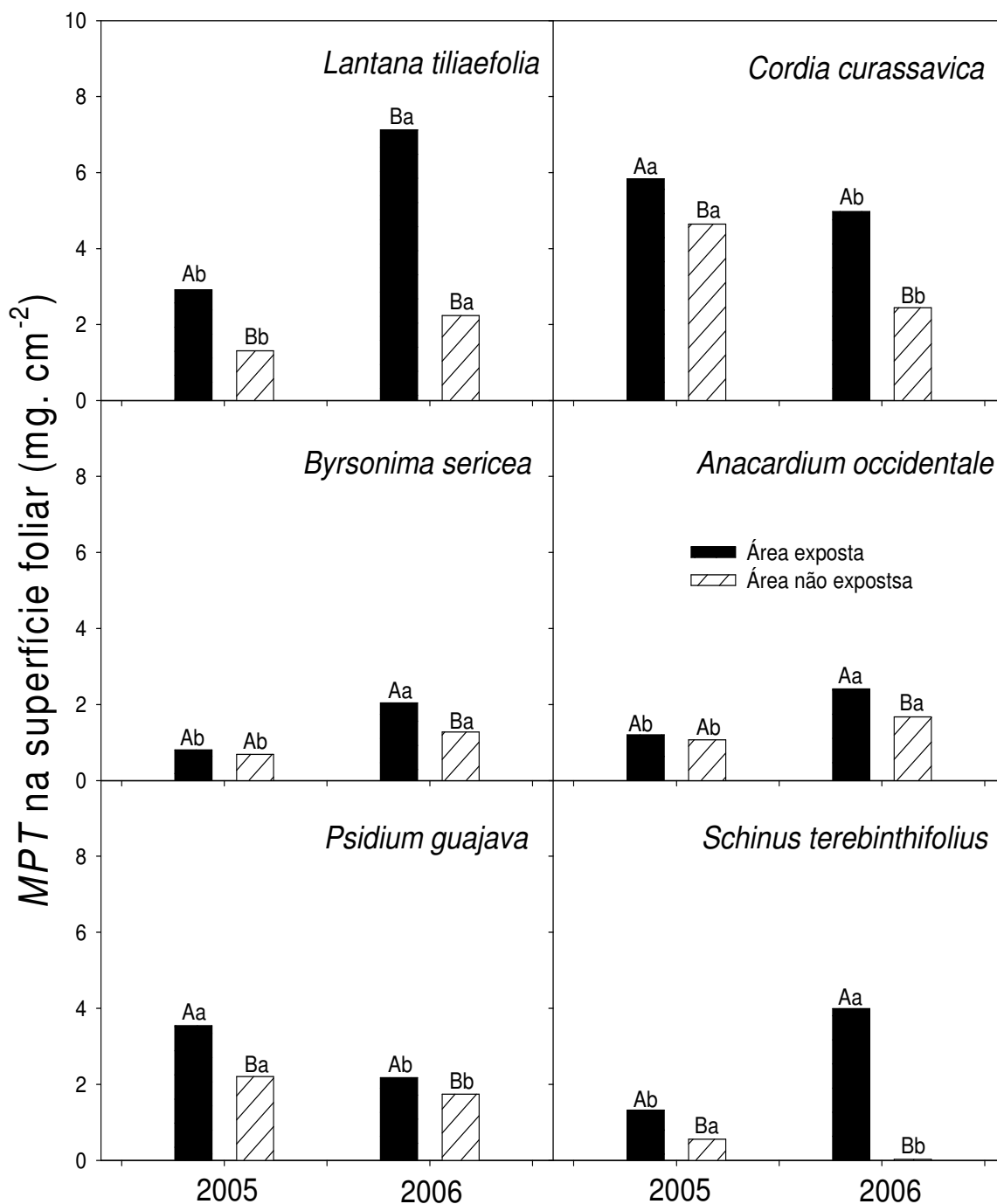


Figura 4: Material particulado total (*MPT*) depositado na superfície foliar de espécies de Restinga em área não exposta e em área exposta, respectivamente, nos anos de 2005 e 2006. O teste de médias visou avaliar apenas as diferenças entre as áreas de estudo não sendo realizado o mesmo teste para os anos. Letras maiúsculas comparam as áreas, letras minúsculas comparam os anos. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Entre todas as espécies avaliadas na área exposta *C. curassavica* e *L. tiliaefolia* apresentaram o maior acúmulo *MSPFe* em suas folhas ao passo que *S. terebinthifolius* apresentou o menor acúmulo. Do maior para o menor acúmulo entre as espécies estudadas na área exposta temos *L. tiliaefolia* < *C. curassavica* < *P. guajava* < *S. terebinthifolius* < *A. occidentale* < *B. sericea*.

A deposição de *MPT* em uma determinada localidade depende da interação de vários fatores, entre eles o relevo, o clima, a direção e a velocidade dos ventos, a altitude e a atividade humana (Grantz *et al.*, 2003). Anos mais chuvosos podem resultar em um menor acúmulo de *MPT* pela remoção deste da superfície foliar (Figura 3). O acúmulo de *MPT* nas folhas pode também estar relacionado com o diâmetro da copa, filotaxia, forma e micromorfologia da folha (Prusty *et al.*, 2005; Paling *et al.*, 2001; Silva, 2003).

Observou-se um maior acúmulo de *MSPFe* em plantas de *L. tiliaefolia* e *C. curassavica*. A presença de tricomas, secreção de substâncias e limbo rugoso na superfície adaxial das folhas de *L. tiliaefolia* e *C. curassavica* pode exercer um forte poder de fixação do *MSPFe*, dificultando sua retirada mesmo com as chuvas (Figura 4). Paling *et al.* (2001) avaliando os efeitos da deposição de *MSPFe* em *Avicennia marina* (Avicenniaceae) relataram que a elevada densidade de tricomas em suas folhas favoreceram a fixação do material particulado.

As menores taxas de deposição de *MSPFe* foram observadas em *A. occidentale* e *B. sericea*. Esta observação pode também estar relacionada com as características da folha. *A. occidentale* e *B. sericea* apresentam folhas glabras e glabrescentes, respectivamente, característica que propicia uma maior remoção do *MSPFe* durante as chuvas, diferentemente de *L. tiliaefolia* e *C. curassavica*.

Outro fator que poderia aumentar a deposição de material particulado seria o maior número de folhas nas plantas, visto que a planta fica mais exposta a uma maior quantidade de substâncias trazidas pelo ar. A influência da micromorfologia foliar na maior ou menor adesão de partículas também é relatada por outros autores. Grantz *et al.* (2003) relataram que a depender das características da superfície foliar, mais ou menos partículas poderão ser aderidas.

No relatório da Comissão Parlamentar de Inquérito (CPI) da Poluição da Assembleia Legislativa do Espírito Santo, criada pela Resolução nº 1.808/95, consta que na área da usina onde foi realizada a presente pesquisa ocorre o lançamento no ambiente de material particulado grosso (2,5-10 $\mu\text{m}\varnothing$). Usinas localizadas na região metropolitana da grande Vitória lançam mais material particulado fino (<2,5 $\mu\text{m}\varnothing$) o que segundo Grantz *et al.*, (2003) pode ser carregado e causar danos em plantas localizadas a muitos quilômetros da fonte emissora, fato que pode justificar a grande quantidade de *MPT* aderido às folhas das plantas da área não exposta (Figura 4).

A taxa de deposição é influenciada pelo tamanho das partículas. Assim, as partículas grossas podem ser precipitadas nas proximidades da fonte emissora ao passo que as partículas finas tendem a serem carregadas pelo vento por grandes distâncias (Farmer, 1993). A deposição de poeira trazida pelo vento poderia também ter contribuído para o acúmulo de *MPT* na superfície foliar das plantas do Parque Estadual Paulo César Vinha (PEPCV) uma vez que o mesmo está sob a influência dos ventos que sopram do oceano para o continente e do continente para o oceano. O *MPT* poderia ainda ser proveniente do tráfego intenso da rodovia que faz divisa com o PEPCV.

- Conteúdo de ferro e de enxofre no tecido foliar

O conteúdo de ferro total nas folhas das seis espécies avaliadas foi significativamente afetado nas proximidades da usina indicando que as emissões influenciaram a constituição química das espécies expostas (Figura 5).

Na área exposta, o maior acúmulo de ferro nas folhas de *L. tiliaefolia* e *C. curassavica* pode ser em parte atribuído às características da epiderme, como discutido anteriormente, que proporcionou maior adesão do ferro a superfície foliar e pode ter influenciado na maior absorção (Figura 5). Em termos de projeção, observa-se que as espécies herbáceas apresentaram maior conteúdo de ferro por produzirem biomassa mais rapidamente que as espécies arbóreas. Naquelas espécies, o ferro total acumulado em suas folhas ultrapassou os 500 $\mu\text{g g ms}^{-1}$ na área exposta.

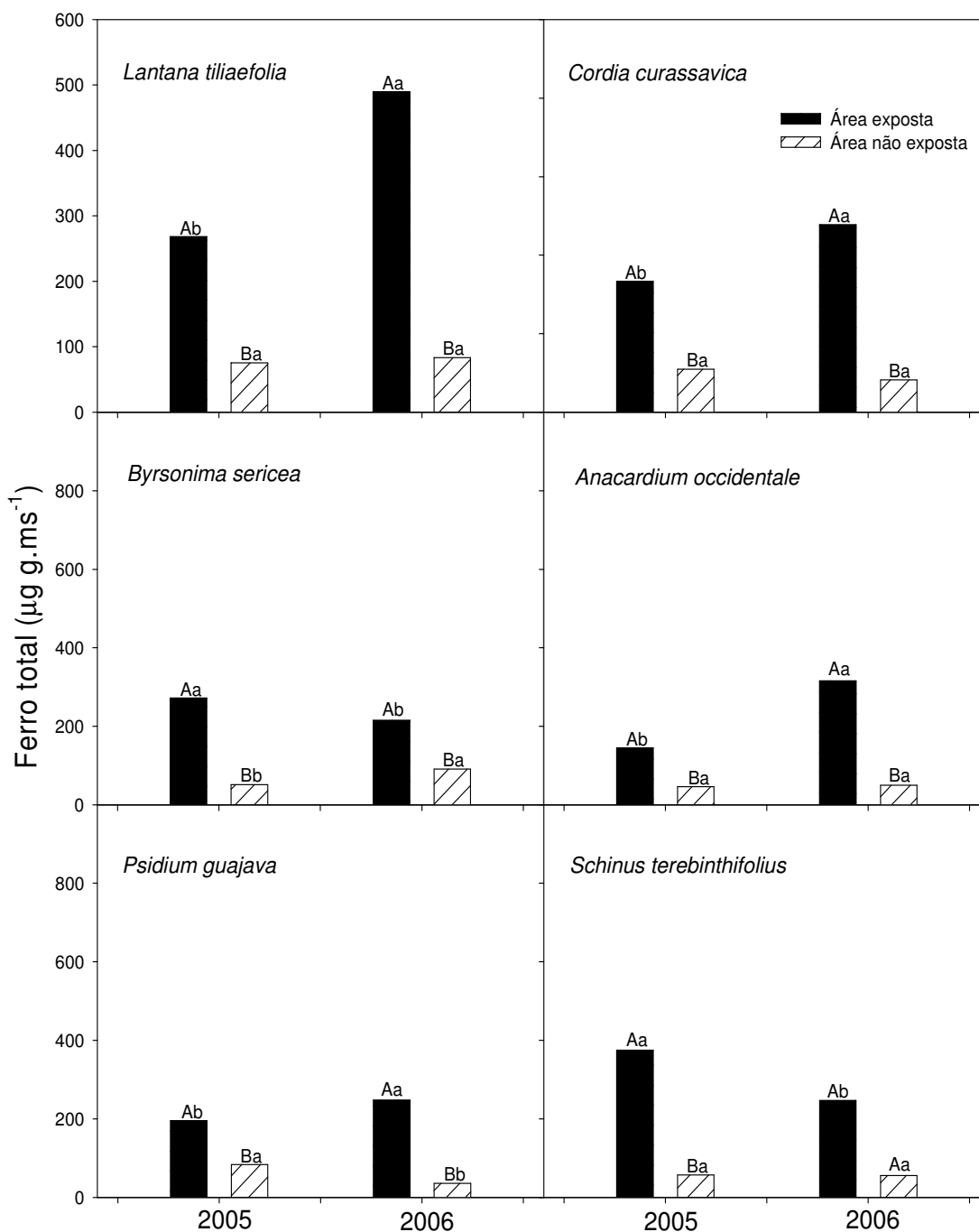


Figura 5: Conteúdo de ferro (Fe) total na matéria seca (ms) foliar de *L. tiliaefolia*, *C. curassavica*, *B. sericea*, *A. occidentale*, *P. guajava* e *S. terebinthifolius* localizadas em área exposta e não exposta a deposição ácida e de material sólido particulado de ferro (*MSPFe*) nos anos de 2005 e 2006. Letras maiúsculas comparam as áreas, letras minúsculas comparam os anos. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A elevada temperatura, a alta radiação e a distribuição pluviométrica podem influenciar o crescimento das espécies e contribuir para uma maior absorção de nutrientes pelas raízes no solo que apresenta quantidades significativas de ferro na área exposta (Tabela 1). A absorção foliar também é uma possível rota de entrada de nutrientes nas plantas e este processo pode ser facilitado pela presença das chuvas que trazem consigo os constituintes da deposição ácida e do material particulado solubilizados (Grantz *et al.*, 2003; Kuki *et al.*, 2009).

A análise mineralógica indicou um maior conteúdo de Fe na matéria seca das espécies localizadas na área exposta. Entretanto, nas outras espécies, os valores encontrados estão dentro da faixa limite de toxidez que é de $500\mu\text{g g ms}^{-1}$ (Marchner, 1995; Levy *et al.*, 1999).

Os valores apresentados na Figura 5 são resultados possivelmente da contínua exposição das plantas ao *MSPFe* que é lançado diariamente pelas chaminés da usina de pelotização ou pela absorção radicular do ferro presente no solo. Valores elevados nos tecidos foliares de plantas expostas a deposição de *MSPFe* também foram encontrados por diferentes autores (Silva, 2003; Kuki *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2009).

O conteúdo de enxofre na matéria seca de algumas espécies da área exposta foi significativamente superior ao encontrado na matéria seca daquelas da área não exposta (Figura 6).

As avaliações indicaram variações no conteúdo de enxofre das plantas estudadas. *Lantana tiliaefolia* foi a que mais acumulou enxofre entre as espécies avaliadas (Figura 6). Na área não exposta os valores encontrados nas espécies apresentam-se elevados, indicando que as plantas podem estar sob a influência da deposição ácida e dos poluentes trazidos pelo ar, provavelmente oriundos das usinas localizadas na região metropolitana da grande Vitória (Resolução nº 1.808/95 da Assembléia Legislativa do Espírito Santo).

Vitti *et al.* (2006) citam que a necessidade de enxofre para o bom crescimento das plantas varia de 1 a $5\mu\text{g g ms}^{-1}$. Observa-se na Figura 6 que os valores encontrados na matéria seca das plantas da área exposta estão muito acima daqueles tidos como necessários, indicando que muito do enxofre incorporado pelas espécies avaliadas pode ser proveniente da fonte emissora.

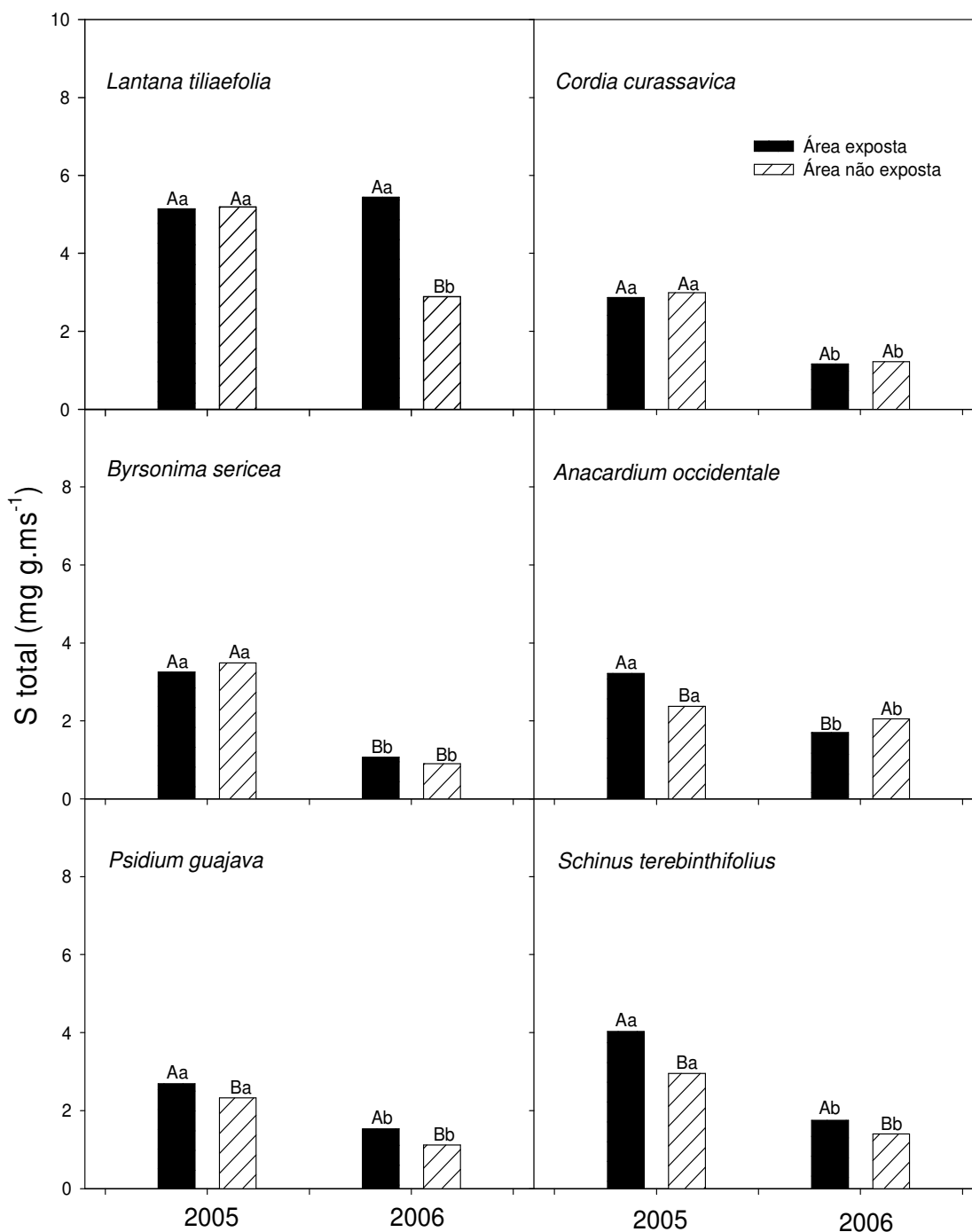


Figura 6: Conteúdo de enxofre (S) total na matéria seca (ms) foliar de *L. tiliaefolia*, *C. curassavica*, *B. sericea*, *A. occidentale*, *P. guajava* e *S. terebinthifolius* localizadas em área exposta e não exposta a deposição ácida e de material sólido particulado de ferro (*MSPFe*) nos anos de 2005 e 2006. Letras maiúsculas comparam as áreas, letras minúsculas comparam os anos. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Apesar de ser um nutriente essencial, o enxofre pode ser tóxico às plantas quando em excesso. Na área exposta, observa-se uma contínua emissão de óxidos de enxofre pela fonte emissora em função da queima de carvão, fato que pode causar danos a vegetação principalmente quando o enxofre reage com o vapor de água formando a precipitação ácida (Manninen & Huttunen 2000; Szabo *et al.*, 2003) que ao entrar em contato com a superfície foliar pode causar injúrias, afetando a formação do pólen e limitando a produção de frutos (Neuvonen *et al.*, 1991; Rao & Dubey, 1990; Silva *et al.*, 2005).

- Teor de pigmentos

Os efeitos da deposição particulada no teor de Cl_a das seis espécies avaliadas nas diferentes áreas de estudo são apresentados na Figura 7. Os teores de Cl_a das plantas da área exposta foram significativamente afetados pelo *MSPFe*. Os maiores aumentos foram observados em *P. guajava* (40%); *C. curassavica*, *A. occidentale* e *L. tiliaefolia* (20%). Nas outras espécies o aumento foi da ordem de 10%.

O aumento no teor de Cl_a das plantas da área exposta pode ser atribuído, em parte, às condições do solo que apresentou maior quantidade de nutrientes e de matéria orgânica (Tabela 1). Aliado a esses fatores, a fonte emissora pode ter contribuído com quantidade significativa de NO_2 no ambiente que pode ter sido absorvido pelas plantas expostas e elevado o teor de Cl_a (Figura 8). Aumentos nos teores de pigmentos também foram encontrados por diferentes autores (Silva, 2003; Kuki *et al.*, 2008) ao estudarem os efeitos do *MSPFe* no teor de pigmentos de diferentes espécies vegetais.

O aumento nos teores foliares de N pode também ser influenciado pela ação de outros poluentes gasosos como o SO_2 , que está presente na atmosfera da área exposta em quantidades significativas. O SO_2 ao ser absorvido pela planta via estômatos ou cutícula pode elevar os níveis de aminoácidos foliares (Lea *et al.*, 1996) principalmente aqueles com grupo tiol, além de promover um grande número de ligações com íons metálicos principalmente no aminoácido cisteína (Greenstein & Winitz, 1984).

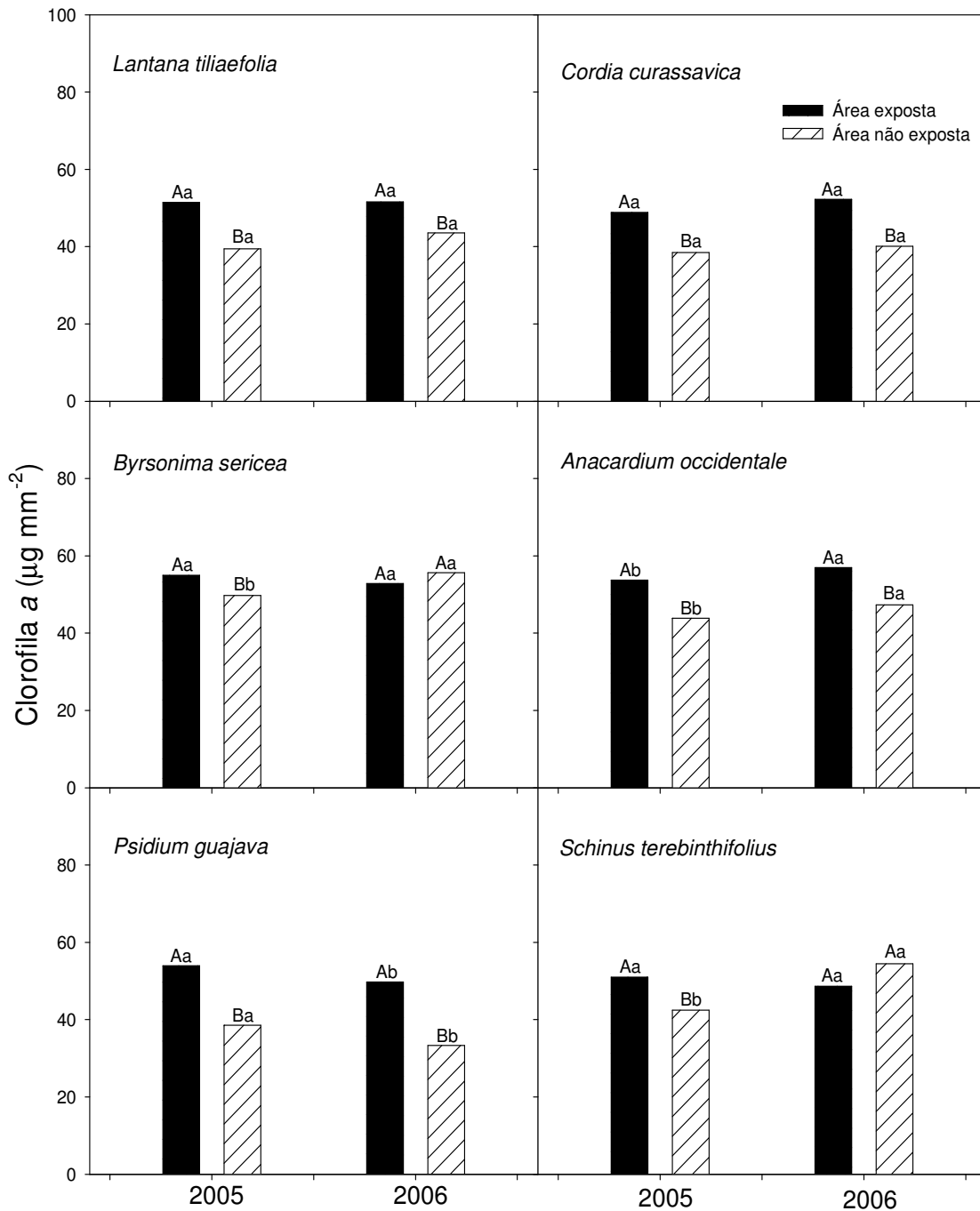


Figura 7: Teor de clorofila *a* (Cl_a) em folhas de *L. tiliaefolia*, *C. curassavica*, *B. sericea*, *A. occidentale*, *P. guajava* e *S. terebinthifolius* localizadas em área exposta e não exposta a deposição ácida e de material sólido particulado de ferro (*MSPFe*) nos anos de 2005 e 2006. Letras maiúsculas comparam as áreas, letras minúsculas comparam os anos. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

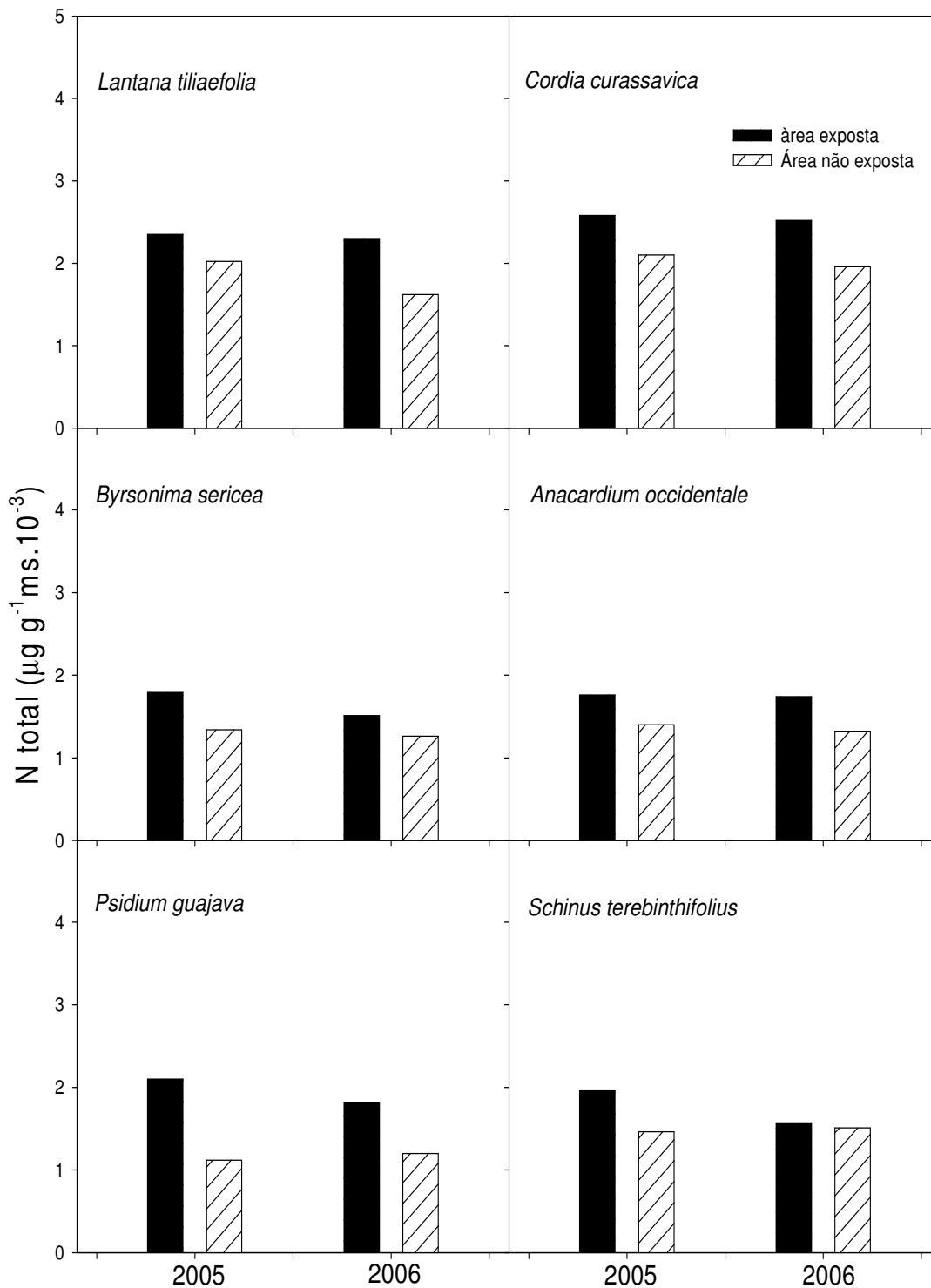


Figura 8: Variação no conteúdo de nitrogênio (N) na matéria seca (ms) foliar de *Lantana tilliaefolia*, *Cordia verbenacea*, *Byrsonima sericea*, *Anacardium occidentale*, *Psidium guajava* e *Schinus terebinthifolius* em área exposta e não exposta ao material sólido particulado de ferro (MSPFe) nos anos de 2005 e 2006.

O ferro está envolvido na síntese de clorofila e participa de muitos processos metabólicos do tecido vegetal. Na área exposta, o conteúdo de ferro foi significativamente afetado pela componente espacial e temporal. A associação do ferro com o nitrogênio e o enxofre pode ter influenciado positivamente o teor de pigmentos nas plantas estudadas na área exposta como se observa na Tabela 3.

Tabela 3: Teor médio anual de pigmentos em *Lantana tiliaefolia*, *Cordia curassavica*, *Byrsonima sericea*, *Anacardium occidentale*, *Psidium guajava* e *Schinus terebinthifolius* localizadas em área exposta e não exposta ao MSPFe no primeiro (P) e segundo (S) semestre.

Espécies	Clorofila a		Clorofila b		Carotenóides		Semestre
	AE	ANE	AE	ANE	AE	ANE	
<i>L. tiliaefolia</i>	52,3Aa	41,8Ba	19,3Aa	14,5Ba	14,1Aa	11,5Ba	P
	51,5Aa	41,4Ba	16,2Ab	11,9Bb	11,6Bb	9,9Aa	S
<i>C. curassavica</i>	51,6Aa	39,3Ba	18Aa	12,4Ba	12,3Ab	12,2Ab	P
	49Aa	39,3Ba	16,9Aa	11,9Ba	9,6Ab	8,7Ab	S
<i>B. sericea</i>	56,3Aa	54,3Aa	19,4Aa	19,5ns	13,1Aa	13,7Aa	P
	53,1Aa	51Aa	15,3Aa	17,9Aa	11Ab	12Aa	S
<i>A. occidentale</i>	56,2Aa	49,6Aa	22,6Aa	19,5Aa	13,7Aa	12,6Aa	P
	53,7Aa	43Bb	20Aa	17,6Aa	11,2Ab	9,6Bb	S
<i>P. guajava</i>	53,9Aa	36,1Ba	25,7Aa	20,2Ba	13Aa	11,1Ba	P
	51,8Aa	36Ba	24,4Aa	16,9Bb	12Aa	9,5Bb	S
<i>S. terebinthifolius</i>	54,1Ab	46,6Ba	22Aa	21,4Aa	12,3Aa	11,8Aa	P
	49Ab	46,9Ba	19,3Aa	16Bb	10,6Ab	9,9Ab	S

médias seguidas de diferentes letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna diferem significativamente a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

A razão Cl_a/Cl_b aumentou na área não exposta a deposição de MSPFe, indicando que na área exposta as plantas estão sujeitas ao sombreamento causado pela deposição de material particulado de ferro, assim como os dados de área foliar (Tabela 2). Com exceção de *B. sericea*, em todas as espécies avaliadas na área exposta há aumento nos teores de Cl_b . De forma similar observa-se aumento nos teores de carotenóides nas folhas das plantas da área exposta.

Entre as espécies que tiveram o teor de pigmentos pouco alterados pela exposição ao MSPFe *S. terebinthifolius* e *B. sericea* foram as que mais se destacaram. As pequenas diferenças apresentadas por essas espécies no teor de pigmentos podem ser explicadas pelo grupo sucessional em que estão

agrupadas. Assim, *S. terebinthifolius* é agrupada como pioneira e *B. sericea* como secundária inicial (Corrêa, 1984; CONAMA, 2007). Espécies pioneiras e secundárias iniciais apresentam uma alta taxa de crescimento, alto teor de nitrogênio, área foliar específica elevada e alta taxa fotossintética (Davidson & Gagnon, 2002).

Nesse sentido, Corrêa (1984) relata que *S. terebinthifolius* apresenta grande pioneirismo e capacidade de adaptação, permitindo a ocorrência em vários habitats e ocupando áreas degradadas e muitas vezes até invadindo áreas não desejáveis. Sá (2002) ao estudar a regeneração de um trecho de Restinga no Rio de Janeiro relata a ocorrência de quantidade significativa de plantas de *B. sericea* em áreas alteradas ao passo que em áreas não modificadas o número de indivíduos desta espécie foi bastante reduzido.

A despeito de muitos estudos correlacionarem negativamente teor de pigmentos com poluição atmosférica (Della *et al.*, 1998; Prusty *et al.*, 2005; Verma & Sing, 2006), aumentos podem ser observados a depender da espécie, do estágio de desenvolvimento da planta, do tipo e composição do poluente, da quantidade de chuva e radiação solar, da direção dos ventos e do tipo de solo (Grantz *et al.*, 2003; Prusty *et al.*, 2005).

- Injúrias

As injúrias foliares observadas nas folhas das espécies avaliadas na área exposta diferiram significativamente daquelas observadas nas plantas da área não exposta (Figura 9).

Plantas de *A. occidentale* e *P. guajava* apresentaram as maiores quantidades de injúrias foliares. Quando expostas a um agente estressor as espécies respondem de forma diferenciada e, a presença excessiva de injúrias pode ser um indicativo da maior sensibilidade dessas espécies ao *MSPFe*. As injúrias observadas são constituídas de clorose, necrose e lesões nas folhas (Figura 10). A deposição de vários tipos de material particulado sobre as folhas causa complicações em uma série de aspectos do desenvolvimento vegetal (Farmer, 1993), principalmente devido aos efeitos físicos dos componentes que são depositados (Hirano *et al.*, 1995).

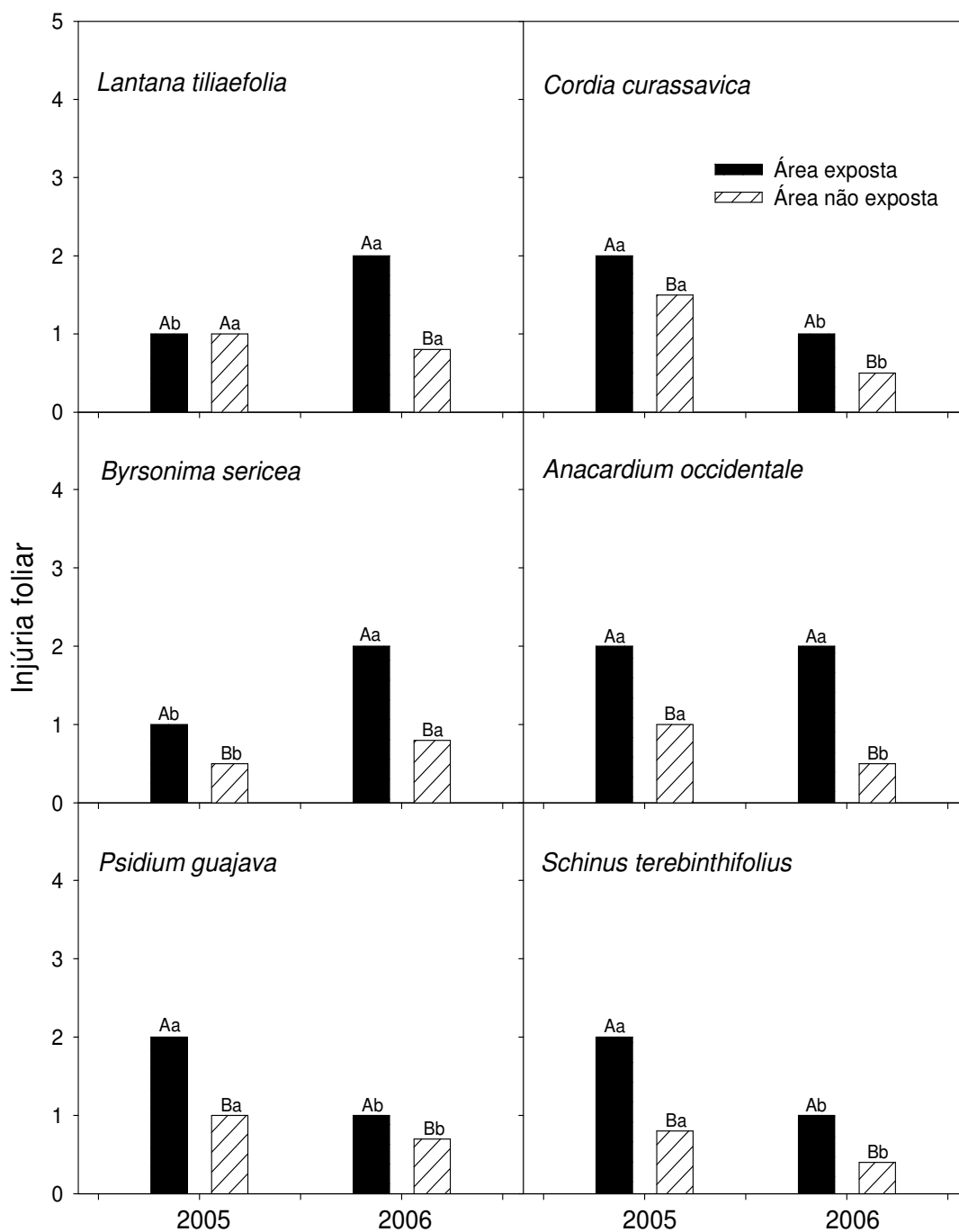


Figura 9: Injúrias foliares em plantas localizadas em área exposta (Anchieta-ES) e em área não exposta (Guarapari-ES) à deposição de material sólido particulado de ferro ($MSPFe$) durante os anos de 2005 e 2006. Letras maiúsculas comparam as áreas, letras minúsculas comparam os anos. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Figura 10: Espécies estudadas em área não exposta, Guarapari-ES (A, C, E, G, I, L) e em área exposta, Anchieta-ES (B, D, F, H, J, M) ao MSPFe no litoral do Espírito Santo. A-B= *Schinus terebinthifolius*; C-D= *Anacardium occidentale*; E-F= *Byrsonima sericea*; G-H= *Cordia curassavica*; I-J= *Psidium guajava*; L-M= *Lantana tiliaefolia*.

Aliado aos efeitos físicos do *MSPFe*, a precipitação ácida traz consigo uma alta proporção de compostos fotooxidantes e SO_2 que, ao entrarem em contato com a superfície vegetal podem causar danos aos tecidos (Figuras 9 e 10) por acidificar o meio celular, romper membranas e levar ao aparecimento de manchas no tecido foliar (Pereira, 2006; Silva *et al.* 2006). O SO_2 também está sendo absorvido, como evidenciado pela presença elevada de enxofre na matéria seca das plantas da área exposta (Figura 6).

- Fenologia reprodutiva

O monitoramento da fenologia reprodutiva das seis espécies estudadas revelou que, de modo geral, as fenofases das plantas localizadas na área exposta foram afetadas, exceto em *S. terebinthifolius*. As alterações na fenologia reprodutiva da maioria das espécies estudadas podem ser observadas nas Figuras 11 e 12 pela produção de flores e frutos, respectivamente, e através do índice de pegamento de frutos (*IPF*) na Figura 13.

Na área exposta, as espécies estão constantemente submetidas à deposição ácida e de *MSPFe* em suas folhas. O *MSPFe* ao ser depositado na superfície foliar sombreia as mesmas, levando a diminuição na produção de sacarose que participa do processo de formação de flores e de frutos. Os efeitos físicos também podem levar ao aparecimento de injúrias (Figuras 9 e 10), causar abrasão e aumento da temperatura foliar (Hirano *et al.*, 1995; Sharifi *et al.*, 1997) além de reduções na taxa fotossintética (Pereira, 2006; Silva *et al.*, 2006).

Quando associados, os efeitos da deposição ácida e de *MSPFe* podem afetar bioquimicamente o sistema enzimático (Sinha *et al.*, 1997), causar um desequilíbrio na homeostase do ferro e do enxofre levando a formação de espécies reativas de oxigênio e resultando em estresse oxidativo que afetaria a produção e o acúmulo de reservas nas plantas (Naidoo & Chirkoot, 2004; Chatterjee *et al.*, 2006; Kuki *et al.*, 2009). O resultado visual seria observado na redução da produção de flores e frutos das plantas expostas (Nikolic & Kastori, 2000; Catterjee *et al.*, 2006; Kuki *et al.*, 2008).

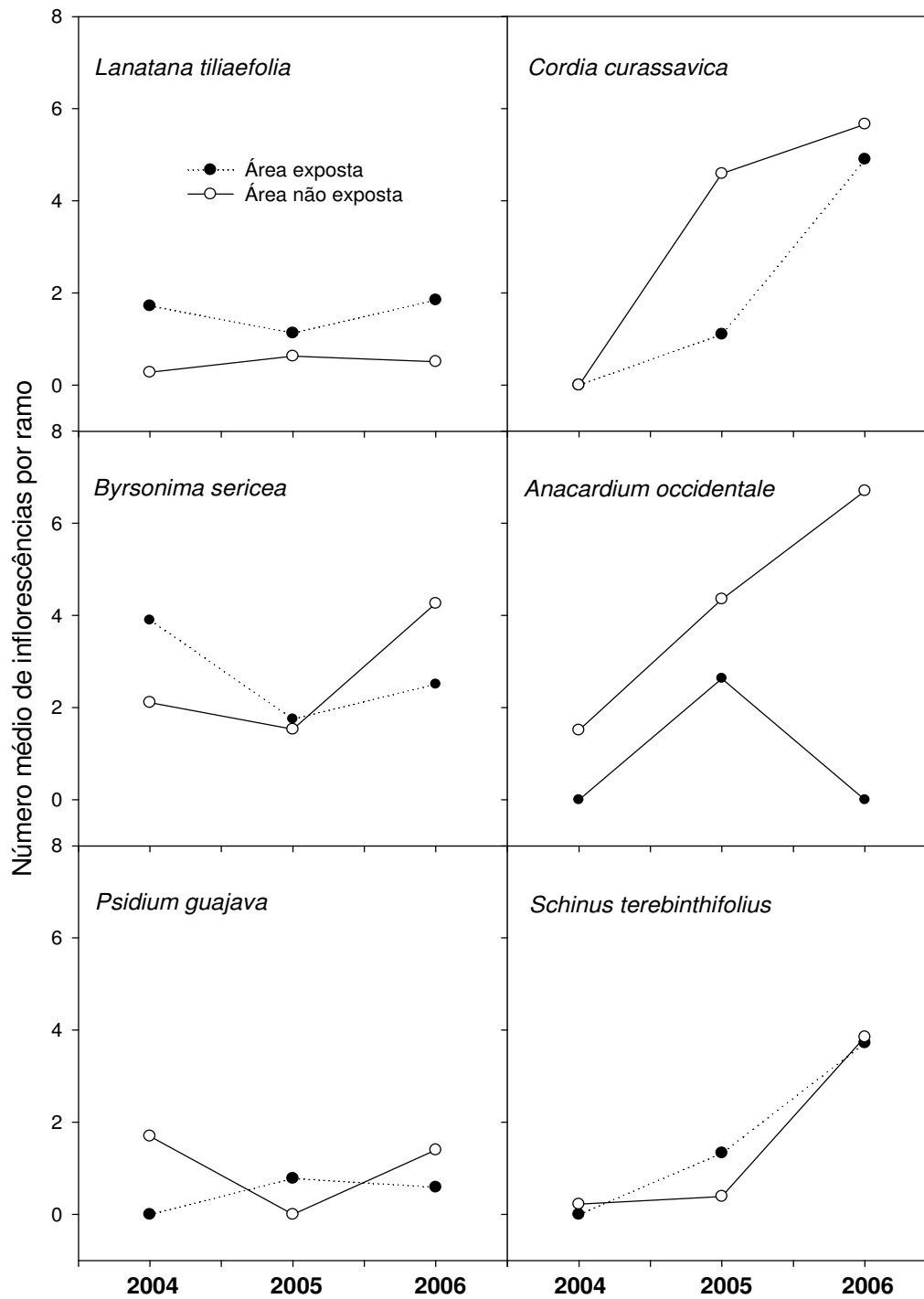


Figura 11: Número médio de inflorescências por ramo em plantas de *Lantana tiliaefolia*, *Cordia curassavica*, *Byrsonima sericea*, *Anacardium occidentale*, *Psidium guajava* e *Schinus terebinthifolius* localizadas na área exposta (Anchieta-ES) e não exposta (Guarapari-ES) à deposição de material sólido particulado de ferro (MSPFe).

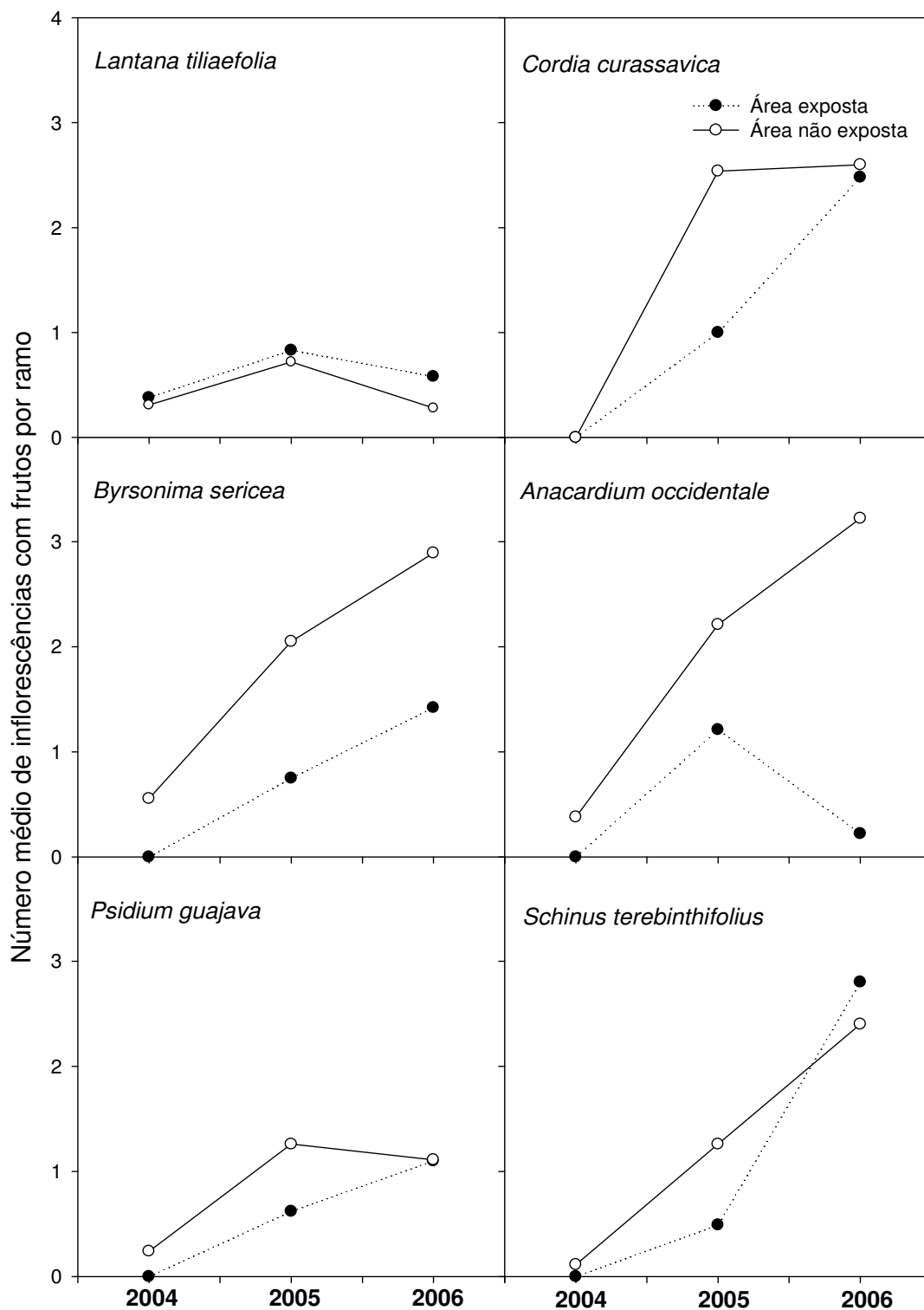


Figura 12: Número médio de inflorescências com frutos por ramo em plantas de *L. tiliaefolia*, *C. curassavica*, *B. sericea*, *A. occidentale*, *P. guajava* e *S. terebinthifolius* localizadas na área exposta (Anchieta-ES) e não exposta (Guarapar-ES) à deposição de material sólido particulado de ferro (MSPFe).

A deposição ácida e de *MSPFe* podem ter causado redução na produção de frutos, principalmente em *A. occidentale* que apresentou a maior sensibilidade (Figura 14). A diminuição da área foliar utilizada pela planta nos processos fotossintéticos devido ao elevado número de injúrias (Figura 10D) também pode ter contribuído para a redução na produção por limitar as trocas gasosas e a absorção de radiação. Diferentes autores (Borka, 1984; Ade-Ademilua & Umebese, 2007) relatam que o período reprodutivo é uma das fases fenológicas em que as plantas se encontram mais susceptíveis aos efeitos nocivos dos poluentes.

A precipitação ácida causa injúrias no tecido foliar pela ação tóxica dos óxidos de nitrogênio e enxofre. Estes elementos são oxidantes altamente fitotóxicos e no interior da célula poderão acelerar a formação de espécies reativas de oxigênio que danificam membranas, limitam a atividade de muitas enzimas, aumentam a quantidade de injúrias no tecido foliar, afetando a fotossíntese e elevando a queda de flores e frutos, limitando assim, a produção primária da planta (Thompson *et al.*, 1984; Krupa & Legee, 1999; Kuki *et al.*, 2008) como observado em *A. occidentale*.

Para a formação de frutos e sementes a interação de muitos fatores se faz necessária. A interação planta-polinizador é um destes fatores, uma vez que muitas espécies encontram-se isoladas ou necessitam de polinização cruzada (Bawa, 1980). *A. occidentale*, *L. tilliaefolia*, *C. curassavica*, *B. sericea* e *S. terebinthifolius* são polinizadas por insetos, principalmente himenópteros e lepidópteros (Lenzi & Orth, 2004; Lorenzi, 2002; Zenimori & Pasin, 2006) ao passo que *P. guajava* apresenta elevada taxa de autopolinização (Boti, 2001). Assim, em um ambiente poluído os atrativos florais podem ser reduzidos, afetando a quantidade de insetos polinizadores que chegam as plantas.

Como observado em algumas espécies localizadas na área exposta (Figura 13), a não produção de flores ou redução dos atrativos florais pode reduzir a quantidade de polinizadores, interferindo nas múltiplas relações planta-polinizador e contribuindo para o declínio na produção de frutos, podendo afetar a estabilidade da comunidade (Brun *et al.*, 2003; Gottardini *et al.*, 2004; McFrederick *et al.*, 2008).

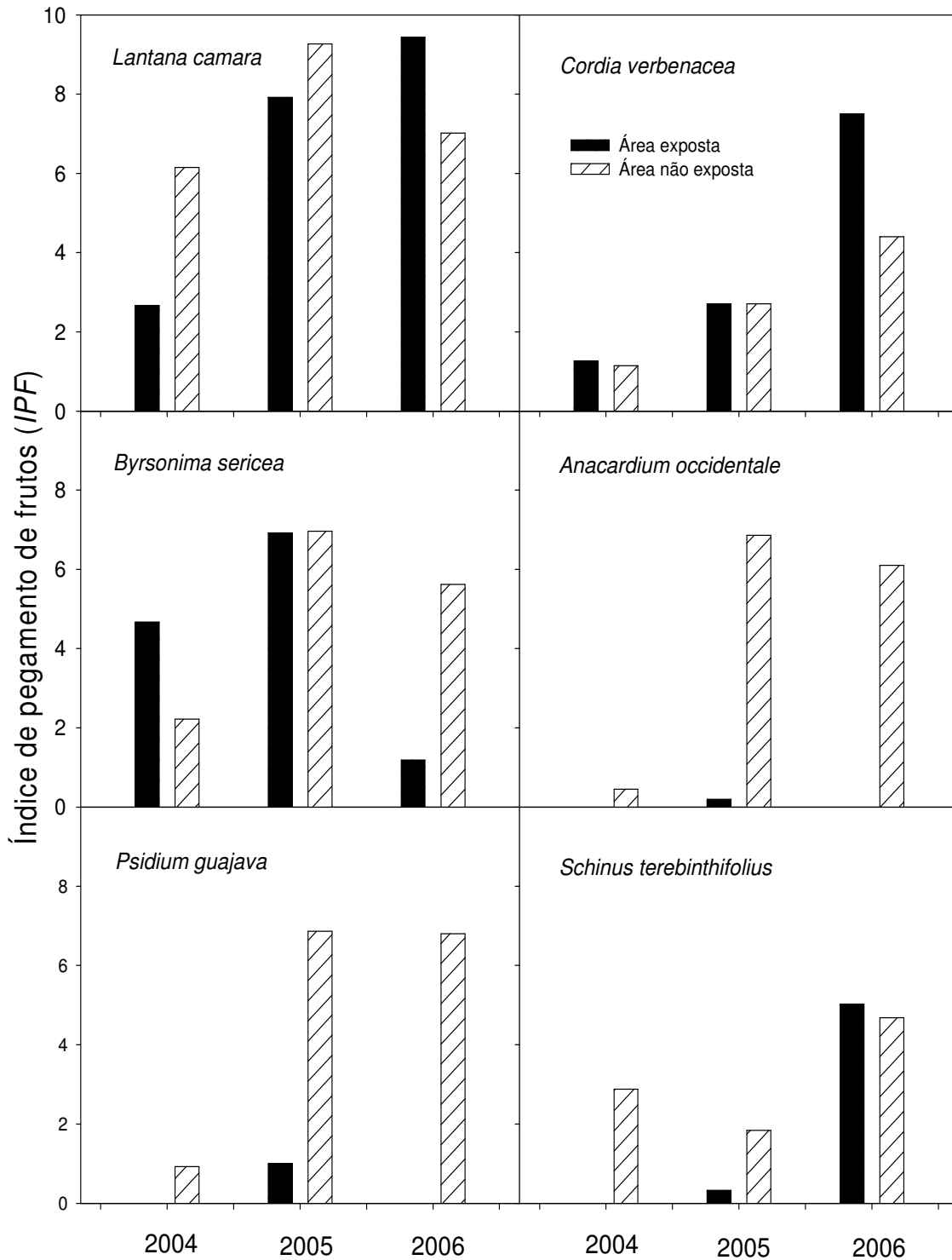


Figura 13: Índice de pegamento de frutos (IPF) em plantas de Restinga localizadas em área exposta (Anchieta-ES) e em área não exposta (Guarapari-ES) à deposição de material sólido particulado de ferro (MSPFe).

- *Efeitos do MSPFe e da deposição ácida na biologia do pólen*

Os efeitos do *MSPFe* e da deposição ácida na formação de tétrades (índice meiótico) e na viabilidade do pólen são apresentados na Figura 14 e na Tabela 4, respectivamente.

Foram observadas alterações significativas no *IM* das espécies avaliadas, exceto em *L. tiliaefolia*.

Lantana tiliaefolia aparentemente não teve o *IM* e a viabilidade do pólen afetados, independentemente da área estudada. O fato de apresentar flores pequenas e tubulares pode ter dificultado o contato do poluente com o androceu, não ocorrendo diferenças entre os dois ambientes estudados (Tabela 4).

Poucos estudos estão disponíveis na literatura relacionando os efeitos da poluição atmosférica sobre o índice meiótico e a viabilidade do pólen de espécies de Restinga. Estudos mostram que em populações nativas, o índice meiótico apresenta baixa porcentagem de tétrades normais (Raseira & Raseira, 1996) possivelmente por não serem populações estáveis. Os autores verificaram que a baixa viabilidade do pólen está relacionada com os baixos índices meióticos observados, tal como verificado no presente estudo em *C. curassavica* e *B. sericea*.

Os estudos realizados em *C. curassavica* indicaram que a deposição ácida e de *MSPFe* podem estar influenciando negativamente a espécie, tanto no *IM* quanto na viabilidade do pólen, mesmo não sendo observado alterações, de maneira geral, na produção de frutos. Nesta espécie, a produção de flores e frutos geralmente ocorre durante os meses mais quentes do ano, período de chuvas na área de estudo (Figura 3) fato que pode ter diminuído os efeitos negativos da deposição de poluentes por atuar como um veículo carreador.

O pólen é um biomarcador de poluição atmosférica (Cox, 1988; lanotte *et al.*, 2000; Gottardini *et al.*, 2004) pois diferentes tipos de poluentes podem afetar sua formação (Figura 15). Nesse sentido, os efeitos combinados da acidez e dos metais pesados podem afetar a reprodução de diferentes espécies (Tuna *et al.* 2002; Brun *et al.*, 2003).

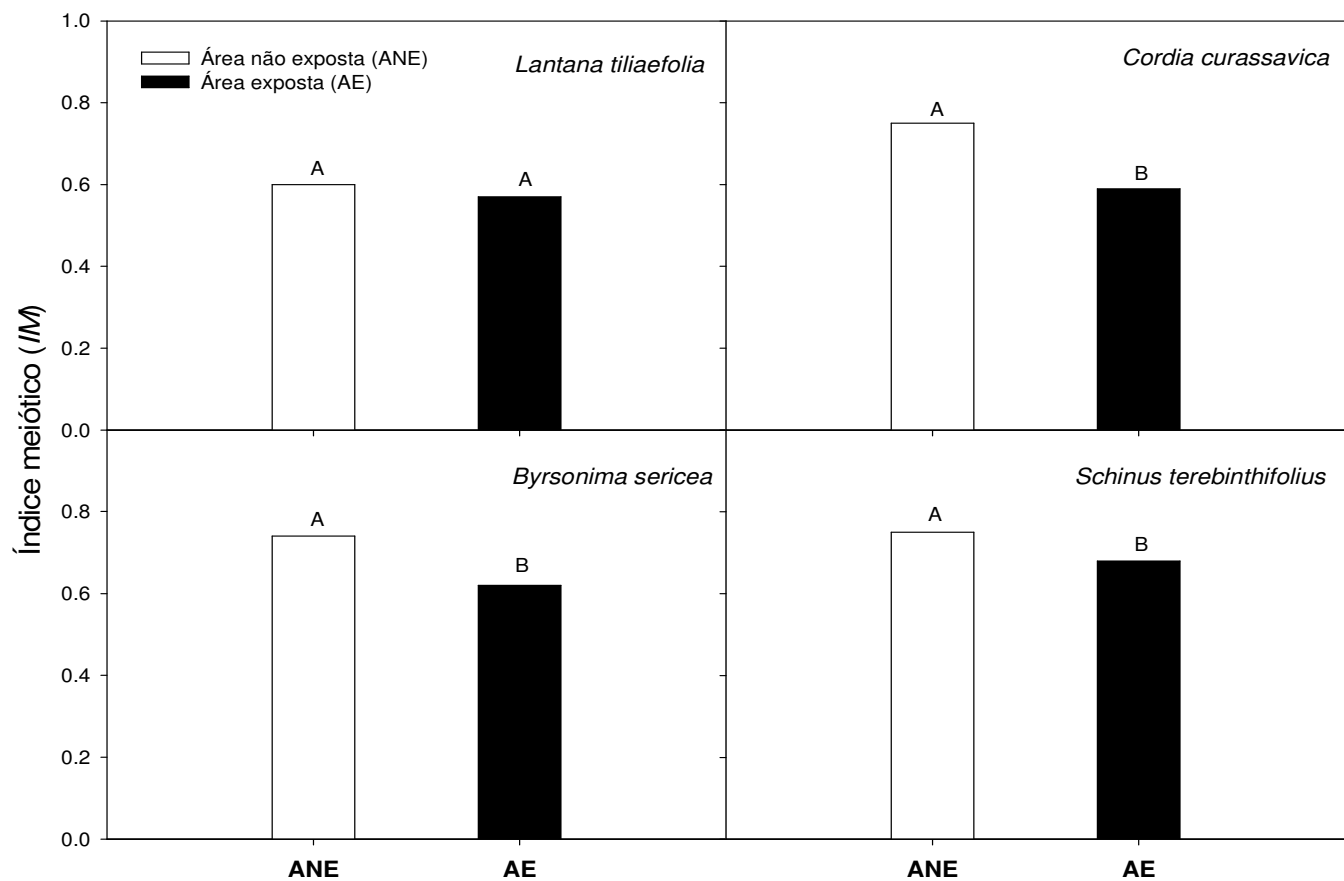


Figura 14: Índice meiótico (*IM*) de plantas de Restinga localizadas em área não exposta (Guarapari-ES) e em área exposta (Anchieta-ES) á deposição de material sólido particulado de ferro (*MSPFe*).

Tabela 4: Viabilidade do pólen de espécies de Restinga localizadas em área exposta (Anchieta-ES) e em área não exposta (Guarapari-ES) a deposição ácida e de *MSPFe* no litoral do Espírito Santo.

<i>Espécies</i>	Viabilidade do pólen (%)	
	<i>Área exposta</i>	<i>Área não exposta</i>
<i>Lantana tiliaefolia</i>	63,5A	63,6A
<i>Cordia curassavica</i>	42,4B	86,4A
<i>Byrsonima sericea</i>	65,5B	88,2A
<i>Schinus terebinthifolius</i>	85,6A	91,3A

* Não foram encontradas flores em *A. occidentale* e *P. guajava* na área exposta no momento da coleta.

Em *S. terebinthifolius* foram observadas alterações significativas no *IM* e não significativas na viabilidade do pólen (Figura 14 e Tabela 4).

Nas espécies estudadas, os efeitos sinérgicos da deposição ácida e do *MSPFe* podem comprometer a formação do pólen e sua viabilidade, reduzindo a produção de frutos, principalmente nas espécies mais susceptíveis, a exemplo de *A. occidentale* e *P. guajava* que nem chegaram a produzir frutos na área exposta. Reduções na produção de frutos de espécies de Restinga submetidas à deposição ácida e de *MSPFe* também foram verificadas por diferentes autores, entre eles Silva (2003) e Kuki *et al.* (2008a).

Os resultados encontrados para a viabilidade do pólen nas plantas da área não exposta apresentam uma tendência similar aquela reportada por diferentes autores (Mendes- Bonato *et al.* 2001; Risso-Pascotto *et al.* 2002; Pagliarini, 2000) que está próxima dos 90%. Estes autores associaram a viabilidade do pólen com a formação de tétrades normais, isto é, com o índice meiótico. Mendes-Bonato *et al.* (2002) relataram que a redução na viabilidade do pólen é causada muito comumente por irregularidades na divisão meiótica.

A Figura 15 apresenta o *IM* e a viabilidade do pólen em plantas de *C. curassavica* e *B. sericea*.

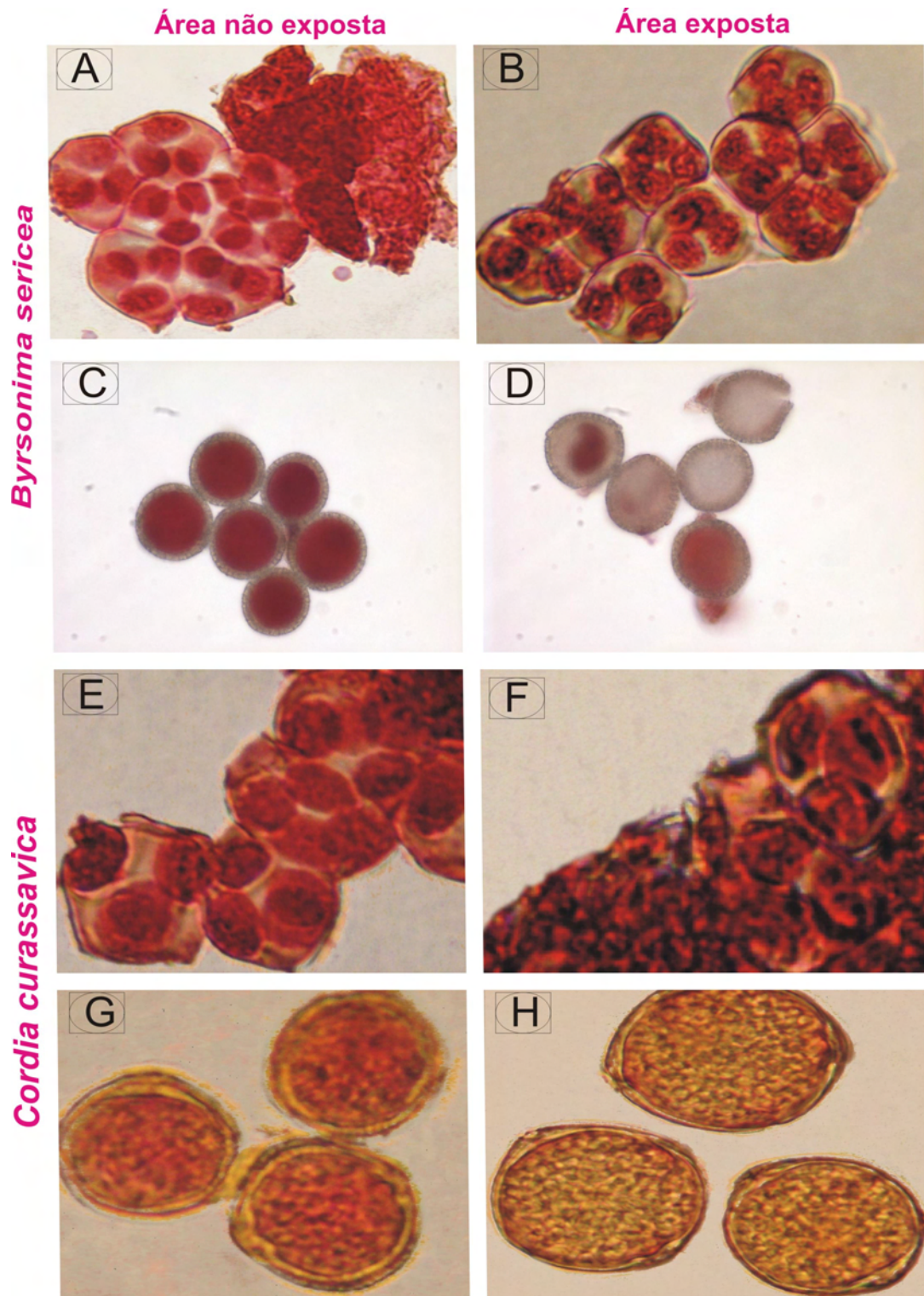


Figura 15: Fase final da microsporogênese e viabilidade do pólen de *B. sericeae* (A-B; C-D) e *C. curassavica* (E-F; G-H) proveniente de plantas da área não exposta (Guarapari-ES) e exposta (Anchieta-ES) ao material sólido particulado de ferro (*MSPFe*), respectivamente, no litoral do Espírito Santo. A e E (tétrades normais); B e F (tétrades anormais). C e G (polens viáveis) e D e H (polens inviáveis). Aumento 75X. Em “C e D” aumento de 62,5 vezes.

4. Conclusões

Os resultados obtidos permitem concluir que o conteúdo de ferro e de enxofre é superior nas plantas expostas a deposição ácida e de *MSPFe*.

O teor de pigmentos, especialmente clorofila *a* das plantas localizadas na área exposta foi superior ao observado nas plantas da área não exposta. O elevado teor de clorofila *b* indica que o *MSPFe* está sombreando as folhas, simulando um ambiente de floresta e levando ao aumento da área foliar.

Na área exposta observou-se uma maior quantidade de injúrias nas folhas, principalmente nas espécies que não apresentam adaptações morfofisiológicas em suas folhas, como observado em *A. occidentale*.

A elevada quantidade de injúrias nas folhas associado aos efeitos físicos e químicos impostos pela deposição ácida e de *MSPFe* pode ter limitar a absorção de radiação solar e, conseqüentemente, as trocas gasosas, afetar a formação de polens normais (índice meiótico) e reduzir sua viabilidade nas plantas da área exposta.

O monitoramento fenológico realizado indica que o ambiente estudado encontra-se sob pressão de estresse. Em longo prazo, as emissões provenientes da indústria mineradora podem contribuir para alterar a estrutura e a diversidade da vegetação exposta. Efeitos adversos foram pronunciados em *A. occidentale*. As respostas das espécies expostas à deposição ácida e de *MSPFe* varia consideravelmente. Através dos resultados obtidos pelo monitoramento fenológico *A. occidentale* observa-se decréscimo na fenologia reprodutiva podendo ser indicada como um potencial organismo indicador.

Com a constante exposição das plantas na área exposta, a produção de frutos pode ser reduzida ao longo do tempo. As emissões provenientes das atividades da indústria de minério de ferro podem afetar a vegetação de Restinga em seus diferentes níveis de organização e em longo prazo, provocar um declínio na quantidade e na diversidade daquelas espécies mais sensíveis a deposição ácida e de *MSPFe*. Para um maior conhecimento dos danos às plantas causados pela deposição ácida e de *MSPFe*, mais experimentos são requeridos.

5. Referências

- ADE-ADEMILUA, O. E. & UMEBESE, C. E. (2007) The growth of *Phaseolus vulgaris* L. cv. Ife Brown (Leguminosae) in a cement site rich in heavy metals. **Pakistan Journal of Biological Sciences**. 10: 182-185
- ALVAREZ, E.; FERNÁNDEZ MARCOS, M. L.; VAAMONDE, C. & FERNÁNDEZ-SANJURJO, M. J. (2003) Heavy metals in the dump of an abandoned mine in Galicia (NW Spain) and in the spontaneously occurring vegetation. **Science of Total Environment**. 313: 185-197
- ANDERSEN, O. & ANDERSEN, V. U. (1989) **As frutas silvestres brasileiras**. 3 ed. São Paulo: Globo, p. 151-155
- BARRICK, K. A. (2003). Comparison of the nutrient ecology of coastal *Banksia grandis* elfin wood (windswept shrub-like form) and low trees, Cape Leeuwin-Natural site National Park, Western Australia. **Austral Ecology**. 28: 252-262
- BARROS, M. A. G. (2002) Fenologia de floração, estratégias reprodutivas e polinização de espécies simpátricas do gênero *Byrsonima* Rich. (Malpighiaceae). **Revista Brasileira de Biologia**. 52: 343-353
- BARROSO, I. C. E. F. de; OLIVEIRA, L. H. Z.; BRANCO, E. T. M. KATO & T. G. DIAS. (2002) O gênero *Cordia* L.: Botânica, química e farmacologia. **Revista Lecta**. 20: 15-34
- BARTAKOVA, I.; KUMMEROVA, M.; MANDL, M.; POSPISIL, M. (2001) Phytotoxicity of iron in relation to its solubility conditions and the effect of ionic strength. **Plant and Soil**. 235: 45-51
- BAWA, K. S. (1980) Evolution of dioecy in flowering plants. **Annual Review of Ecology and Systematics**. 11: 15-39
- BORKA, G (1984) Effect of metalliferous dusts from dressing works on the growth, development, main metabolic processes and yields of winter wheat in situ under controlled conditions. **Environmental Pollution**. 35:67-73
- BOTI, J. B. (2001) **Polinização entomófila da goiabeira (*Psidium guajava* L., Myrtaceae): Influência da distância de fragmentos florestais em Santa Teresa, Espírito Santo**. Dissertação de Mestrado em Entomologia, UFV, 51p.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (1993) Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Nº 10 de 1 de outubro de 1993**. Brasília. Extraído de www.mma.gov.br em 23 de setembro de 2007.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (2006) Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Nº 382 de 26 de dezembro de 2006**. Brasília. Extraído de www.mma.gov.br em 23 de setembro de 2007.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (2007) Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Nº 391 de 25 de junho de 2007**. Extraído de www.mma.gov.br em 23 de setembro de 2007.

BRUN, L. A.; CORFF, L. E.; MAILLET, J. (2003) Effects of elevated soil copper on phenology, growth and reproduction of five ruderal plant species. **Environmental Pollution**. 122: 361-368

CARVALHO, P. E. R. (1994) **Espécies florestais brasileiras**: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira- Brasília: EMBRAPA- SPI, 640p.

CERUKS, M.; ROMOFF, P.; FÁVERO, O. A.; LAGO, J. H. G. (2007) Constituintes fenólicos polares de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae) **Química Nova**. 3: 597-599

CHATTERJEE, C, GOPAL, R, DUBE, BK (2006) Impact of iron stress on biomass, yield, metabolism and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). **Scientia Horticulturae**. 108: 1-6

CORRÊA, M. C. De M.; PRADO, R. de M.; NATALE, W.; SILVA, M. A. C. da; PEREIRA, L. (2002) Índice de pegamento de frutos em goiabeiras. **Revista Brasileira de Fruticultura**. 24:783-786

CORRÊA, M. P. (1984) **Dicionário das plantas úteis do Brasil e das exóticas cultivadas**, Ministério da Agricultura. IBDF, v.1.

COX, R. M. (1988) The sensitivity of pollen from various coniferous and broad-leaved trees to combinations of acidity and trace metals **New Phytologist**. 109: 193-201

COMISSÃO PARLAMENTAR DE INQUERITO da Assembléia Legislativa do Espírito Santo. Criada conforme Resolução nº 1.808/95.

DAVIDSON, R.; GAGNON, D. (2002) Light requirements of seedlings: a method for selecting tropical trees for plantationforestry. **Basic and Applied Ecology**. 3: 209-220

DELLA TORRE, G.; FERRANTI, F.; LUPATTELLI, M.; POCCESCHI, N.; FIGIOLI, A.; LORENZINI, N. & LORENZINI, G. (1998) effects os ozone on morpho-anatomy and physiology of *Hedera helix*. **Chemosphere**. 36: 651-656

FAN, H. B. & WANG, Y. H. (2000). Effects of simulated acid rain on germination, foliar damage, chlorophyll contents and seedling growth of five hard wood species in China. **Forest Ecology Management**. 126, 321-329

FARMER, A. M. (1993) The effects of dust on vegetation a review. **Environmental Pollution**. 79: 63-75

FREITAS, B. M. (1997) Number and distribution of cashew (*Anacardium occidentale*) pollen grains on the bodies of its pollinators, *Apis mellifera* and *Centris tarsata*. **Journal of apicultural Research**. 36 : 15-22

GOTTARDINI, E., CRISTOFOLINI, F., PAOLETTI, E., LAZZERI, P. AND PEPPONI, G. (2004). Pollen viability for air pollution bio-monitoring. **Journal of Atmospheric Chemistry**. 49: 149-159

GRANTZ, D. A., GARNER, J. H. B. & JOHNSON, D. W. (2003) Ecological effects of particulate matter. **Environmental international**. 29: 213- 239

GREENSTEIN, J. P. & WINITZ, M. (1984) **Chemistry of the amino acids**. Florida: Krieger Publishing Company. 487p.

HENRIQUES, R. P. B.; ARAUJO, D. S. B. & HAY, J. D. (1986) Descrição e classificação dos tipos de vegetação da restinga de Carapebus, Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Botânica**. 9: 173-189

HIRANO, T. KIYOTA, M. & AIGA, I. (1995) Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. **Environmental Pollution**. 89: 255- 261

IANNOTTI, O.; MINCIGRUCCI, G.; BRICCHI, E.; FRENGUELLI, G. (2000) Pollen viability as a bio-monitor of air quality. **Aerobiology**. 16: 361-365

JELENKOVIC, G. & HARRINGTON, E. (1972) Morphology of the pachytene chromosomes in *Prunus persica*. **Canadian Journal of Genetics and Cytology**. 14: 317-324

KAMPFENKEL, K.; MONTAGU, M. V.; INZÉ, D. (1995) Effects of iron Excess on *Nicotiana plumbaginifolia* plants **Plant Physiology**. 107: 725- 735

KOZLOV, M. V. & ZVERVA, E. L. (2004) Reproduction of mountain birch along a strong pollution gradient near Monchegorsk, Northwestern Russia. **Environmental Pollution**. 132: 443-451

KRUPA, S. V. & LEGGE, A. H. (1999) Foliar injury symptoms of Saskatoon serviceberry (*Amelanchier alnifolia* Nutt) as a biological indicator of ambient sulphur dioxide exposures. **Environmental Pollution**. 106: 449-454

KUKI, K. N. (2007) **Emissões da indústria de minério de ferro como fatores de risco ecológico em espécies ocorrentes na restinga de Anchieta, Espírito Santo, Brasil**. Tese de Doutorado em Botânica, UFV, 95p.

KUKI, N. K.; OLIVA, M. A.; PEREIRA, E. G. (2008) Iron ore industry emissions as a potential ecological risk factor for tropical coastal vegetation. **Environmental Management**. 42: 111-121

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

LACERDA, L. D., ARAUJO, D. S. D. & MACIEL, N. C. (1993) Dry coastal ecosystems of the tropical Brazilian coast. In: **Dry coastal-ecosystems: Africa, Asia, Oceania** (E. Van der Maarel, ed.). Elsevier, Amsterdam, p. 477- 493.

LEA, P. J., ROWLAND-BAMFORD, A. J. & WOLFENDEN, J. (1996) The effect of air pollution and elevated carbon dioxide on nitrogen metabolism. In: **Plant response to air pollution** (M. Yunus & M. Iqbal, eds.). John Wiley and Sons, Chichester, p.319-352

LENZI, M.; & ORTH, A. I. (2004) Caracterização funcional do sistema reprodutivo de aroeira vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi), em Florianópolis-SC, Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**. 26: 198-201

LEVY, D. B.; REDENTE, E. F.; UPHOFF, G. D. (1999) Evaluating the phytotoxicity of Pb-Zn tailing to big bluestem (*Andropogon gerardii* Vitman) and switchgrass (*Panicum virgatum* L.). **Soil Science**. 164: 363-375

LOPES, S. A., OLIVA, M. A., MARTINEZ, C. A. (2000) Impacto das imissões de dióxido de enxofre e deposição de material particulado de ferro em espécies vegetais de restinga: avaliação ecofisiológica. In: ESPÍNDOLA, E., PASCHOAL, C., ROCHA,

O., BOHRER, M., OLIVEIRA NETO, A. (eds). **Ecotoxicologia**. São Carlos: RiMa Artes e Textos, p. 53-71

LORENZI, H. (2002) **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. São Paulo: Nova Odessa, v. 1, 386p.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. (2002) **Plantas Medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum de Estudos da Flora. 512p.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; TORRES, M. A. & BACHER, V. L. B. (2003) **Árvores exóticas no Brasil**: Madeireiras, ornamentais e aromáticas. Nova Odessa: Plantarum, 384p.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M. (2004) **Plantas ornamentais no Brasil**: arbustivas, herbáceas e trepadeiras. 3.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 1088 p.

LOVE, R. A. (1949) **Estudos citológicos preliminares de trigos Riograndenses**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura do Rio Grande do Sul, 14p. (Circular n.74)

MABBERLEY, D. J. (1993) **The Plant-Book. A portable dictionary of the higher plants**. 4rd ed. New York: Cambridge University Press.

MANNINEN, S. & HUTTUNEN, S. (2000) Response of needle sulphur and nitrogen concentrations of Scots pine versus Norway spruce to SO₂ and NO₂. **Environmental Pollution**. 107:421-436

MARSCHNER, H. (1995) **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press, London. Second ed. 889p

McCUNE, D. C. (1991) Effects of airborne saline particle on vegetation in relation to variables of exposure and other factors. **Environmental Pollution**. 74:176-203

McFREDERICK, Q. S.; KATHILANKAL, J. C.; FUENTES, J. D. (2008) Air pollution modifies floral scent trails. **Atmospheric Environment**. 42: 2336-2348

MENDES-BONATO, A. B.; PAGLIARINI M. S.; FORLI, F.; VALLE, C. B.; PENTEADO, M. I. O. (2002) Chromosome numbers and microsporogenesis in *Brachiaria brizantha* (Gramineae). **Euphytica**. 125: 419-425

MENDES-BONATO, A. B.; PAGLIARINI, M. S.; SILVA, N.; VALLE, C. B. (2001) Meiotic instability in invader plants of signal grass *Brachiaria decumbens* Stapf (Gramineae). **Acta Scientiarum**. 23: 619-625

NAIDOO, G. & CHIRKOOT, D. (2004) The effects of coal dust on photosynthetic *Nicotiana plumbaginifolia* plants. **Plant Physiology**. 107: 725-735

NEUVONEN, S.; NYSSONEN, T.; RANTA, H.; & KIILUNEN, S. (1991) Simulated acid rain and the reproduction of mountain birch [*betula pubescens* ssp. *tortuosa* (ledeb.) nyman]: a cautionary tale. **New Phytologist**. 118: 111-117

NIKOLIC, M. & KASTORI, R. (2000) Effect of bicarbonate and Fe supply on Fe nutrition of grapevine. **Journal of Plant Nutrition**. 23: 1619-1627

OLIVEIRA, D. M. C. de (2006) **Atividade do extrato etanólico bruto de *Cordia verbenacea* D.C. sobre a secreção de mastócitos de diferentes espécies animais.** Dissertação de Mestrado em Ciências Biológicas, UNESP, 121p.

PAGLIARINI, M.Q. S. (2000) Meiotic behavior of economically important plant species: the relationship between fertility and male sterility. **Genetics and Molecular Biology.** 23: 997- 1002

PALING, E. I., HUMPHRIES, G., MCCARDLE, I. AND THOMSON, G. (2001) The effects of Iron Ore Dust on Mangroves 1: Lack of evidence for stomatal damage. **Wetlands Ecology and Management.** 9: 363-370

PEREIRA, E. G. (2006) **Efeitos fisiológicos e bioquímicos causados pela deposição de ferro particulado em *Clusia hilariana*, uma espécie CAM de restinga.** Dissertação de Mestrado em Fisiologia Vegetal, UFV, 71p.

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

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

RADFORD, A.E.; DICKINSON, W.C.; MASSEY, J.R. & BELL, C.R. (1974) **Vascular Plant Systematics.** New York: Harper & Row Publishers. 891p.

RAO, M. V. & DUBEY, P. S. (1990) Biochemical aspects (antioxidants) for development of tolerance in plants growing at different low levels of ambient air pollutants. **Environmental pollution.** 64: 55-66

RASEIRA, M. do C. B. & RASEIRA, A. (1996) **Contribuição ao estudo do araçazeiro *Psidium cattleyanum*.** Pelotas, RS, EMBRAPA/CPACT, 95p.

RISSO-PASCOTTO, C.; PAGLIARINI, M. S.; VALLE, C. B. (2002) Abnormal nucleolar cycle in microsporogenesis of *Brachiaria decumbens* (Gramineae). **Cytologia.** 67: 355-360

SÁ, C. F. C. (2002) Regeneração de um trecho de floresta de restinga na Reserva Ecológica Estadual de Jacarepiá, Saquarema, Estado do Rio de Janeiro: II - Estrato arbustivo. **Rodriguésia.** 82: 5-23

SAMARCO (2004) Relatório Anual (*SAMARCO Anual Report*).

SAMARCO (2005) Relatório Anual (*SAMARCO Anual Report*).

SAMARCO (2006) Relatório Anual (*SAMARCO Anual Report*).

SÁNCHEZ, J. E. (1995) *Cordia* subgênero *Varronia* (Boraginaceae). **Flora de Colombia.** 14: 1-176

SHARIFI, M. R.; GIBSON, A. C.; RUNDEL, P. W. (1997) Surface dust impacts on gas exchange in Mojave Desert shrubs. **Journal of Applied Ecology.** 34: 837-846

SINHA, S.; GUPTA, M. & CHANDRA, P. (1997) Oxidative stress induced by iron in *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle: response of antioxidants. **Ecotoxicology Environmental Safety**. 38: 286-291

SILVA, L. C. (2003) **Avaliações bioquímicas, fisiológicas e anatômicas dos efeitos de poluentes atmosféricos sobre espécies vegetais da restinga**. Viçosa, MG: UFV. Tese de Doutorado em Fisiologia Vegetal. UFV, 137p.

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

SILVA, S. A. S da; BARBOSA-FILHO, J. M.; SILVA, M. S da (2007) Etnofarmacologia do gênero *Cordia* L. (Boraginaceae). **Jornal Brasileiro de Fitomedicina**. VI Simpósio Brasileiro de Farmacognosia. 5: s.p.

SZABO, A. V.; DOMINGOS, M.; RINALDI, M. C. S.; DELITTI, W. B. C. (2003) Acúmulo foliar de enxofre e suas relações com alterações no crescimento de plantas jovens de *Tibouchina pulchra* Cogn. (Melastomataceae) expostas nas proximidades do pólo industrial de Cubatão, SP. **Revista Brasileira de Botânica**. 26: 379-390

TAYLOR, G. E.; DALE, W. J.; CHRISTIAN, P. A. (1994) Air pollution and forest ecosystems: a regional to global perspective. **Ecological Applications**. 4: 662-689

TEIXEIRA, L. A. G. & MACHADO, I. C. (2000) Sistema de polinização e reprodução de *Byrsonima sericea* DC. (malpighiaceae). **Acta Botanica Brasilica**. 14: 347-357

THOMPSON, J. R.; MUELLER, P. W.; FLÜCKIGER & RUTTER, A. J. The effect of dust on photosynthesis and its significance for roadside plants. **Environmental Pollution**. 34: 171-190

TUNA, A. L. & BURUN, B.; YOKAS, I.; ÇOBAN, E. (2002) The effects of heavy metals on pollen germination and pollen tube. **Turkey Journal Biology**. 26: 109-113

UHLING, C. & JUNTILLA, O. (2001) Airborne heavy metal pollution and its effects on foliar elemental composition of *Empetrum hermaphroditum* and *Vaccinium myrtillus* in Sor-Varanger, northern Norway. **Environmental Pollution**. 114: 461-469

WELLBURN, A. R. (1994) The spectral determination of chlorophyll a and b, as well as total carotenoids, using various solvent with spectrophotometers of different resolutions. **Journal of Plant Physiology**. 144, 307-313

YUNUS, M. AND IQBAL, M. (Eds.) (1996) **Plant response to air pollution**. John Wiley & Sons: New York.

ZENIMORI, S.; PASIN, L. A.. A. P. (2006) Aspectos da Biologia Floral de *Lantana camara*. In: X Encontro Latino Americano de iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós Graduação- Universidade do Vale do Paraíba, 2006, São José dos Campos. Revista UNIVAP- Edição Especial. São José dos Campos: **UNIVAP**. 13: 136-139

VERMA, A. & SINGH, S. N. (2006) Biochemical and ultrastructural changes in plant foliage exposed to auto-pollution **Environmental Monitoring and Assessment**. 120: 585-602

CAPÍTULO II

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS, ANATÔMICAS E FENOLÓGICAS DE
ESPÉCIES DE RESTINGA SUBMETIDAS À DEPOSIÇÃO SIMULADA
DE *MSPFe* NO SOLO E NA FOLHA**

Resumo: No litoral do Espírito Santo indústrias de processamento de minério de ferro estão instaladas em regiões vizinhas a fragmentos remanescentes de Restinga. Quantidade significativa de material sólido particulado de ferro (*MSPFe*) e dióxido de enxofre (SO_2), resultantes da atividade industrial podem interferir na composição da vegetação adjacente acarretando prejuízo ao estabelecimento de espécies e causando uma situação de dano ambiental. A presente pesquisa avaliou os efeitos causados pela deposição de *MSPFe* na fisiologia e na fenologia reprodutiva de espécies de Restinga. Plântulas de *Lantana tiliaefolia*, *Cordia curassavica* e *Schinus terebinthifolius*, foram cultivadas em ambiente semi-controlado de casa de vegetação em solo originário da restinga. Após aclimatação, submeteu-se as plantas aos tratamentos que consistiram da aplicação de *MSPFe* em 3 modalidades distintas: no solo, na folha, na folha e no solo simultaneamente e controle. O monitoramento fenológico foi conduzido ao longo do período experimental. As trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*, teor de pigmentos, conteúdo de ferro na matéria seca e os parâmetros anatômicos foram avaliados ao final do período experimental. As plantas cujas folhas foram expostas ao *MSPFe* apresentaram elevada quantidade de injúrias. A produção de flores e frutos foi menor nos tratamentos com aplicação de ferro, sendo as maiores reduções observadas nas plantas que tiveram o *MSPFe* depositado nas folhas e no solo do mesmo modo que as trocas gasosas e a fluorescência da clorofila *a*, mas não promovendo danos irreversíveis ao aparato fotossintético. O teor de pigmentos foi menor nas plantas submetidas a deposição particulada, especialmente no tratamento no qual a deposição ocorreu simultaneamente nas folhas e no solo. A histoquímica apresentou reação positiva nas folhas das plantas onde o *MSPFe* foi depositado. *L. tiliaefolia* e *C. curassavica* foram mais sensíveis aos efeitos da deposição particulada do que *S. terebinthifolius*. A emergência de plântulas foi reduzida quando as sementes foram expostas aos efeitos químicos da acidez e físicos do *MSPFe*. Os resultados obtidos permitem concluir que as espécies submetidas à deposição de *MSPFe* no solo e na folha apresentam diferentes estratégias para escapar do estresse imposto porém, em longo prazo, pode ocorrer um declínio na quantidade e diversidade daquelas espécies mais sensíveis.

Palavras-chave: Espécies de Restinga, fenologia reprodutiva, material particulado de ferro, emergência de sementes

Abstract: In the coast of the Espírito Santo, unities of processing of iron ore are installed in nearby regions the leftover fragments of Restinga. Significant quantity of particulate matter of iron and SO₂ resultant force of the industrial activity they can interfere in the composition of the adjacent vegetation being able to lead to a situation of ecological risk. The present study investigated the tension caused by the emissions of iron ore solid particulate matter (MSPFe) of the industries emissions in the vegetation of Restinga and valued his influence at fenologic parameters and physiologic of some sorts of way to supply useful informations for future programs of restoration and conservation of the forest fragments still existent. Samples of leaves of *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* and *S. terebinthifolius* were collected by them for determination of the contents of pigments and Fe. The fenologic monitoring valued the leaf, the the shooting, flowering and fruiting. Evaluations of the gaseous exchanges and fluorescence of the chlorophyll a were carried out in plants control, with MSPFe in the leaves, in the leaves and in the ground and in the ground. The content of pigments was affected by the deposition of conformable MSPFe if it was increasing the area of exhibition to the pollutant. The content of iron in the dry matter was significant in the plants that had the MSPFe applied in the leaves and in the leaves and in the ground. The fenologic evaluations showed that the plants which leaves were exposed to the pollutant remained for a bigger period you fix in the plants, the production of flowers and results reduced proportionally and the number of foliaceous injuries was significantly bigger. *S. terebinthifolius* had not the reproductive fenologic studied because of not flowering during the experimental period. *L. tiliaefolia* and *C. curassavica* were more sensitive, on the whole, that *S. terebinthifolius*. The seedlings emergence was reduced when the seeds were exposed to the chemical effects of the acidity and physical caused by SPMFe. This results concludes that the species submitted to deposition of MSPFe in the soil and the leaves presented different strategies to avoid the stress caused, but, in long exposition time, may occur decline on the quantity and diversity of the most sensitive species.

Keywords: Restinga ecosystem, ecological risk, particulate matter, reproductive phenology, seed emergence

1. Introdução

A deposição de diferentes tipos de material particulado sobre as plantas pode alterar a fisiologia dos órgãos aéreos e, conseqüentemente, interferir na fenologia das espécies promovendo alterações na vegetação (Farmer, 1993).

A deposição particulada sobre a parte aérea das plantas ocasiona alterações físicas ao cobrir a superfície foliar reduzindo a incidência de energia solar além de abrasão, aquecimento foliar, e obstrução dos estômatos (Grantz *et al.*, 2003; Pereira, 2006; Kuki *et al.*, 2008). Os efeitos químicos são decorrentes do grau de reatividade das partículas e de sua interação com os componentes da epiderme foliar (Grantz *et al.*, 2003; Prusty *et al.*, 2005; Pereira *et al.*, 2009).

O material particulado em suspensão na atmosfera não é um poluente simples, é geralmente constituído da mistura heterogênea de partículas de diferentes tamanhos, origens e composição química. Não é definido por sua natureza química, estrutura ou fonte, mas sim pelo tamanho de suas partículas (Grantz *et al.*, 2003). A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) classifica o material particulado (MP) como matéria subdividida em pequenas frações que são facilmente suspensas e carregadas pelo vento. Os particulados em suspensão são divididos em MP fino ($MP_{2,5}$ 0–2,5 μ m Ø) e MP grosso (MP_{10} 2,5-10 μ m Ø) (EPA, 1996).

A presença de uma fonte estacionária de poluentes como uma indústria mineradora pode gerar e emitir quantidade significativa de poluentes, como o MP e a chuva ácida, causando alterações ao longo do tempo na fitofisionomia de ecossistemas adjacentes. No litoral do Brasil, diversas unidades de processamento de minério de ferro encontram-se instaladas em regiões vizinhas às formações de Restinga, como as encontradas em certas localidades litorâneas do Espírito Santo. Nessas regiões, a emissão de poluentes como o material sólido particulado de ferro (*MSPFe*) pode prejudicar o desenvolvimento de plantas desse ecossistema e provocar uma situação de risco ambiental (Neves, 2004; Silva *et al.*, 2006; Kuki, 2007, Pereira *et al.*, 2009).

A formação de flores e frutos, a germinação de sementes e o estabelecimento inicial de plantas são alguns dos processos que, quando

afetados por fatores antropogênicos, podem afetar a composição botânica do ecossistema (Iqbal *et al.*, 1996; Agrawal & Agrawal, 1999; Peña *et al.*, 2001).

Admitimos como hipótese que o *MSPFe* depositado no solo e na folha pode casusar alterações na fenologia reprodutiva, na fisiologia e na histoquímica foliar de espécies de Restinga.

Assim, a presente pesquisa teve por objetivo investigar os efeitos causados pela deposição de *MSPFe* na produção de flores e frutos, no aparecimento de injúrias nas folhas, no teor de pigmentos foliares, nas trocas gasosas, na fluorescência da clorofila *a* e avaliar histoquimicamente a presença de ferro nos tecidos foliares de espécies de Restinga cultivadas em ambiente semi-controlado.

2. Material e Métodos

2.1 Local de estudo e material vegetal

O trabalho foi conduzido na Unidade de Crescimento de Plantas do Departamento de Biologia Vegetal (DBV) da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, com coordenadas geográficas de 20° 45' 14" S de latitude e 42° 52' 55" W de longitude e altitude de 650 metros. O trabalho foi desenvolvido na estação quente dos anos de 2006, 2007 e 2008.

Lantana tiliaefolia Cham. (Verbenaceae), *Cordia curassavica* (Jacq.) Roem. & Schult. (Boraginaceae) e *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae) foram selecionadas para esse estudo por entrarem em período reprodutivo mais rapidamente que as outras espécies estudadas e ainda por terem se adaptado melhor as condições climáticas de Viçosa.

Material testemunho foi depositado no Herbário VIC (31.848, 31.849, 31.851) e a identidade das plantas confirmada por especialista.

O período experimental teve duração de três meses, tempo necessário para observação de todo o ciclo fenológico nas diferentes espécies.

- Cultivo do material vegetal

Para o cultivo, foram coletados frutos ou estacas de plantas sadias que cresciam em fragmentos de Restinga preservados da ação antrópica, no Parque Estadual Paulo César Vinha. Inicialmente, as sementes de *S. terebinthifolius* foram lavadas em água para retirada da mucilagem e depois imersas em solução de hipoclorito de sódio a 5% por três minutos. Posteriormente, foram postas para secar a sombra e selecionadas quanto à uniformidade do tamanho. No dia seguinte, foram semeadas. *C. curassavica* e *L. tiliaefolia* foram reproduzidas por via assexuada através de estacas retiradas do terço-médio dos ramos da planta-mãe.

As espécies utilizadas neste estudo foram postas em leito de areia para germinação e enraizamento.

O material vegetal propagado foi selecionado quanto ao tamanho da parte aérea, do sistema radicular e estado fitossanitário para aclimação e crescimento inicial por um período de três meses. Posteriormente, vinte plantas

foram selecionadas (n= 5) e mantidas sob condições de casa de vegetação em vasos de 6,5 litros com areia para posterior aplicação dos tratamentos.

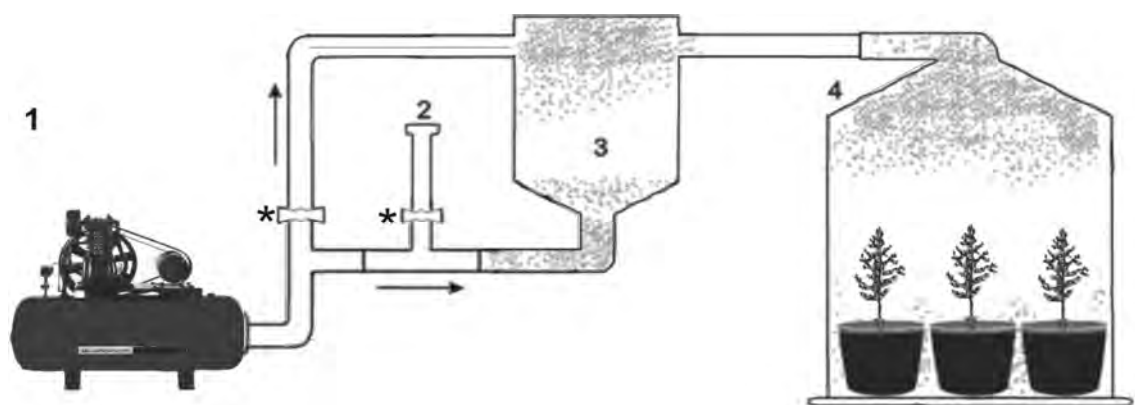
A cada quinze dias, durante todo o período de aclimação e experimental, as plantas foram regadas com solução nutritiva de Hoagland & Arnon (Hoagland & Arnon, 1938) a meia força iônica.

- Modalidades de deposição

Após o período de aclimação, o material vegetal foi submetido à deposição de ferro nas seguintes modalidades: no solo (*MSPFe-solo*); na folha (*MSPFe-folha*); na folha e no solo (*MSPFe-folha e solo*) e controle (CT). A quantidade de ferro em pó aplicada baseou-se na média diária de $6\text{mg cm}^2\text{dia}^{-1}$ depositada pela usina de pelletização de ferro (Lopes *et al.*, 2000).

Os tratamentos foram iniciados com plantas de seis meses de idade e as aplicações de *MSPFe* eram feitas duas vezes por semana.

Para aplicação do *MSPFe* sobre a superfície foliar das espécies avaliadas, foi utilizada uma câmara que simula a deposição natural de MSP, baseada no modelo proposto por Hirano *et al.* (1995) e adaptado por Pereira (2006) conforme Figura 1.



(Adaptado de Pereira, 2006)

Figura 1: Modelo esquemático da câmara de deposição de material sólido particulado de ferro. Uma bomba (1) lança ar sobre o óxido de ferro III, que foi inserido através de uma coluna (2) e suspenso pelo ar da bomba compressora 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 os reguladores de fluxo.

- *Caracterização do material particulado*

O *MSPFe* usado nos experimentos de deposição foi obtido na usina de pelotização de minério de ferro (SAMARCO S. A.) de Ponta de Ubu, Anchieta, Espírito Santo. O *MSPFe* é composto basicamente de partículas de ferro metálico ou ferro elementar (Fe⁰) similar ao que é lançado pela indústria no ambiente durante o processo de beneficiamento do minério. Apresenta partículas grossas (2,5-10µmØ) e maiores (> 50µmØ) e sua composição é descrita na Tabela 1.

Tabela 1: Composição do minério de ferro obtido na usina de pelotização de ferro de Ponta de Ubu, ES, após beneficiamento.

Constituintes (base seca)	% da matéria seca
Fe	67,1
FeO	0,96
SiO ₂	1,10
Al ₂ O ₃	0,30
CaO	0,10
MgO	0,02
Cu	0,006
Na ₂ O	0,007
P	0,040
S	0,003
Mn	0,033
Umidade	9,60

Fonte: (Kuki, 2007)

- *Análise de solo*

O substrato utilizado para o cultivo das mudas foi coletado no Parque Estadual Paulo César Vinha nas coordenadas 20° 36' 13.23" S e 40° 25' 34.29" O. A composição química do substrato e suas características físicas são apresentadas na Tabela 1, conforme observado no capítulo I.

- *Clima*

A temperatura máxima, mínima e média do ar foram coletadas com sensores acoplados a um DataLogger (LI 1200, LiCor- NE, USA). A temperatura média no interior da casa de vegetação foi de 28°C durante o período experimental, sendo a máxima de 38°C e a mínima de 23°C.

- *Análise do conteúdo de ferro no tecido foliar*

Para determinação do conteúdo de ferro (Fe) total, folhas foram lavadas com água deionizada, solução de EDTA (1mM) e, novamente água deionizada para garantia da total remoção do material particulado depositado. A secagem do material fresco foi realizada em estufa com circulação de ar a 75°C±5°C por 72 horas. Posteriormente, o material vegetal foi reduzido a partículas com dimensões menores que 1 mm. Quinhentos miligramas do material foram digeridos em solução nitro-perclórica (3:1v/v) a 200°C e o conteúdo de Fe do eluído foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica (Kampfinkel *et al.*, 1995).

2.2 Avaliações

Semanalmente foram realizadas as avaliações de fenologia e injúrias foliares. Ao final do período experimental foram avaliados os parâmetros fisiológicos, bioquímicos e anatômicos. Todas as avaliações foram realizadas em folhas expandida do terceiro nó.

- *Análise da temperatura foliar e injúrias*

Análises da temperatura foliar e da diferença da temperatura da folha e do ar foram realizadas em folhas do terço-médio das plantas ao meio dia, com o auxílio de um medidor ao infravermelho (Telatemp Inc.- USA).

As injúrias nas folhas das espécies estudadas foram definidas pela presença de manchas (clorose, necrose) ou lesões. Para tal definição, foram atribuídas notas de acordo com a porcentagem da área foliar injuriada, obedecendo a seguinte escala: 0- sem injúrias; 1- com injúrias em até 25% da

área foliar; 2- com injúrias de 26 a 50% da área foliar; 3- de 51 a 75% da área foliar com injúrias e 4- com injúrias de 76 a 100% da área foliar.

- Teor de pigmentos

Os teores de clorofilas *a* (Cl_a), *b* (Cl_b) e de carotenóides foram determinados mensalmente nas espécies estudadas utilizando-se dimetilsulfóxido (DMSO) como extrator (Wellburn, 1994). Três discos foliares de 5 mm de diâmetro foram coletados de folhas expandidas do terceiro nó e incubados em 7 mL de DMSO saturado com carbonato de cálcio em recipientes cobertos com papel alumínio. O período de incubação foi de 24 horas para *C. curassavica* e 48 para as outras espécies. As absorvâncias do extrato 665,1; 649,1 e 480,0 foram lidas para determinação da Cl_a , Cl_b e carotenóides respectivamente, em espectrofotômetro (U- 2000 UV/Vis- Hitachi Ltd, Japan) e os valores expressos em $\mu\text{g cm}^{-2}$.

- Fluorescência da Clorofila *a*

Os parâmetros de fluorescência da clorofila *a* foram determinados com o auxílio de um fluorômetro modulado portátil MINI-PAM (Heinz Walz, EffeTrich, GmbH, Germany). Para as medidas da eficiência fotoquímica do fotossistema II no escuro as avaliações foram realizadas na antemanhã onde se determinou a fluorescência mínima (F_o), máxima (F_m), variável ($F_v = F_m - F_o$) e o rendimento quântico potencial máximo (F_v/F_m). Para as medidas de claro utilizou-se radiação fotossinteticamente ativa (PAR) de $1000\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ por 30 segundos, em folhas completamente expandidas, previamente selecionadas. Determinou-se a fluorescência máxima, durante a iluminação actínica (F_m'), e o coeficiente de extinção não-fotoquímica (NPQ) e a taxa aparente de transporte de elétrons (ETR).

- Trocas gasosas

As trocas gasosas das plantas foram avaliadas para registro dos seguintes parâmetros: taxas fotossintética (*A*) e transpiratória (*E*), condutância estomática (g_s) e relação entre a concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a). As medições foram realizadas entre às sete e dez horas, sob

irradiância de $1000\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, em folhas completamente expandidas, previamente selecionadas.

Em *S. terebinthifolius* e *C. curassavica* as avaliações das trocas gasosas foram realizadas utilizando um medidor portátil de fotossíntese LI-6400, (Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA), acoplado a uma fonte de luz artificial 6400-02B RedBlue #SI-925, incidindo sobre as folhas uma densidade de fluxo de fótons de $1000\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Para todas as espécies foram sempre utilizadas folhas completamente expandidas do terço-médio da planta, no horário entre 07 e 11 horas. A mesma folha utilizada nestas avaliações foi usada para as de fluorescência da clorofila *a*.

Para a medição das trocas gasosas na espécie *L. tiliaefolia* foi utilizado um medidor portátil de gás no infravermelho modelo LCA4 (ADC-LCA4-Hoddesdon-UK) acoplado a uma fonte de luz artificial (com densidade de fluxo de fótons de $1000\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) por apresentar um filtro que retém o *MSPFe* evitando danos ao aparelho, uma vez que a espécie mantém o *MSPFe* aderido em suas folhas.

- Histoquímica

Para a histolocalização de ferro nas folhas, amostras das folhas das plantas dos tratamentos controle (CT) e com ferro aplicado na folha (*MSPFe*-folha) foram fixadas em Karnovsky modificado, em pH neutro (Karnovsky, 1965). Com auxílio de um micrótomo de mesa (modelo LPC, Rolemberg e Bhering Comércio e Importação LTDA, Belo Horizonte, Brasil), as amostras fixadas foram seccionadas e os cortes obtidos foram imersos em solução de ferrocianeto de potássio 4% e ácido clorídrico 4% conforme (Silva *et al.* 2006) por um período que variou de 24 a 72 horas para evidenciar a presença do ferro. Os cortes foram montados em solução de glicerina e água 1:1 (v/v) e a preparação foi coberta com lamínula e selada com esmalte. Realizaram-se as observações e documentações fotográficas em fotomicroscópio (modelo AX70 TRF, Olympus Optical, Tokyo, Japão) equipado com sistema U-photo, acoplado a uma câmera filmadora (modelo Spot Insightcolour 3.2.0, Diagnostic instruments inc. New York, USA) e a um microcomputador. Secções sem o reagente específico foram montadas para controle. Considerou-se positiva a

reação em que as células ou tecidos vegetais apresentaram a coloração típica azul de Prússia.

- *Avaliação da fenologia reprodutiva*

A fenologia reprodutiva foi avaliada pela contagem semanal do número total de flores e frutos em cada planta por espécie estudada.

- *Efeitos do MSPFe e da acidez na emergência de plântulas*

Sementes de *L. tiliaefolia*, *C. curassavica*, *B. sericea* e *S. terebinthifolius* foram obtidas de frutos maduros, coletadas de plantas localizadas na área não exposta. Os testes de emergência não foram realizados em *A. occidentale* e *P. guajava* devido à pequena quantidade de sementes produzida por estas espécies nas áreas estudadas.

Para observação da emergência das plântulas utilizou-se um esquema fatorial 4 x 2 (quatro níveis de ferro e dois pH's). Os vasos foram irrigados com solução aquosa com pH 3,0 e 5,5. Os níveis de MSPFe depositado foram de: 0; 0,03; 0,06 e 0,12 mg por vaso, tendo como referência a deposição de 0,06 mg mm⁻² dia⁻¹ (Lopes *et al.*, 2000). Os testes foram realizados em ambiente semi-controlado da UCP-UFV.

Cada repetição continha 100 sementes; estas foram acondicionadas em vaso plástico contendo areia como substrato. A emergência foi avaliada a cada dois dias, com a contagem final realizada após 45 dias do início dos experimentos sendo então determinada a porcentagem final de emergência.

2.3 Análise estatística

O delineamento estatístico utilizado foi em blocos ao acaso com quatro modalidades de deposição de MSPFe (sem ferro, ferro no solo, ferro na folha e ferro na folha e no solo) e cinco repetições. Todos os dados foram submetidos à análise de variância e apresentados como médias mais erro padrão e comparadas pelo teste de Tukey a 5%. As análises estatísticas foram realizadas por meio do software Sistema de Análises Estatísticas Gerais 9.1 (SAEG- UFV 9.1 Viçosa- MG).

3. Resultados e discussão

- Ferro total na matéria seca foliar

Depois da imposição dos tratamentos, os valores de ferro constantes da Tabela 2 apresentaram aumento, principalmente nos tratamentos *MSPFe*-folha e solo e *MSPFe*-solo (valores não apresentados).

O conteúdo de ferro total na matéria seca variou com a espécie estudada e com a modalidade de deposição (Figura 2). As plantas expostas a deposição de *MSPFe* nas folhas (*MSPFe*-folha) e nas folhas e no solo (*MSPFe*-folha e solo) apresentaram valores significativamente maiores que nos demais tratamentos. Em plantas expostas de *S. terebinthifolius* estes valores foram até duas vezes maiores que o observado nas plantas controle. Resultados similares foram observados por Kuki *et al.* (2008) ao avaliarem os efeitos da deposição simulada de *MSPFe* nas folhas de plantas de *Sophora tomentosa* (Leguminosae- Papilionoideae) e *S. terebinthifolius*.

No presente estudo, a absorção foliar de ferro pelas plantas pode ser considerada uma vez que nos tratamentos onde o *MSPFe* foi depositado na superfície foliar foram observadas elevadas concentrações de ferro na matéria seca e de acordo com Grantz *et al.* (2003) a absorção foliar deste elemento pode ser uma possível rota de entrada deste nutriente nas plantas.

Ressalta-se que, embora o caminho natural para absorção do ferro seja por via radicular, nas plantas expostas a deposição de *MSPFe* os maiores níveis encontrados nos tecidos foliares devem ter sido provenientes da absorção foliar, já que todas as plantas utilizadas no experimento foram cultivadas em solo com a mesma procedência, ou seja, do Parque Estadual Paulo César Vinha.

Em *L. tiliaefolia* o maior conteúdo de ferro foi observado nas plantas que tiveram o *MSPFe* depositado nas folhas (*MSPFe*-folhas) e nas folhas e no solo (*MSPFe*-folhas e solo). Nas outras espécies os maiores conteúdos foram encontrados nas plantas com deposição de *MSPFe* nas folhas. O acúmulo de ferro nas folhas das plantas expostas ao *MSPFe* foi maior do que os valores requeridos para suprir as necessidades normais das plantas (Larcher, 2000) e estão acima do nível crítico tido como tóxico que é de $500\mu\text{g g ms}^{-1}$ (Marchner, 1995).

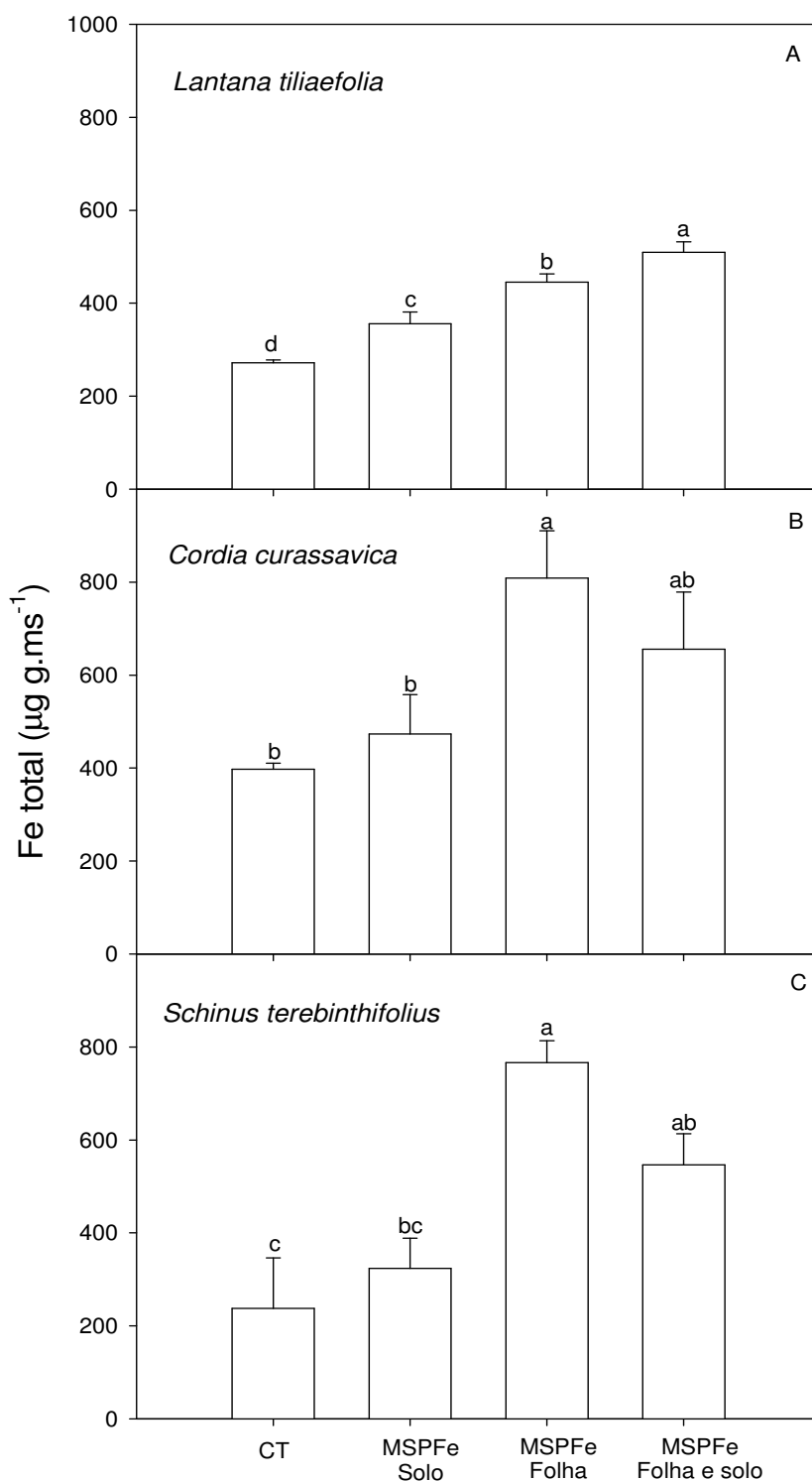


Figura 2: Conteúdo de ferro ($\mu\text{g g ms}^{-1}$) em folhas de: (A) *L. tiliaefolia*, (B) *C. curassavica* e (C) *S. terebinthifolius* não expostas (CT) e expostas à deposição de MSPFe no solo (**MSPFe-solo**), nas folhas (**MSPFe-folha**) e nas folhas e no solo (**MSPFe-folha e solo**). Cada coluna representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

- *Temperatura foliar e injúrias*

Em todos os tratamentos com deposição de *MSPFe* na superfície foliar, independentemente da espécie estudada, foram observadas, de modo geral, as maiores temperaturas, com valores que chegaram a aproximadamente 39,4°C além de uma maior quantidade de injúrias foliares conforme Figuras 3 e 4, respectivamente.

Em *S. terebinthifolius* as avaliações da temperatura foliar não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Entretanto, em *L. tiliaefolia* e *C. curassavica* foram observadas diferenças significativas, sendo as maiores temperaturas observadas nos tratamentos onde o ferro foi aplicado na folha (*MSPFe*-folha) e na folha e no solo (*MSPFe*-folha e solo). Tais resultados são similares aos encontrados por outros autores (Farmer, 1993; Hirano *et al.*, 1995) que observaram as maiores temperaturas foliares nas plantas expostas à deposição particulada.

A presença de tricomas ou rugosidade na superfície foliar de *L. tiliaefolia* e *C. curassavica* contribuiu para maior fixação de *MSPFe* que pode ter limitado a dissipação de calor, elevando a temperatura da folha. Diferentes autores (Grantz *et al.*, 2003; Pereira, 2006) relatam que ao ser depositado na parte aérea das plantas, o material sólido particulado promove a cobertura da superfície foliar causando abrasão e aquecimento das folhas expostas.

Em todos os tratamentos com deposição de *MSPFe* foram observadas quantidades significativas de injúrias nas folhas do que em relação as observadas nas plantas do tratamento controle (CT) (Figura 4).

As diferenças encontradas na absorção de ferro pelas espécies avaliadas podem ser devido às características do indumento foliar ou a um menor controle na homeostase deste elemento. As respostas das plantas a toxidez causada por elementos traço dependem da sensibilidade da espécie e das condições ambientais a que está exposta (Narayan *et al.*, 1994).

Nas plantas expostas ao *MSPFe*, principalmente aquelas com deposição nas folhas e nas folhas e no solo, o aparecimento de injúrias pode ser devido a ação combinada dos efeitos físico e químico do material particulado que ao ser depositado na superfície foliar pode causar abrasão e aquecimento (Farmer, 1993; Grantz *et al.*, 2003) e reagir aos componentes da epiderme foliar causando lixiviação de nutrientes (Pereira, 2006).

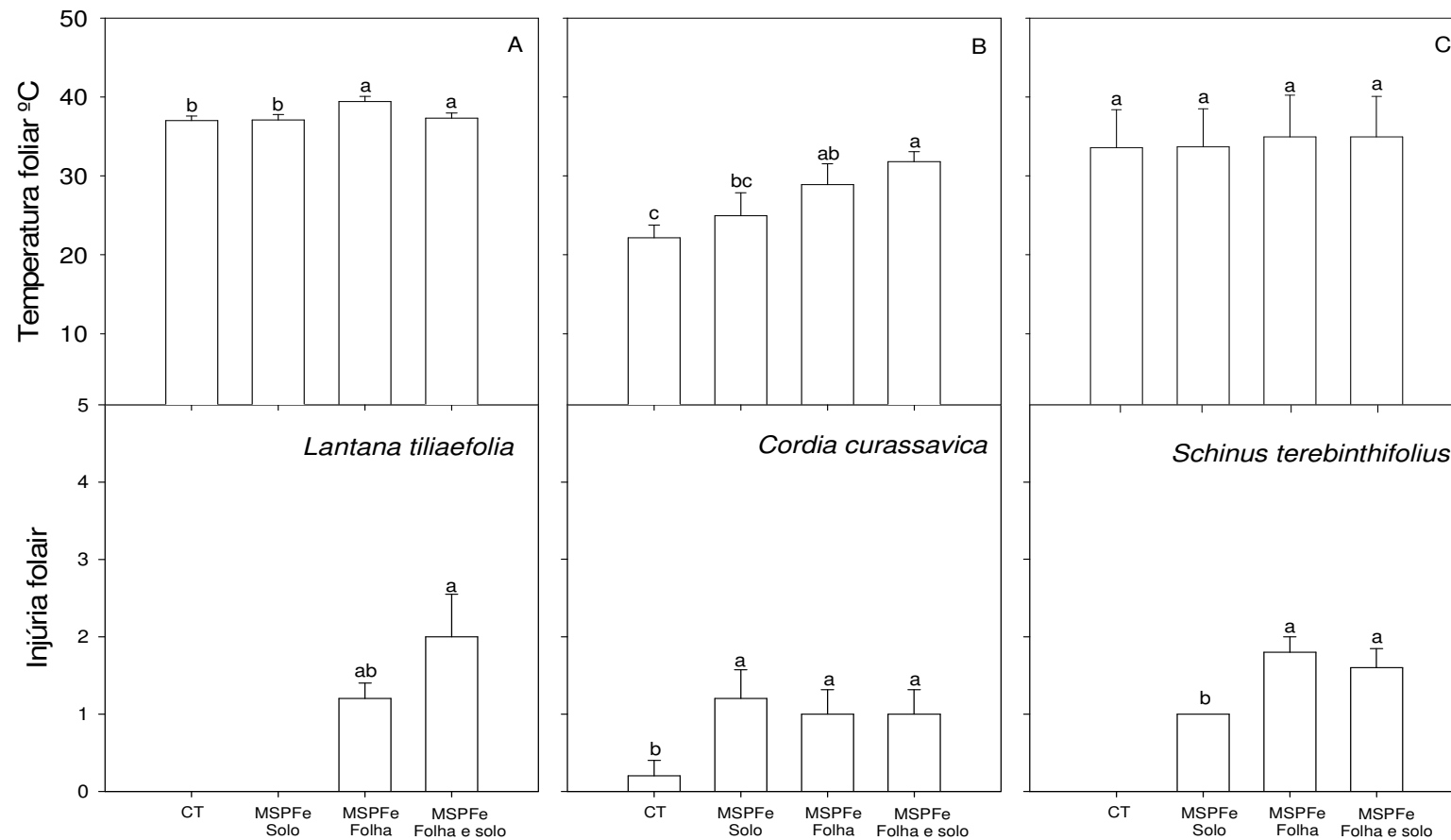


Figura 3: Temperatura e injúria em folhas de *L. tiliaefolia* (A), *C. curassavica* (B) e *S. terebinthifolius* (C) não expostas (CT) e expostas a deposição de MSPFe no solo (MSPFe-solo), na folha (MSPFe-folha) e na folha e no solo (MSPFe-folha e solo) em casa de vegetação. Cada coluna representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

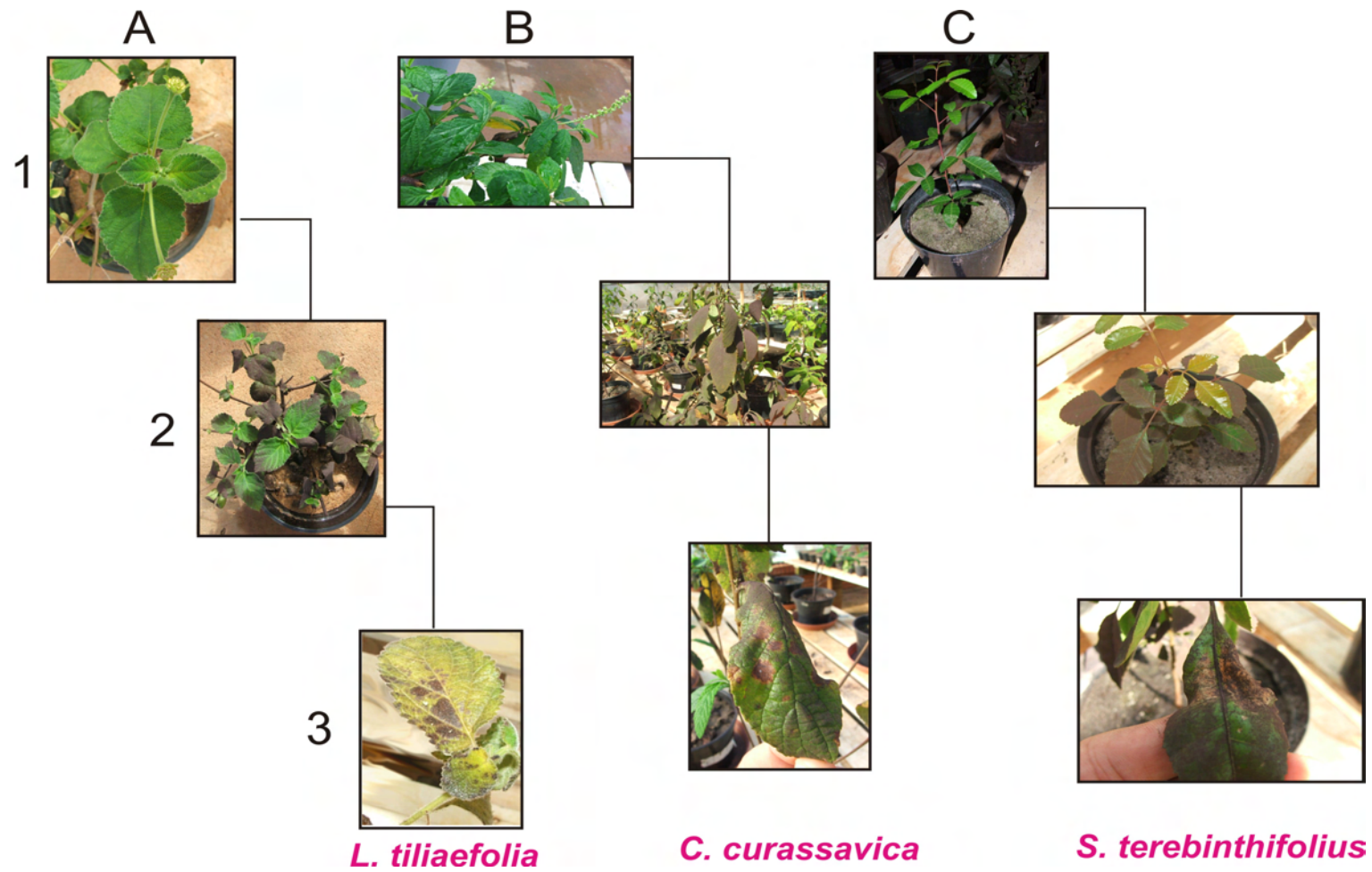


Figura 4: Plantas não expostas (1) e expostas (2 e 3) a deposição de material sólido particulado de ferro (MSPFe) em casa de vegetação. Em A- *Lantana tiliaefolia*; B- *Cordia curassavica* e C- *Schinus terebinthifolius*.

- Teor de pigmentos

Nas espécies estudadas os teores de Cl_a foram mais afetados nas plantas expostas a deposição de *MSPFe*, independentemente da modalidade de deposição (Figura 5).

Os menores teores de Cl_a , Cl_b e carotenóides foram observados nas plantas de *L. tiliaefolia* expostas ao *MSPFe* (Figura 5). A redução observada no teor de Cl_a pode ser devido a idade da folha, a disponibilidade de nutrientes ou a exposição a poluentes atmosféricos (Prusty *et al.*, 2005) ou devido a ação combinada dos efeitos físicos e químicos do material particulado que, ao reagirem com os componentes da superfície foliar podem promover à perda de nutrientes, especialmente o magnésio, que é um dos principais componentes da molécula de clorofila (Fan & Wang, 2000).

O elevado conteúdo de ferro na matéria seca foliar de todas as espécies avaliadas (Figura 2) também pode ter contribuído para a redução no teor de Cl_a . Assim, o ferro presente em elevada quantidade na planta pode tornar-se fitotóxico e causar danos a célula pela ação de espécies reativas de oxigênio, que podem afetar a produtividade vegetal (Becana *et al.*, 1998) e resultar no aparecimento de manchas foliares.

Muitas plantas são sensíveis aos poluentes atmosféricos e estes podem causar danos às folhas, afetando o crescimento e a produtividade primária (Silva *et al.*, 2006). Estes efeitos podem acelerar os processos de senescência foliar que se manifesta pela redução do teor de clorofila e que pode levar a um declínio na taxa fotossintética (Prusty *et al.*, 2005). Nesse sentido, as reduções observadas nos teores de pigmentos, especialmente Cl_a , das plantas expostas ao *MSPFe* podem limitar processos fundamentais como a fotossíntese e a produção de biomassa.

No experimento realizado em área de Restinga, as plantas expostas ao *MSPFe* apresentaram maiores teores de pigmentos que os da área não exposta. A partir das análises químicas do solo, observa-se que na área exposta, a disponibilidade de nutrientes e de matéria orgânica no solo é maior do que a da área não exposta.

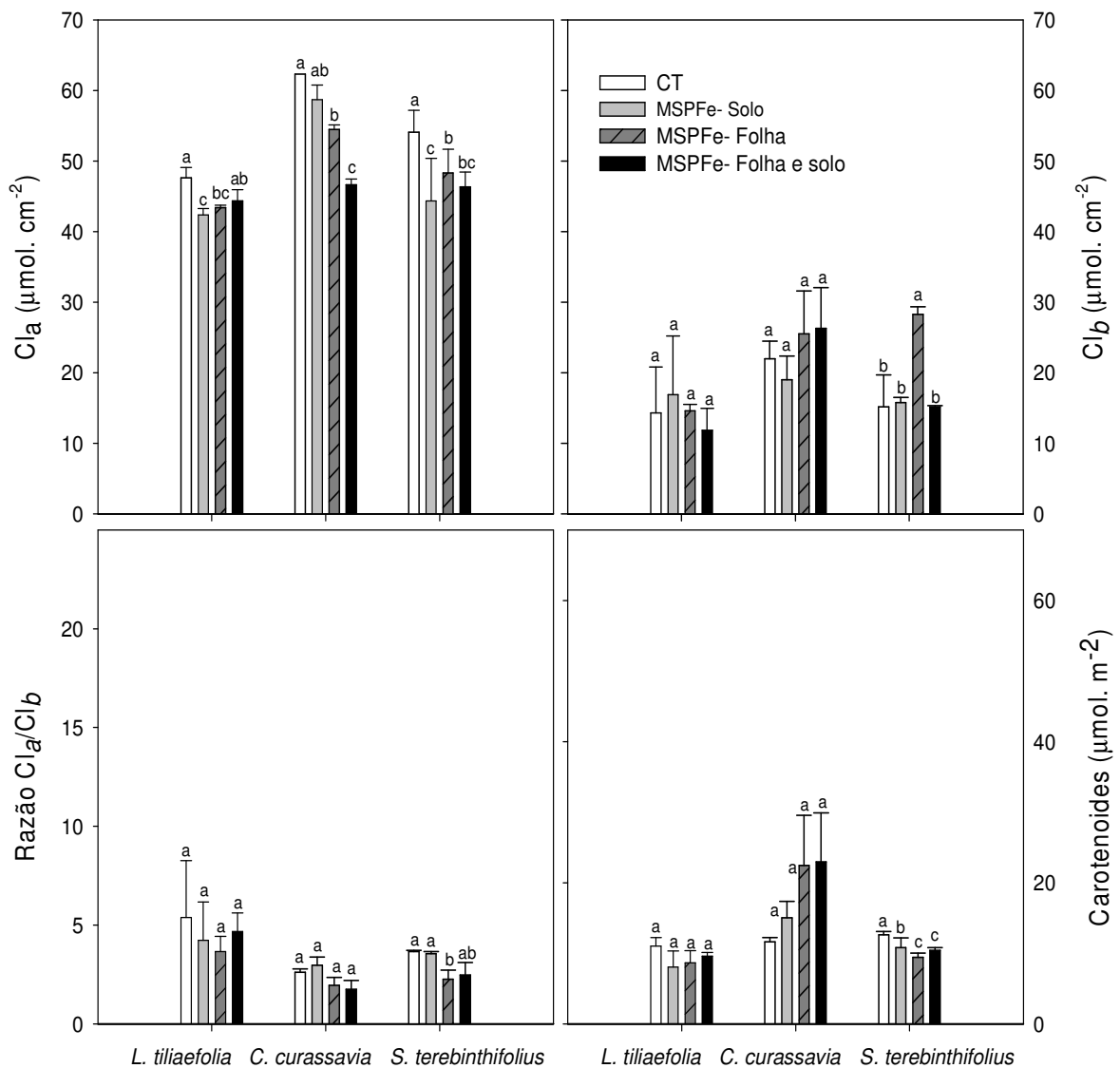


Figura 5: Efeito da deposição de material sólido particulado de ferro (*MSPFe*) nos teores de clorofila *a*, *b*, razão clorofila *a/b* e carotenóides de folhas de *Lantana tiliaefolia*, *Cordia curassavica* e *Schinus terebinthifolius* não expostas (**CT**) e expostas a deposição de *MSPFe* no solo (***MSPFe*-solo**), nas folhas (***MSPFe*-folha**) e nas folhas e no solo (***MSPFe*-folha e solo**). Cada coluna representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

- Fluorescência da clorofila *a*

Os parâmetros de fluorescência da clorofila *a* indicam que as espécies estudadas responderam de forma diferenciada ao estresse imposto. Os valores de F_v/F_m em folhas adaptadas ao escuro demonstram a eficiência máxima de conversão de energia para a fotossíntese. O NPQ indica a dissipação de energia não fotoquímica (calor) pela planta e o ETR a taxa de transporte de elétrons (Figura 6).

A razão F_v/F_m é um importante indicador do estado funcional do fotossistema, sendo uma estimativa da máxima eficiência do PSII (Björkman & Demmig, 1987; Örquist *et al.*, 1992). Nesse sentido, observa-se que as maiores reduções na razão F_v/F_m ocorreram, independentemente da espécie, nas plantas com deposição de *MSPFe* nas folhas e nas folhas e no solo (*MSPFe*-folha e solo).

Apesar da redução de quase 10%, não foram observadas diferenças significativas em plantas de *L. tiliaefolia*. De modo geral, plantas de *C. curassavica* e *S. terebinthifolius* que tiveram o *MSPFe* aplicado nas folhas e nas folhas e no solo (*MSPFe*-folhas e *MSPFe*-folhas e solo), diferiram significativamente das plantas controle e com *MSPFe* no solo (CT e *MSPFe*-solo) respectivamente, indicando que o complexo coletor de luz e os centros de reação do fotossistema II podem apresentar indícios de fotoinibição (Demming *et al.*, 1987; Demming-Adams, 1992; Adams, 1994) pela exposição ao *MSPFe*.

Os valores do NPQ das plantas que tiveram o *MSPFe* depositado em suas folhas apresentaram diferenças significativas em relação aos demais tratamentos, independentemente da espécie avaliada (Figura 6). O aumento observado no NPQ normalmente acontece em condições de alta irradiância e elevada temperatura, sugerindo que as plantas estão dissipando a energia absorvida na forma de calor, através de processos não fotoquímicos (Maxwell & Johnson, 2000), com a formação de um gradiente de pH através das membranas do tilacoide e ativação do ciclo das xantofilas para proteger as plantas contra o excesso de energia (Demming-Adams & Adams, 1992; Müller *et al.*, 2001).

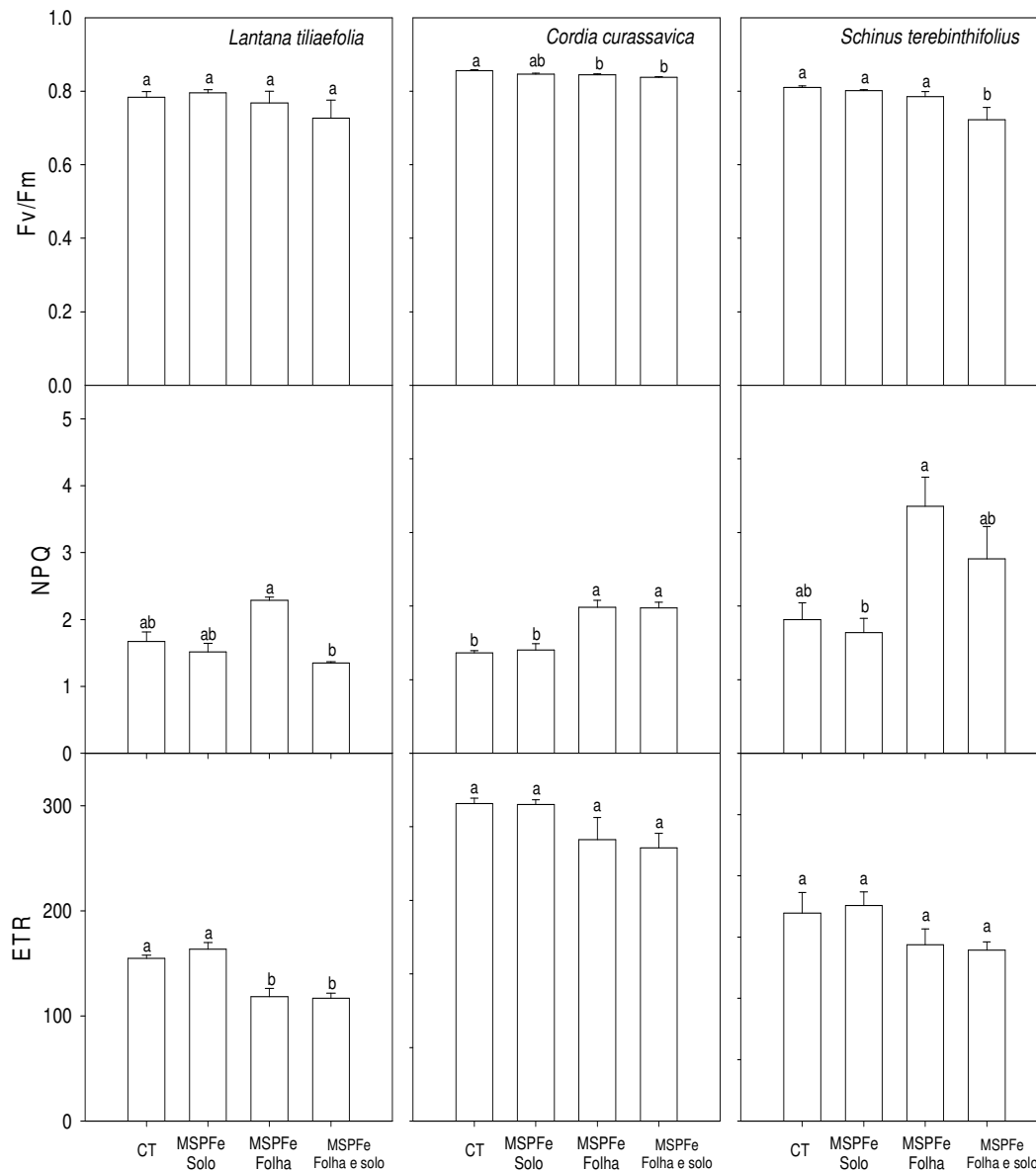


Figura 6: Efeito da deposição de material sólido particulado de ferro (*MSPFe*) em diferentes parâmetros da fluorescência da clorofila *a*: *Fv/Fm* (rendimento quântico potencial máximo); *NPQ* (coeficientes de extinção não-fotoquímica) e *ETR* (taxa aparente de transporte de elétrons) em plantas de *L. tiliaefolia* (A), *C. curassavica* (B) e *S. terebinthifolius* (C) não expostas (**CT**) e expostas a deposição de *MSPFe* no solo (***MSPFe*-solo**), nas folhas (***MSPFe*-folha**) e nas folhas e no solo (***MSPFe*-folha e solo**). Cada coluna representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As espécies utilizadas neste estudo são encontradas naturalmente em áreas litorâneas que apresentam irradiância e temperatura elevadas. Em situações de estresse a utilização da energia de excitação através da cadeia de transporte de elétrons é limitada, tornando a redução na taxa de transporte de elétrons mais evidente (Demming-Adams *et al.*, 1996). Em todas as espécies expostas ao *MSPFe* foi observada queda na ETR, apesar de diferença significativa ser observada apenas em *L. tiliaefolia*. Esta redução no ETR pode ser um indício de estresse causado pelo *MSPFe*.

Devido a sua propriedade redox, o ferro participa de um elevado número de processos metabólicos como as reações que envolvem a transferência de elétrons (Becana, *et al.*, 1998; Hell & Stephan, 2003). Ao se acumular em níveis elevados, pode tornar-se tóxico, podendo afetar diferentes processos fisiológicos, entre eles a transferência de elétron no PSII.

- Trocas gasosas

As variações na taxa fotossintética (A), na taxa transpiratória (E), na condutância estomática (g_s) e na relação entre a concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a) das espécies estudadas e submetidas à deposição de *MSPFe* são apresentadas na Figura 7.

Foi observada queda significativa em A nas plantas que tiveram o *MSPFe* aplicado na folha e na folha e no solo (*MSPFe*- folha e *MSPFe*- folha e solo, respectivamente). A fotossíntese pode ser afetada por diferentes fatores. A alta irradiância, a elevada temperatura, níveis de O_2 e CO_2 , o estágio de desenvolvimento vegetal, podem causar alterações no metabolismo fotossintético e, conseqüentemente, no acúmulo de reservas (Winner, 1989).

Entretanto, além destes fatores, o *MSPFe* afetou a fotossíntese não somente pela cobertura da superfície foliar que reduziu a absorção de radiação, mas também por se acumular na câmara subestomática e limitar a difusão do CO_2 (Sharifi *et al.*, 1997; Pereira *et al.*, 2009).

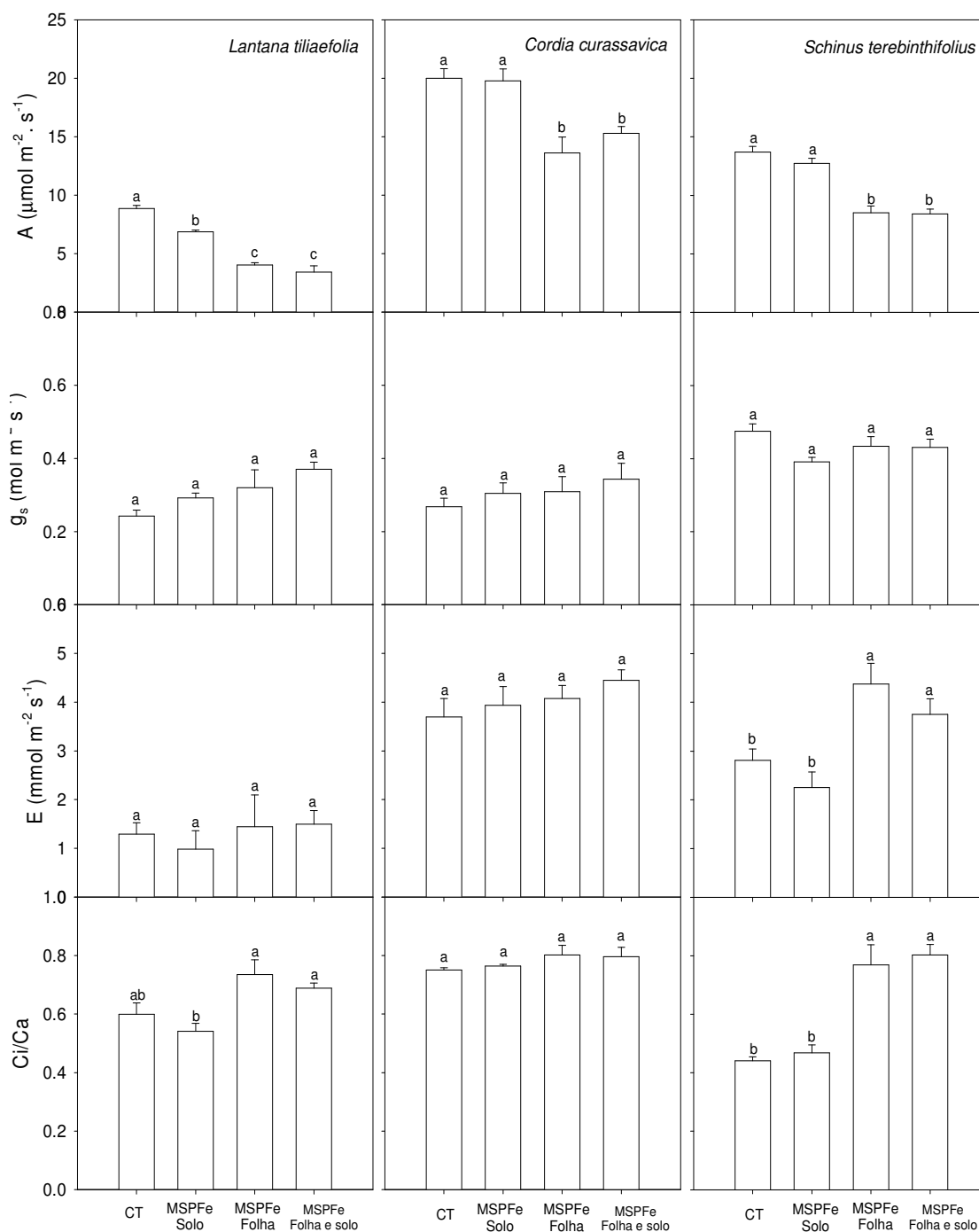


Figura 7: Efeito da deposição de material sólido particulado de ferro (*MSPFe*) na taxa fotossintética (*A*), na condutância estomática (g_s), na transpiração (*E*) e na relação *Ci/Ca* em plantas de *L. tiliaefolia* (A), *C. curassavica* (B) e *S. terebinthifolius* (C) não expostas (CT) e expostas a deposição de *MSPFe* no solo (*MSPFe-solo*), nas folhas (*MSPFe-folha*) e nas folhas e no solo (*MSPFe-folha e solo*). Cada coluna representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em geral, os valores elevados de g_s e E nas plantas expostas ao *MSPFe* não se refletiram em uma maior taxa fotossintética. Trabalhos sugerem que o material particulado pode afetar o movimento estomático alterando o diâmetro de seus poros, afetando a difusão de gases (Silva *et al.*, 2006). Adicionalmente é possível a interferência bioquímica de algumas deposições sólidas na formação de poder redutor (NADPH e ATP) e na fixação enzimática do CO_2 atmosférico (Thompson *et al.*, 1984; Neves, 2004; Pereira *et al.*, 2009).

Os aumentos observados em E podem ainda indicar uma estratégia adaptativa para a dissipação de calor pelas plantas que tiveram o *MSPFe* aplicado em suas folhas. Outros autores relatam que plantas submetidas à deposição particulada apresentaram aumento na taxa transpiratória foliar (Farmer, 1993; Hirano *et al.*, 1995; Grantz *et al.*, 2003).

A relação C_i/C_a integra as respostas estomáticas e metabólicas do processo fotossintético. Normalmente a concentração de CO_2 no ambiente é constante e a concentração interna varia em função da demanda de CO_2 no mesofilo (Mott, 1988). Geralmente, aumentos na taxa fotossintética diminuem a relação C_i/C_a . Por outro lado, aumentos nesta relação estão associados à incapacidade da planta em reduzir o carbono no ciclo de Calvin por queda na atividade enzimática, por redução nos níveis de poder redutor ou por outro tipo de impedimento, como o que pode estar sendo exercido pelo *MSPFe*.

A manutenção da relação C_i/C_a elevada nas plantas expostas a deposição particulada pode indicar que o *MSPFe* além dos efeitos físicos, que refletem na diminuição das trocas gasosas, pode estar causando danos em enzimas responsáveis pela fixação do CO_2 e aumentando a atividade de espécies reativas de oxigênio (Kampfenkel *et al.*, 1995; Sinha *et al.*, 1997; Pereira, 2006).

- Histoquímica

A histolocalização do ferro pelo Azul de Prússia ocorreu em todos os tecidos foliares das espécies estudadas e expostas ao *MSPFe*. Entretanto, nas plantas controle a reação foi menos intensa.

Em *Lantana tiliaefolia*, as folhas dos indivíduos controle apresentaram reação ausente na região da nervura mediana (Figura 8A). Nas folhas das

plantas expostas ao *MSPFe* houve reação no colênquima, no parênquima cortical e nos tricomas tectores (Figura 8B).

Em *C. curassavica*, as folhas dos indivíduos controle (Figura 8C) apresentaram reação positiva na região da nervura mediana, entretanto tiveram menor intensidade do que as plantas do tratamento com *MSPFe* (Figura 8D) que apresentou reação positiva na epiderme, incluindo os feixes vasculares, tricomas glandulares e estômatos.

Nas folhas das plantas controle de *S. terebinthifolius* ocorreu reação positiva, porém com pouca intensidade na região da nervura mediana (Figura 8E). Nas folhas das plantas expostas ao *MSPFe* ocorreu reação intensa na região do colênquima (Figura 8F).

Na lâmina foliar das plantas controle de *L. tiliaefolia* ocorreu reação na face abaxial da epiderme, contudo com menor intensidade que nas plantas expostas ao *MSPFe* (Figuras 9A e 9B) que onde se observa reação positiva para o ferro nos tricomas tectores, na epiderme e no parênquima lacunoso.

Os tecidos da lâmina foliar de plantas de *C. curassavica* controle não reagiram com o Azul de Prússia ao passo que as plantas expostas ao *MSPFe* apresentaram reação positiva nos tricomas glandulares, na epiderme, estômatos e parênquima lacunoso (Figuras 9C e 9D).

Foi verificada na lâmina foliar de *S. terebinthifolius* reação positiva em células da epiderme, parênquima lacunoso e feixe vascular nos tecidos foliares das plantas expostas ao *MSPFe*. Nas plantas controle foi observada reação positiva nas células, porém, com menor intensidade que a observada nas plantas expostas ao *MSPFe* (Figura 9E e 9F).

A presença de ferro observada nos tecidos das plantas expostas a deposição particulada evidenciada pela reação positiva do Azul de Prússia, indica estar havendo absorção deste elemento e que as quantidades depositadas diariamente (Lopes *et al.*, 2002) podem influenciar a constituição dos tecidos das plantas expostas.

A presença de adaptações morfológicas e anatômicas é uma estratégia adaptativa que permite as espécies se estabelecerem em diferentes ambientes. Em espécies de Lantana, a presença de cutícula espessa pode ser uma dessas adaptações (Larcher, 2000; Procópio *et al.*, 2003) e de cera epicuticular em *S. terebinthifolius* (Paiva, 2007).

Os tricomas não secretores visualizados principalmente em *L. tiliaefolia* e *C. curassavica* são relatados na literatura para os gêneros estudados por diferentes autores, entre eles Silva (2003); Moura *et al.* (2005) e Passos (2008). A maior densidade destes tricomas na superfície adaxial destas espécies pode estar relacionada a diversos fatores como, por exemplo, proteção contra radiação excessiva e altas temperaturas, como registrado na literatura (Valkama *et al.*, 2003; Passos, 2008). No entanto, a verdadeira função ecológica dos tricomas, na maioria das vezes não é respaldada por investigações experimentais (Werker, 2000).

Os tricomas na superfície foliar podem interceptar substâncias que são depositadas pela ação da gravidade, impedindo que estas alcancem a epiderme propriamente dita, fato que pode reforçar a menor intensidade de injúrias apresentadas por *L. tiliaefolia* durante o processo de deposição do *MSPFe*. Desse modo, a alta densidade de tricomas na superfície adaxial destas espécies seria vantajosa por constituir-se em estratégia de proteção contra o efeito de poluentes ou substâncias depositadas na superfície foliar. *Schinus terebinthifolius* apresenta em suas folhas tricomas tectores, porém, em menor intensidade que as outras espécies estudadas.

O elevado conteúdo de ferro presente nos tecidos foliares de plantas de *C. curassavica* expostas pode estar relacionado com o depósito do *MSPFe* nas cavidades presentes em suas folhas. Silva (2003) relata que a estrutura anatômica desta espécie apresenta reentrâncias nas células epidérmicas das bases dos tricomas glandulares que parecem proporcionar maior retenção do *MSPFe* em suas folhas quando comparado com as outras espécies avaliadas neste trabalho.

Durante o período experimental observações não sistemáticas indicaram que plantas de *S. terebinthifolius* expostas ao *MSPFe* levavam um tempo maior para a abscisão foliar em relação as plantas controle, fato que pode ter contribuído para uma maior absorção de ferro. A ausência de adaptações anatômicas e morfológicas que limitassem a entrada deste elemento na planta, pode também ter colaborado para o um maior acúmulo e aparecimento de lesões nos tecidos foliares apesar de menos intensos que em outras espécies.

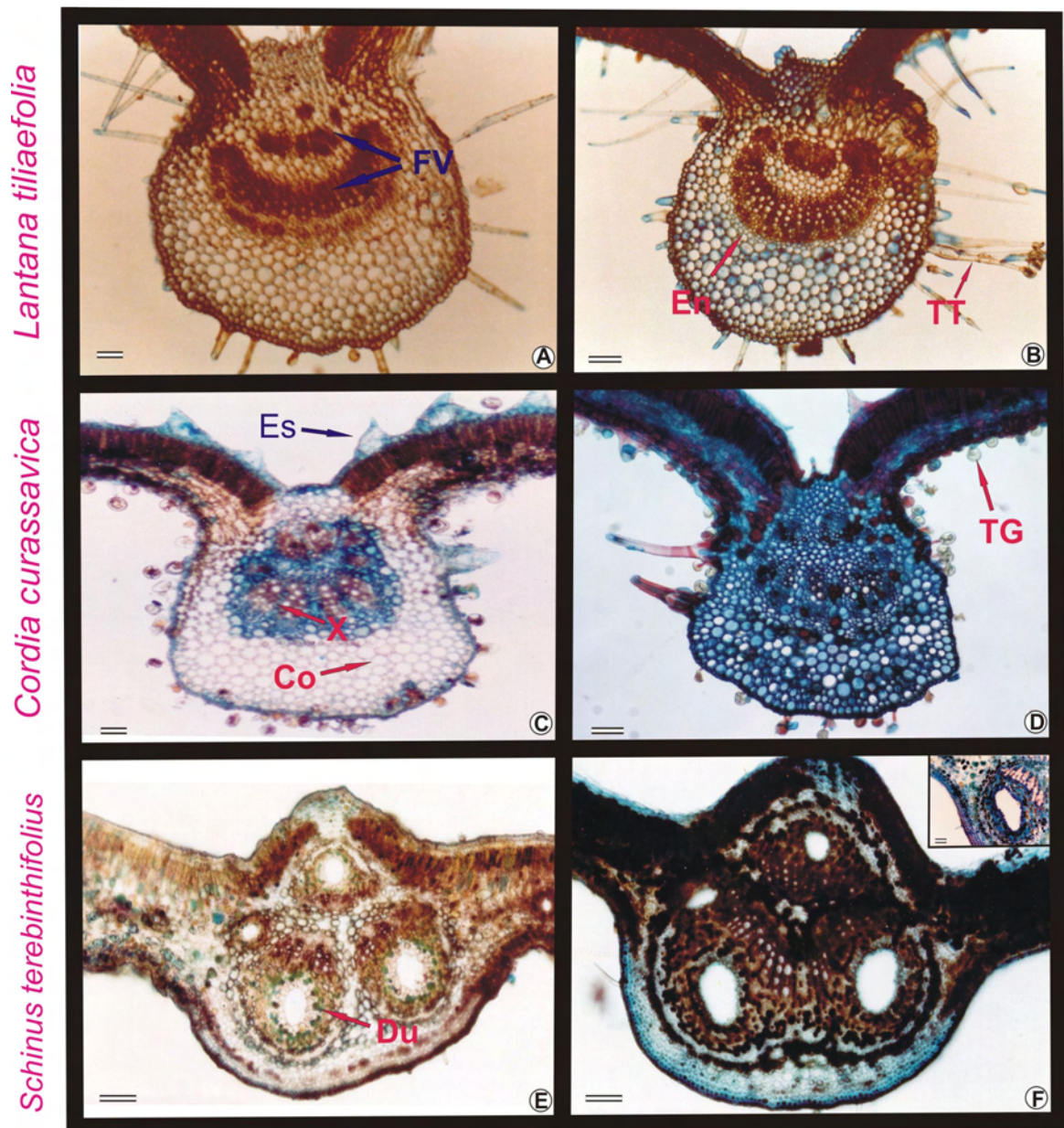


Figura 8: Detecção de Fe^{2+} em cortes transversais da lâmina foliar de folhas adultas de *Lantana tiliaefolia*, *Cordia curassavica* e *Schinus terebinthifolius* com Azul de Prússia. Figura 8A indica plantas controle de *L. tiliaefolia*; Figura 8C indica plantas controle de *C. curassavica* e 8E indicam plantas controle de *S. terebinthifolius*. Cortes de plantas expostas ao *MSPFe* são apresentadas nas Figuras 8B em *L. tiliaefolia*, 8D em *C. curassavica* e 8F em plantas de *S. terebinthifolius*, respectivamente. Co- Colênquima; D- Ducto; EN- Endoderme; FV- feixe vascular; TT- tricoma tector, TG- tricoma glandular, X- xilema. Presença de coloração azul indica Fe no tecido. Barras= 50 μ m.

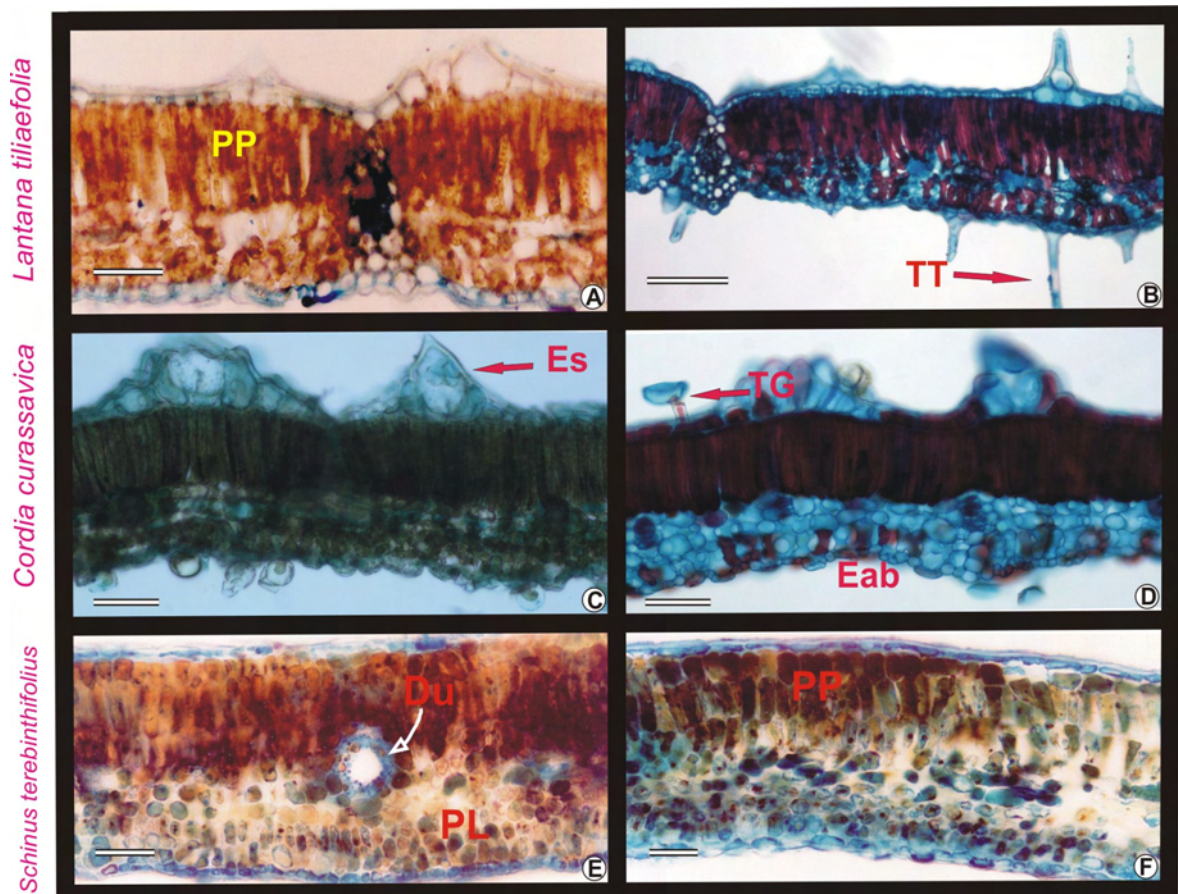


Figura 9: Detecção de Fe^{2+} em cortes transversais da lâmina foliar de folhas adultas de *Lantana tiliaefolia*, *Cordia curassavica* e *Schinus terebinthifolius* com Azul de Prússia. Figura 9A indica plantas controle de *L. tiliaefolia*; Figura 9C indica plantas controle de *C. curassavica* e 9E indicam plantas controle de *S. terebinthifolius*. Cortes de plantas expostas ao *MSPFe* são apresentadas nas Figuras 9B em *L. tiliaefolia*, 9D em *C. curassavica* e 9F em plantas de *S. terebinthifolius*, respectivamente. Co- Colênquima, D- Ducto; Eab- Epiderme abaxial, Ead- Epiderme abaxial, Em- Endoderme, TG- Tricoma glandular, TT- Tricoma tector, X- Xilema. Presença de coloração azul indica Fe no tecido. Barras= 50 μ m.

- Fenologia reprodutiva

As análises fenológicas indicaram que o *MSPFe* influenciou negativamente a produção de flores e frutos, independentemente da modalidade de deposição (Figura 10)

As observações fenológicas indicaram que *L. tiliaefolia* foi a única espécie que apresentou produção de flores em todos os tratamentos. Entretanto, quando o *MSPFe* foi aplicado nas folhas e nas folhas e no solo (*MSPFe*-folha e *MSPFe*-folha e solo, respectivamente) não houve formação de frutos como se observa na Figura 10A.

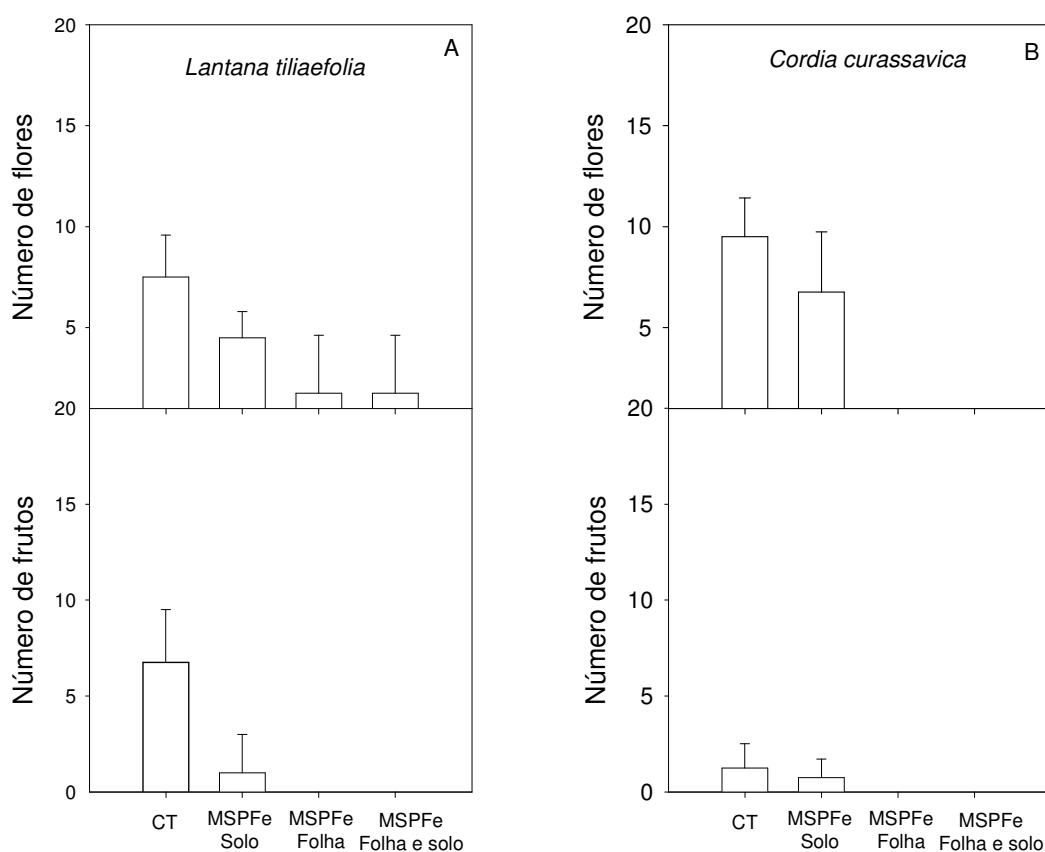


Figura 10: Efeito da deposição de material sólido particulado de ferro (*MSPFe*) no número de flores e frutos de *L. tiliaefolia* e *C. curassavica* não expostas (CT) e expostas a deposição de *MSPFe* no solo (*MSPFe*-solo), na folha (*MSPFe*-folha) e na folha e no solo (*MSPFe*-folha e solo) em casa de vegetação. Cada coluna representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão.

O *MSPFe* pode estar agindo como uma barreira física, impedindo ou limitando a chegada de radiação nas células da lâmina foliar. Ao reduzir a incidência de radiação fotossinteticamente ativa, as plantas podem apresentar uma redução na produção de fotoassimilados (Pereira, 2006) comprometendo o processo reprodutivo. A produção vegetal é altamente dependente das condições ambientais entre as quais a qualidade do ar pode desempenhar um papel decisivo. Estudos conduzidos em diferentes países apresentam perdas significativas na produção vegetal devido aos elevados níveis de poluentes depositados em diferentes espécies (Weigel *et al.*, 1989; Agrawal *et al.*, 2006).

Durante o período experimental, plantas de *C. curassavica* dos tratamentos com deposição de *MSPFe* na folha (*MSPFe*-folha) e *MSPFe* na folha e no solo (*MSPFe*-folha e solo) não apresentaram produção de flores e frutos. Entretanto, aquelas dos tratamentos controle (CT) e com deposição de *MSPFe* no solo (*MSPFe*-solo) produziram flores e frutos (Figura 10B). O material particulado pode causar alterações na produção vegetal por limitar a reprodução e o crescimento reduzindo a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa, obstruindo estômatos, aumentando a temperatura foliar e alterando o teor de pigmentos (Sharifi *et al.*, 1997; Naidoo & Cherkout, 2004; Oliveira *et al.*, 2007).

Em condições de campo alguns fatores climáticos como a chuva e o vento podem alterar a distribuição do *MSPFe* que é depositado na superfície foliar. No presente experimento, conduzido em condições semi-controladas de casa de vegetação, a ação do vento ou da chuva foi impedida. Embora uma comparação com o que normalmente ocorre no entorno da usina seja difícil de conseguir, a aplicação de *MSPFe* seguiu a média diária que é depositada sobre as folhas das plantas que são encontradas nas adjacências da usina de pelotização de minério de ferro que é de $6\text{mg cm}^2\text{dia}^{-1}$ (Lopes *et al.*, 2000).

Os resultados observados no presente estudo podem ser utilizados para confirmar os efeitos negativos do *MSPFe* na fenologia reprodutiva das espécies, dando suporte aos resultados observados no monitoramento fenológico realizado em área de Restinga (conforme Capítulo I). Nesse sentido, estudos indicam que os metais influenciam a reprodução sexual (Saikkonen *et al.*, 1998) afetando o florescimento (Brun *et al.*, 2003; Ryser & Sauder, 2006), a produção de biomassa e conseqüentemente, o crescimento da planta.

- Efeitos do MSPFe e da acidez na emergência de plântulas

A partir do experimento realizado, observou-se que o MSPFe reduziu a emergência das plântulas à medida que a quantidade depositada no solo ia aumentando. Quando associado à acidez (pH 3,0) também causou reduções na emergência das plântulas, exceto em *C. curassavica* que apresentou aumento. A acidez pode alterar a fisiologia das sementes afetando a germinação e o estabelecimento inicial (Fan & Wang, 2000).

Os tratamentos sem o MSPFe com pH 5,5 e pH 3,0 apresentaram porcentagem de emergência similares. As plântulas dos tratamentos com 0,12 mg mm⁻² e pH 5,5 e 0,12 mg mm⁻² e pH 3,0 apresentaram as menores porcentagens de emergência.

A Tabela 2 apresenta a emergência de plântulas de espécies submetidas à deposição de MSPFe e à acidez.

Tabela 2: Porcentagem de emergência de plântulas de *L. tilliaefolia*, *C. curassavica*, *B. sericea* e *S. terebinthifolius* submetidas a diferentes níveis de MSPFe e pH.

Espécies	pH	Concentração de MSPFe (mg mm ⁻²)			
		0	0,03	0,06	0,12
<i>Lantana tilliaefolia</i>	5,5	23Aa	18Aa	16Aa	8Ba
	3,0	14Aa	12Aa	0	0
<i>Cordia curassavica</i>	5,5	21Ab	22Ab	13Ba	8B
	3,0	39Aa	38Aa	17Ba	0
<i>Byrsonima sericea</i>	5,5	43ABa	52Aa	42ABa	26Ba
	3,0	46Aa	23Bb	12Bb	10Ba
<i>Schinus terebinthifolius</i>	5,5	62Aa	51Aa	63Aa	25Ba
	3,0	54Aa	57Aa	15Bb	10Bb

* letra diferente maiúscula na horizontal indica diferença significativa entre níveis de ferro e letra diferente minúscula na vertical indica diferença entre pH pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ** Não foram realizados os testes com *Anacardium occidentale* e *Psidium guajava* devido à pequena quantidade de sementes destas espécies.

Trabalhos que abordem a emergência de plântulas de espécies de Restinga são limitados, principalmente quando associados aos efeitos dos poluentes antropogênicos.

As diferenças observadas na emergência das plântulas devem-se, possivelmente as características intrínsecas de cada espécie como o

fenômeno descrito por Figliolia *et al.* (1993), pelo qual a temperatura ótima para a germinação está diretamente associada às características ecológicas da espécie e às adaptações locais de seus progenitores, fato que pode ter limitado a germinação das sementes.

Ao ser depositado no solo onde as sementes se encontravam, o *MSPFe* pode ter causado uma barreira física, limitando a quantidade de luz para as mesmas, como observado em condições de sub-bosque (Stock, 2005), reduzindo o poder germinativo de sementes de algumas espécies vegetais (Corrêa, 1984; Wide Management Guide, 2003).

A germinação de sementes e o crescimento inicial de plântulas são algumas das fases de maior vulnerabilidade no ciclo de vida das plantas (Grantz *et al.*, 2003). Nesse sentido, a acidez da solução pode causar dormência nas sementes por alterar algumas etapas do processo germinativo, como o entumescimento da semente, que depende do pH da solução (Zammit & Zedler 1988) ou o próprio metabolismo da semente, que é dependente da concentração hidrogeniônica (Larcher 2000) e, quando associado aos efeitos físicos do *MSPFe* reduz a porcentagem de germinação.

As maiores taxas de emergência de plântulas foram observadas em *B. sericea* e *S. terebinthifolius*. Apesar de apresentar poucos relatos disponíveis na literatura sobre o processo de germinação de suas sementes, Lorenzi (2002) faz menção sobre a baixa taxa de germinação das sementes e emergência lenta das plântulas de *B. sericea*. Similarmente, Zamith & Scarano (2004) apresentam como baixos os percentuais de germinação de suas sementes e relataram que este é um sério problema para a produção de mudas desta espécie.

As sementes de *S. terebinthifolius* apresentaram as maiores porcentagens de emergência entre as espécies avaliadas. Verificou-se que o *MSPFe* afetou a germinação das sementes nas maiores concentrações (0,06 e 0,12 mg mm⁻²). Trabalhos realizados com sementes desta espécie indicam uma boa taxa de germinação e emergência, variando entre 50 e 70% (Lorenzi, 1998; Scalon *et al.*, 2006).

De modo geral, é possível inferir que a emergência das plântulas estudadas foi inibida provavelmente pelo efeito físico causado pelo *MSPFe*. O pH ácido também pode ter causado efeitos negativos, principalmente quando

associado ao *MSPFe*. Kuki *et al.* (2008) ao avaliarem a germinação de sementes de *S. terebinthifolius* e *S. tomentosa* na presença de ácido e ferro não observaram reduções na germinação das sementes de *S. terebinthifolius* ao passo que, na germinação das sementes de *S. tomentosa* foram observadas reduções significativas.

As espécies estudadas, mesmo não sendo de estádios sucessionais tardios, mostraram-se susceptíveis à deposição de *MSPFe* indicando possíveis riscos à biodiversidade do ambiente exposto e a colonização de novas áreas.

4. Conclusões

A deposição de *MSPFe* elevou o conteúdo de ferro na matéria seca das plantas expostas, independentemente da espécie.

Plantas expostas a deposição de *MSPFe* não apresentaram produção de flores e frutos. *S. terebinthifolius* não floresceu durante o período avaliado independentemente da modalidade de aplicação.

Folhas das plantas expostas as modalidades de deposição nas folhas e nas folhas e no solo apresentaram elevada quantidade de lesões quando comparadas as plantas controle e com deposição de *MSPFe* somente no solo. De forma similar, o teor de pigmentos também foi reduzido nas plantas expostas ao *MSPFe* fornecendo indícios de que o *MSPFe* atua como agente acelerador do processo de senescência foliar.

As trocas gasosas foram alteradas nas plantas expostas indicando que o *MSPFe* pode estar afetando a assimilação de carbono e as reações inerentes ao processo de fixação do CO₂ atmosférico, levando a concluir que a redução observada na taxa fotossintética possa ser devido a alterações metabólicas causadas pela exposição ao *MSPFe*.

Entre os tratamentos com *MSPFe* somente aquele com deposição na folha e na folha e no solo (*MSPFe*-folha e *MSPFe*-folha e solo, respectivamente) apresentou alterações nos valores dos parâmetros de fluorescência, independentemente da espécie avaliada. Adicionalmente, o emprego de técnicas microscópicas (histoquímica) mostrou-se adequada para comprovar o acúmulo do ferro nos tecidos foliares das plantas expostas ao *MSPFe*.

Os resultados obtidos neste experimento auxiliam e corroboram aqueles encontrados no trabalho realizado em área de Restinga no Espírito Santo sobre os efeitos danosos da deposição ácida e de *MSPFe* sobre a vegetação de restinga.

5. Referências

- ADAMS III, W. W.; DEMMING-ADAMS, B.; VERHOEVEN, A. S.; BARKER, D. H. (1994) Photoinhibition during winter stress: involvement of sustained xanthophyll cycle-dependent energy dissipation. **Australian Journal of Plant Physiology**. 22: 261-276
- AGRAWAL, M. & AGRAWAL, S. B. (1999) **Effects of air pollution on plant diversity**. In: Agrawal, M. and Agrawal. (eds.): Environmental Pollution and Plants Responses. Lewis Publishers, Florida, p. 137- 152
- AGRAWAL, M.; SINGH, B.; AGRAWAL, J. N. B.; BELL, J. N. B.; MARSHALL, F. (2006) The effect of air pollution on yield and quality of Mung bean grown in peri-urban areas of varanasi. **Water, Air, and Soil Pollution**. 169: 239-254
- BECANA, M.; MORAN, J. F.; ITURBE-ORMAETXE, I. (1998) Iron-dependent oxygen free radical generation in plants subjected to environmental stress: toxicity and antioxidant protection. **Plant and Soil**. 201: 137-147
- BJÖRKMAN O.; DEMMIG, B. (1987) Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at amongst vascular plants of diverse origins. **Planta**. 170: 489-504
- BRUN, L. A.; CORFF, J. Le; MAILETT, J. (2003) Effects of elevated soil copper on phenology, growth and reproduction of five ruderal plant species. **Environmental Pollution**. 122: 361-368
- CORRÊA, M. P. (1984) **Dicionário das plantas úteis do Brasil e das exóticas cultivadas**, Ministério da Agricultura. IBDF, v.1.
- DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS, WW III.; BARKER, D. H.; LOGAN, B. A.; BOWLING, D. R. & VERHOEVEN, A. S.(1996) Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation. **Physiologia Plantarum**. 98: 253-264
- DEMMING, B.; WINTER, K.; KRÜGER, A.; CZYGAN, F. C. (1987) Photoinhibition and zeaxanthin formation in intact leaves. **Plant Physiology**. 84: 218-224
- DEMMING-ADAMS, B.; ADAMS, III.; W. W. (1992) Photoprotection and other responses of plants to high light stress. **Annual review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. 43: 599-626
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. United States (1996) Air quality criteria for particulate matter. EPA Report No. EPA/ 600/P-95/001aFaF-Cf, vol. 3. National Center for Environmental Assessment-RTP Office, Research Triangle Park (NC)
- FAN, H. B. & WANG, Y. H. (2000) Effects of simulated acid rain on germination, foliar damage, chlorophyll contents and seedling growth of five hard wood species in China. **Forest Ecology Management**. 26, 321-329

FARMER, A. M. (1993) The effects of dust on vegetation a review. **Environmental Pollution**. 79: 63-75

FIGLIOLIA, M. B.; OLIVEIRA, E. C.; PIÑA-RODRIGUES, F. C. M. (1993) Análise de sementes. In: AGUIAR, I. B.; PIÑA-RODRIGUES, F. C. M.; FIGLIOLIA, M. B. coord. **Semestres florestais tropicais**. Brasília: ABRATES, p. 37-74

GRANTZ, D. A., GARNER, J. H. B. & JOHNSON, D. W. (2003) Ecological effects of particulate matter. **Environmental international**. 29: 213- 239

HELL, R. & STEPHAN, U. W. (2003) Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. **Planta**. 216: 541-551

HIRANO, T. KIYOTA, M. & AIGA, I. (1995) Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. **Environmental Pollution**. 89: 255- 261

HOAGLAND, D. R. & ARNON, D.I. (1938) **The method for growing plants without soil: water-culture**. Berkeley: Univ. of California, 32p. Circular of the Agricultural Experimentation Station.

IQBAL, M.; ABDIN, M. Z.; MAHMOODUZZAFAR, M.; YUNUS, M. & AGRAWAL, M. (1996) Resistance mechanisms in plants against air pollution. IN: **Plant response to air pollution** (Yunus, M. & Iqbal, M., eds.). John Wiley & Sons, Chichester, p. 195-240.

KAMPFENKEL, K.; MONTAGU, M. V.; INZÉ, D. (1995) Effects of iron Excess on *Nicotiana plumbaginifolia* plants **Plant Physiology**. 107: 725- 735

KARNOVSKY, M. J. (1965) A formaldehydeglyutaraldehyde fixative of high osmolarity for use in electron microscopy. **Journal of Cell Biology**. 27: 137- 138

KUKI, K. N. (2007) **Emissões da indústria de minério de ferro como fatores de risco ecológico em espécies ocorrentes na restinga de Anchieta, Espírito Santo, Brasil**. Tese de Doutorado em Botânica, UFV, 95p.

KUKI, N. K.; OLIVA, M. A.; PEREIRA, E. G. (2008) Iron ore industry emissions as a potential ecological risk factor for tropical coastal vegetation. **Environmental Management**. 42: 111-121

LARCHER W (2000) **Ecofisiologia vegetal**. RiMa Artes e Textos: São Carlos, 531p.

LOPES, S. A.; OLIVA, M. A.; MARTINEZ, C. A. (2000) Impacto das imissões de dióxido de enxofre e deposição de material 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, São Carlos, p. 53-71

LORENZI, H. (1998) **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa: Plantarum. 352 p.

- LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. (2002) **Plantas Medicinais no Brasil**: nativas e exóticas. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum de Estudos da Flora. 512p.
- MARSCHNER, H. (1995) **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press, London. Second ed. 889p
- MAXWELL, K. & JOHNSON, G. N. (2000) Chlorophyll fluorescence— a practical guide. **Journal of Experimental Botany**. 51: 659-668
- MONNI, S., UHLING, C., HANSEN, E., MAGEL, E. (2001) Ecophysiological responses of nigrum to heavy metal pollution. **Environmental Pollution**. 112:121-129
- MOTT, K. A. (1988) Do stomata respond to CO₂ concentrations other than intercellular? **Plant Physiology**. 86: 200-203
- MOURA, M. Z. D.; ISAIAS, R. M. S.; SOARES, G. L. G. (2005) Ontogenesis of internal secretory cells in leaves of *Lantana camara* (Verbenaceae). **Botanical Journal of the Linnean Society**. 148: 427-431
- MÜLLER, P.; LI, X-P; NIYIGI, K. K. (2001) Non-photochemical quenching. A response to excess light energy. **Plant Physiology**. 125: 1558-1566
- NAIDOO, G.; CHIRKOOT, D. (2004) The effects of coal dust on photosynthetic performance of the mangrove, *Avicennia marina* in Richards Bay, South Africa. **Environmental Pollution**. 127: 359–366
- NARAYAN, D.; AGRAWAL, M.; PANDEY, J. & SINGH, J. (1994) Changes in vegetation characteristics downwind of an aluminum factory in India. **Annals of Botany**. 73: 557-565
- NEVES, N. R. (2004) **Fotossíntese e estresse oxidativo em plantas de *Eugenia uniflora* L. submetidas ao excesso de ferro particulado e chuva ácida**. Dissertação de Mestrado em Fisiologia Vegetal, UFV, 45p.
- OLIVEIRA, C. R. M. de; OLIVA, M. A.; PEREIRA, E. G. (2007) Efeito do material particulado de ferro no teor de pigmentos de *Schinus terebinthifolius* Raddi. **Revista Brasileira de Biociências**. 5: 681-683
- ÖRQUIST, G.; CHOW, W. S.; ANDERSON, J. M. (1992) Photoinhibition of photosynthesis represents a mechanism for the long-term regulation of photosystem II. **Planta**. 186: 450-460
- PAIVA, A. M. de S. (2007) **Regeneração *in vitro* e estudo anatômico de aroeira da praia *Schinus terebinthifolius* Raddi**. Dissertação de mestrado em Ciências Biológicas, UFRN, 93p.
- PASSOS, J. de L. (2008) **Comparação da anatomia e química de *Lantana camara* e *L. radula* e interação dessas espécies com *Corynespora cassiicola***. Tese de Doutorado em Botânica. UFV, 93p.

PEÑA, C. E.; CARTER, D. E.; AYALA-FIERRO, F. (2001) **Toxicologia Ambiental de Riesgos y Restauración Ambiental**. Southwest Hazardous Waste Program. University of Arizona. 204p.

PEREIRA, E. G. (2006) **Efeitos fisiológicos e bioquímicos causados pela deposição de ferro particulado em *Clusia hilariana*, uma espécie CAM de restinga**. Dissertação de Mestrado em Fisiologia Vegetal, UFV, 71p.

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

PROCÓPIO, S. O.; FERREIRA, E. A., SILVA, E. A. M.; SILVA, A. A., RUFINO, R.; J. N.; SANTOS, J. B. (2003) Leaf anatomical studies in weed species widely common in Brazil. III - *Galinsoga parviflora*, *Crotalaria incana*, *Conyza bonariensis* and *Ipomoea cairica*. **Planta Daninha**. 21: 1-9

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

RYSER, P.; SAUDER, W. R. (2006) Effects of heavy-metal-contaminated soil on growth, phenology and biomass turnover of *Hieracium piloselloides*. **Environmental Pollution**. 140:52-61

SAIKKONEN, K., KOIVUNEN, S., VUORISALO, T., MUTIJAINEN, P., (1998) Interactive effects of pollination and heavy metals on resource allocation in *Potentilla anserina* L. **Ecology**. 79: 1620-1629

SCALON, S. de P. Q.; MUSSURY, R. M.; SCALON FILHO, H.; FRANCELENO, C. S. F. (2006) Desenvolvimento de mudas de aroeira (*Schinus terebinthifolius*) e sombreiro (*Clitoria fairchildiana*) sob condições de sombreamento. **Ciência e Agrotecnologia**. 30:166-169

SHARIFI, M. R.; GIBSON, A. C.; RUNDEL, P. W. (1997) Surface dust impacts on gas exchange in Mojave Desert shrubs. **Journal of Applied Ecology**. 34: 837-846

SILVA, L. C. (2003) **Avaliações bioquímicas, fisiológicas e anatômicas dos efeitos de poluentes atmosféricos sobre espécies vegetais da restinga**. Viçosa, MG: UFV. Tese de Doutorado em Fisiologia Vegetal. UFV, 137p.

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

SINHA, S.; GUPTA, M.; CHANDRA, P. (1997) Oxidative Stress Induced by Iron in *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle: Response of Antioxidants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. 38: 286-291

STOCK, D. (2005) **The dynamics of *Lantana camara* (L.) invasion of subtropical rain forest in Southeast Queensland**. Queensland: Griffith University. Thesis PhD. 249p.

THOMPSON, J. R.; MUELLER, P. W.; FLÜCKIGERT, W.; RUTTER, A. J. (1984) The effect of dust on photosynthesis and its significance for roadside plants. **Environmental Pollution**. 34: 171-190

VALKAMA, E.; SALMINEN, J. P.; KORICHEVA, J.; PIHLAJA, K. (2003) Comparative analysis of leaves trichome structure and composition of epicuticular flavonoids in Finnish Birch species. **Annals of Botany**. 91: 643-655

WEIGEL, H.J.; HALBWACHS, G. & JÄGER, H.J. (1989) The effects of air pollutants on forest trees from a plant physiological view. **Journal of Plant Diseases and Protection**. 96: 203-217

WELLBURN, A. R. (1994) The spectral determination of chlorophyll a and b, as well as total carotenoids, using various solvent with spectrophotometers of different resolutions. **Journal of Plant Physiology**. 144: 307- 313

WERKER, E. (1993) Function of essential oil-secreting glandular hairs in aromatic plants of the Lamiaceae. A review. **Flavour and Fragrance Journal**. 8:249-255

WIDE MANAGEMENT GUIDE. (2003) *Lantana- Lantana camara*. weeds of national significance. Australia. 6p

WINNER, W. E. (1989) **Photosynthesis and transpiration measurements as biomarkers of air pollution effects on forests**. In.: Biologic Markers of Air-Pollution Stress and Damage in Forests. Committee on Biologic Markers of Air-Pollution Damage in Trees, National Research Council, p. 303-317.

ZAMITH, L. R.; SCARANO, F. R. (2004) Produção de mudas de espécies das Restingas do município do Rio de Janeiro, RJ, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**. 18: 161-176

ZAMMIT, C. A.; ZEDLER, P. H. (1988) Germination response to extreme acidity: Impact of simulated acid deposition from a single shuttle launch. **Environmental and Experimental Botany**. 28: 73 – 81.

CAPÍTULO III

**EFEITOS DO Fe-EDTA NA FENOLOGIA REPRODUTIVA, BIOMASSA
E DESEMPENHO FOTOSSINTÉTICO DE PLANTAS DE RESTINGA**

Resumo: Indústrias que processam e beneficiam o minério de ferro tem se instalado junto a áreas de vegetação nativa e, suas emissões podem afetar o crescimento e a sobrevivência de muitas espécies e, em última instância, a biodiversidade dos ecossistemas em decorrência da alta carga de poluentes lançada nas áreas localizadas no seu entorno. No presente estudo foram investigados os efeitos do Fe^{2+} nas trocas gasosas, na fluorescência da clorofila *a*, nos teores de pigmentos, nos parâmetros de crescimento, acúmulo de ferro na matéria seca e na fenologia reprodutiva de plantas de *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* e *S. terebinthifolius*. Os experimentos foram realizados em ambiente semi-controlado de casa de vegetação utilizando solução nutritiva de Hoagland e Arnon a meia força iônica, pH 5,0, constantemente aerada. O ferro foi aplicado na forma de Fe-EDTA nas concentrações de 0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0mM. A redução no crescimento das plantas foi proporcional ao aumento da concentração do Fe^{2+} na solução de cultivo. Após aproximadamente 30 dias de exposição ao poluente se deu início à senescência foliar. Os efeitos do Fe^{2+} foram mais severos nas plantas cultivadas na solução de 2,0 mM, onde se observaram notórias reduções na quantidade de flores e frutos e aumento nas lesões foliares. Reduções foram também encontradas no teor de pigmentos que diminuíram ao longo do tempo de exposição e com o aumento na concentração de Fe^{2+} . O ferro afetou as trocas gasosas das plantas expostas, mas não promoveu danos irreversíveis ao aparato fotossintético. O conteúdo de ferro na matéria seca foliar mostra estreita relação com as respostas de sensibilidade e tolerância das plantas. Os diversos danos causados pelo Fe^{2+} na taxa de crescimento, no teor de pigmentos, na taxa fotossintética e na fenologia reprodutiva das espécies avaliadas indicam que o estabelecimento e a reprodução de *C. curassavica* e *S. terebinthifolius* em áreas próximas a fontes poluidoras pode ser comprometida, pois estas espécies mostraram-se menos tolerantes ao ferro na solução de cultivo. *L. tiliaefolia*, além das reduções observadas em todos os parâmetros avaliados, mostrou-se promissora por acumular elevadas quantidades de ferro na matéria seca, podendo ser utilizada como planta bioindicadora para este tipo de poluição.

Palavras-chave: Plantas de restinga, ecossistema costeiro, toxidez por ferro, solução de Hogland

Abstract: Iron mining and processing industries have been installed near areas of native vegetation. Its emissions can affect the growth and the survival of many species and, in a long term, the ecosystem's biodiversity as a result of the high load of pollutants launched in the areas located in its neighborhood. In the present study was investigated the effects of the Fe^{2+} in gas exchange, chlorophyll a fluorescence and pigment content, in the parameters of growth, iron accumulation in the dry matter and in the reproductive phenology of *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* and *S. terebinthifolius*. The experiments were carried out in semi-controlled environment in a green house using Hoagland and Arnon nutrient solution with half ionic strength and pH 5,0, constantly aerated. Iron was applied as Fe-EDTA at doses of 0; 0,5; 1,0; 1,5 and 2,0mM. The reduction in the growth of the plants was proportional to the increase of the Fe^{2+} concentration in the nutrient solution. The senescence of leaves started after approximately 30 days of exposure to the pollutant. The effects of the Fe^{2+} were more severe in the plants cultivated in the solution of 2,0Mm, where significant reductions were observed in the quantity of flowers and fruits and increase in the leaf injuries. Reductions were also found in the pigment content, reducing along the time of exposure and with the increase in the Fe^{2+} concentration. The iron affected the gas exchange parameters of the exposed plants, but it did not promote irreversible damages to the photosynthetic apparatus. The iron content in the leaves showed direct relation with the sensibility and tolerance index of the plants. The damages caused by the Fe^{2+} in the growth rate, pigment content, photosynthetic rate and in the reproductive phenology of the evaluated species, indicate that the establishment and the reproduction of *C. curassavica* and *S. terebinthifolius* in areas near to pollutant sources can be reduced, since these species appeared less tolerant to the iron in the nutrient solution. Besides the reductions observed in all the evaluated parameters, *L. tiliaefolia* appeared promising due it accumulate elevated quantities of iron, being able to be used as bioindicator plant to this type of pollution.

Keywords: Restinga plants, costal ecosystem, iron toxicity, Hogland's solution

1. Introdução

O crescente processo de industrialização no litoral sul do Espírito Santo e as conseqüentes emissões de poluentes vem afetando a vegetação em seu entorno. Em áreas industrializadas observa-se significativa redução no número de espécies animais e vegetais no ambiente exposto a emissão de poluentes (Ives & Cardinale, 2004). Estes distúrbios são considerados fator de risco a manutenção e estabelecimento de espécies nativas e são poucas investigações disponíveis sobre os efeitos dos poluentes no estabelecimento e reprodução de espécies nativas tropicais, principalmente em países em desenvolvimento (Klump et al., 2002).

Alterações na composição química do solo podem ocorrer pela deposição de poluentes resultando em mudanças nas condições redox do sistema que causam alterações na disponibilidade dos nutrientes do solo (McFarlane & Williamson, 2002; Lamers et al., 2006), podendo levar a alterações na composição da vegetação pela retenção de alguns nutrientes ou na disponibilização de outros, muitas vezes indesejáveis (Innes, 1995; Emberson et al., 2001).

Os efeitos do ferro em plantas cultivadas são bastante estudados, tanto em solo quanto em meio aquoso. Quando em altas concentrações, este elemento pode causar a redução do sistema radicular pelo aumento de raízes quebradiças (Armstrong et al., 1996; Smolders & Roelofs, 1996; Van der Welle et al., 2007), diminuir o teor de pigmentos (Pereira, 2006; Oliveira et al., 2007; Kuki et al., 2008), promover o aparecimento de injúrias foliares (Silva, 2003) ou causar eventual mortalidade das plantas (Smolders et al., 1995; Lamers et al., 1998).

O ferro (Fe-EDTA) em solução nutritiva quando absorvido pelas plantas em elevadas concentrações pode afetar a fisiologia e a fenologia reprodutiva das espécies.

Plântulas de *Lantana tiliaefolia*, *Cordia curassavica* e *Schinus terebinthifolius* foram cultivadas em solução hidropônica de Hoagland & Arnon à meia força iônica com o objetivo de se avaliar os efeitos fitotóxicos do Fe²⁺ (Fe-EDTA) na fisiologia, na fenologia reprodutiva e na produção de biomassa dessas espécies.

2. Materiais e Métodos

2.1 Local de estudo e material vegetal

O trabalho foi conduzido na Unidade de Crescimento de Plantas do Departamento de Biologia Vegetal (DBV) da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, com coordenadas geográficas de 20° 45' 14" S de latitude e 42° 52' 55" W de longitude e altitude de 650 metros. O trabalho foi desenvolvido na estação quente dos anos de 2006, 2007 e 2008.

Lantana tiliaefolia Cham. (Verbenaceae), *Cordia curassavica* (Jacq.) Roem. & Schult. (Boraginaceae) e *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae) foram selecionadas para esse estudo por apresentarem curto intervalo de floração e frutificação quando comparado a outras espécies estudadas e ainda por terem se adaptado melhor ao clima de Viçosa.

Material testemunho foi depositado no Herbário VIC (31.848, 31.849, 31.851) e a identidade das plantas confirmada por especialista.

- Cultivo do material vegetal

Para a propagação das espécies, foram coletados frutos ou estacas de plantas sadias que cresciam em fragmentos de Restinga preservados da ação antrópica, no Parque Estadual Paulo César Vinha. Inicialmente, as sementes de *S. terebinthifolius* foram lavadas em água para retirada da mucilagem e depois imersas em solução de hipoclorito de sódio a 5% por três minutos. Posteriormente, foram postas para secar a sombra e selecionadas quanto à uniformidade do tamanho. No dia seguinte, foram semeadas. *C. curassavica* e *L. tiliaefolia* foram reproduzidas por via assexuada através de estacas retiradas do terço-médio dos ramos da planta-mãe.

As espécies utilizadas neste estudo foram postas em leito de areia para germinação e enraizamento.

- Condições de cultivo

O material vegetal propagado foi selecionado quanto ao tamanho da parte aérea, do sistema radicular e estado fitossanitário para aclimação e crescimento inicial por um período de três meses. As mudas ou plântulas (n=5) foram mantidas em caixas de isopor de três litros com solução de Hoagland & Arnon (Hoagland & Arnon, 1938) à meia força iônica, sob aeração constante e mantidas sob condições de casa de vegetação. O pH foi ajustado a cada dois dias para 5,3 e a solução foi renovada a cada sete dias. Cada vaso foi considerado como unidade experimental (UE).

- Solução hidropônica

Após o período de aclimação, o material vegetal com raízes e folhas foi submetido às concentrações de: 0,06; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 Mm de Fe-EDTA. A concentração de Fe-EDTA foi aumentada gradativamente, em intervalos de sete dias, até atingir as respectivas doses de cada tratamento. O experimento teve duração de 3 meses. A solução foi trocada a cada sete dias e as correções de pH, a cada dois dias. Cultivaram-se as espécies em caixas de isopor de três litros.

- Clima

Os dados de temperatura máxima, mínima e média do ar foram coletadas com sensores acoplados a um DataLogger (LI 1200, LiCor- NE, USA). A temperatura média no interior da casa de vegetação foi de 28°C durante o período experimental.

- Análise do conteúdo de ferro no tecido foliar

Para determinação do conteúdo de ferro total, folhas foram lavadas com água deionizada por duas vezes para garantia da remoção de partículas aderidas a superfície foliar. A secagem do material foi realizada em estufa com circulação de ar a 70°C por 72 horas. Posteriormente, o material vegetal foi reduzido em moinho de inox a partículas com dimensões menores que 1mm.

Quinhentos miligramas do material foram digeridos em solução nitro-perclórica (3:1v/v) a 150°C e o teor de ferro do eluído foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica (Kampfenkel *et al.*, 1995).

2.2 Avaliações

Semanalmente foram realizadas nas espécies estudadas avaliações da fenologia reprodutiva e da quantidade de injúrias foliares e, ao final do período experimental, foram avaliados os parâmetros fisiológicos e de produção de biomassa.

- Injúria foliar

As injúrias nas folhas das espécies estudadas foram definidas pela presença de manchas (clorose, necrose) ou lesões. Para tal definição foram atribuídas notas de acordo com a porcentagem da área foliar injuriada, obedecendo a seguinte escala: 0- sem injúrias; 1- com injúrias em até 25% da área foliar; 2- com injúrias de 26 a 50% da área foliar; 3- de 51 a 75% da área foliar com injúrias e 4- com injúrias de 76 a 100% da área foliar. As observações foram realizadas juntamente com aquelas da fenologia.

- Teor de pigmentos

Os teores de clorofilas *a* e *b* (Cl_a), (Cl_b) e de carotenóides totais foram determinadas espectrofotometricamente nas espécies estudadas, utilizando-se de Dimetilsulfóxido (DMSO) como extrator (Wellburn, 1994). Três discos foliares de 5mm de diâmetro foram coletados de folhas expandidas do terceiro nó e forma incubados em 7mL de DMSO saturado com carbonato de cálcio acondicionado em recipientes cobertos por papel alumínio. O período de incubação foi de 24 horas para *C. verbenaceae* e 48 para as outras espécies. As absorbâncias do extrato (665,1; 649,1 e 480,0) foram lidas para determinação da Cl_a , Cl_b e carotenóides totais, respectivamente, em espectrofotômetro de duplo feixe modelo U- 2000 (UV/Vis- Hitachi Ltd, Japan) e expressos em $\mu\text{g cm}^{-2}$.

- Fluorescência da clorofila a

Os parâmetros de fluorescência da clorofila *a* foram determinados com o auxílio de um fluorômetro modulado portátil MINI-PAM (Heinz Walz, Effeltrich, GmbH, Germany). Para as medidas da eficiência fotoquímica do fotossistema II no escuro as avaliações foram realizadas na antemã onde se determinou a fluorescência mínima (F_o), máxima (F_m), variável ($F_v = F_m - F_o$) e o rendimento quântico potencial máximo (F_v/F_m). Para as medidas de claro utilizou-se radiação fotossinteticamente ativa (PAR) de $1000\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ por 30 segundos. Determinou-se a fluorescência máxima durante a iluminação actínica (F_m'), e o coeficiente de extinção não-fotoquímica (NPQ) e a taxa aparente de transporte de elétrons (ETR).

- Trocas gasosas

As trocas gasosas das plantas foram avaliadas para registro dos seguintes parâmetros: taxa fotossintética (A) e transpiratória (E), da condutância estomática (g_s) e da relação entre a concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a). Estas avaliações foram realizadas utilizando um medidor portátil de fotossíntese LI-6400, (Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA), acoplado a uma fonte de luz artificial 6400-02B RedBlue #SI-925, incidindo sobre as folhas uma densidade de fluxo de fótons de $1000\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, sempre em uma folha completamente expandida no terço-médio da planta, no horário entre 07 e 11 horas. A mesma folha utilizada nestas avaliações foi usada para as de fluorescência da clorofila *a*.

- Avaliação da fenologia reprodutiva

Nas espécies estudadas, a fenologia reprodutiva foi avaliada pela contagem semanal do número total de flores e frutos em cada planta. O monitoramento fenológico teve duração máxima de três meses.

- Determinação da biomassa

Ao final do período experimental, a biomassa fresca das plantas foi separada em raízes, caules e folhas. O material vegetal foi seco em estufa a 70°C até peso constante. Antes da secagem, as folhas tiveram sua área determinada em um medidor vertical (Delta MK2- Delta Devices Ltd, England). As raízes foram lavadas em água de torneira, seguida por lavagem em água deionizada, depois em solução de EDTA e por fim novamente em água deionizada.

2.3 Análise estatística

O delineamento estatístico utilizado foi em blocos ao acaso com cinco concentrações de ferro em solução e cinco repetições. Todos os dados foram submetidos à análise de variância e apresentados como médias mais desvio padrão e comparadas pelo teste de Tukey a 5%. As análises estatísticas foram realizadas por meio do software Sistema de Análises Estatísticas Gerais 9.1 (SAEG- UFV 9.1 Viçosa- MG).

3. Resultados e discussão

- Ferro total na matéria seca

O ferro é um nutriente essencial envolvido na síntese de clorofila e em muitos processos metabólicos no tecido vegetal. O conteúdo de ferro nas folhas foi significativamente afetado pela componente concentração da solução de cultivo e os valores encontrados em *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* e *S. terebinthifolius* na maior concentração (2 mM) ultrapassaram os valores tidos como fitotóxicos ($> 500\mu\text{g gms}^{-1}$). Os aumentos observados em relação às plantas controle foram de aproximadamente três vezes em *L. tiliaefolia*, cinco vezes em *C. curassavica* e três vezes em *S. terebinthifolius*, conforme Figura 1.

A toxidez do ferro pode estar associada com seu acúmulo na parte aérea das plantas (Rhoads, 1971). A partir da análise da Figura 1 é possível observar que dentre as espécies avaliadas somente *S. terebinthifolius* apresentou uma menor absorção de ferro. Nesta espécie, o conteúdo acumulado na matéria seca não ultrapassou o limite considerado fitotóxico. Por outro lado, *L. tiliaefolia* e *C. curassavica* acumularam quantidade quase duas vezes maiores ao valor considerado tóxico.

O acúmulo nas folhas de *L. tiliaefolia* e *C. curassavica* foi superior aos valores encontrados na literatura (Larcher, 2004), sendo, a depender do autor considerado, de duas a 10 vezes maior que aquele apresentado como tóxico para determinadas espécies vegetais (Marschner, 1995; Furlani, 2004).

Em todas as espécies, os maiores conteúdos de ferro no tecido foliar foram encontrados nas concentrações acima de 1,0mM de Fe-EDTA na solução de cultivo quando comparado com o controle. O ferro torna-se prontamente disponível para as plantas em baixos valores de pH (Hell & Stephan, 2003), dessa forma, o incremento na disponibilidade do ferro determinado pelo baixo valor do pH da solução de cultivo pode levar ao acúmulo desse metal nos tecidos vegetais.

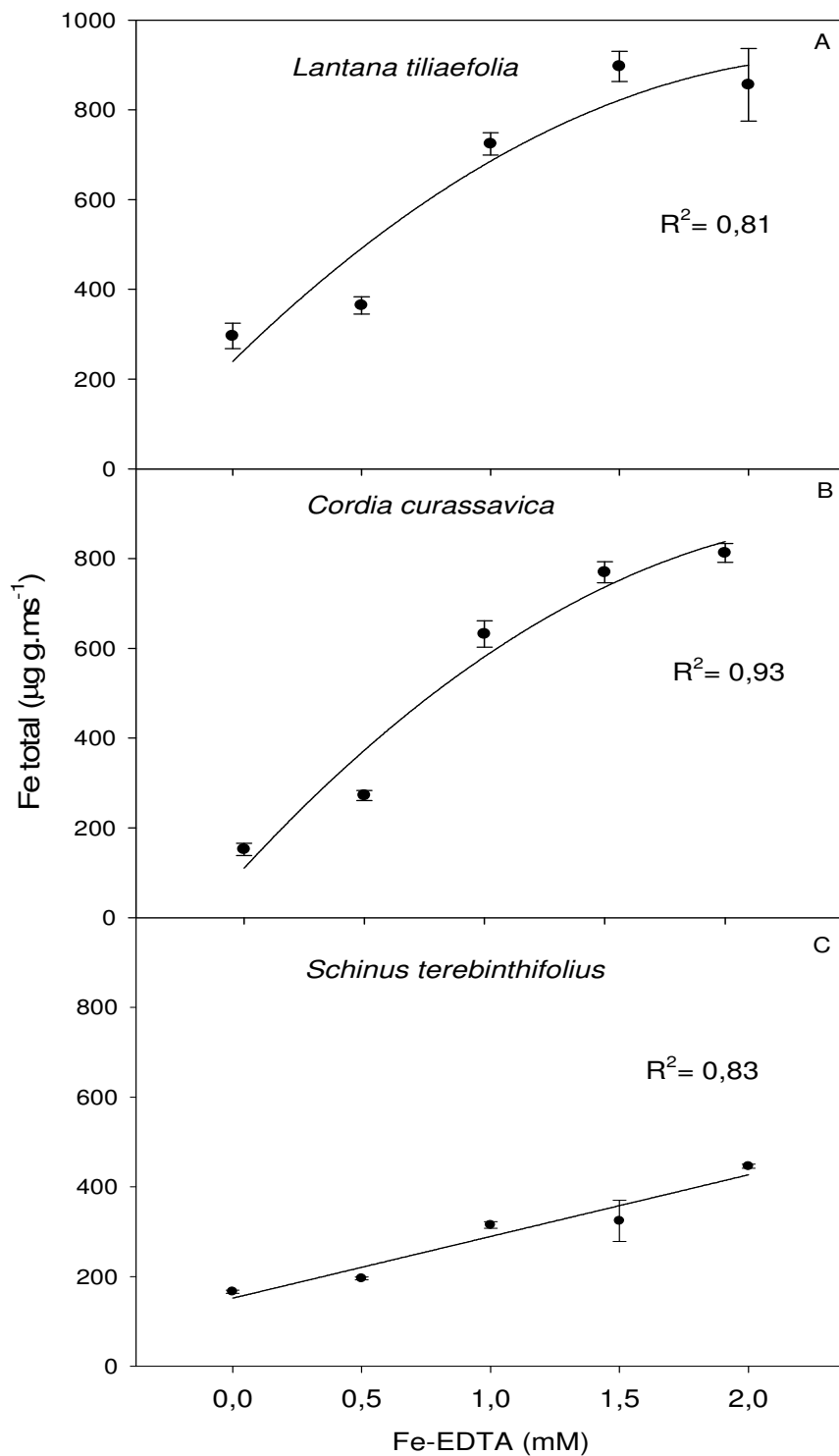


Figura 1: Teor de Fe total em folhas de *L. tiliaefolia* (A), *C. curassavica* (B) e *S. terebinthifolius* (C) submetidos a diferentes concentrações de Fe-EDTA em solução nutritiva. Cada ponto representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão. Os dados foram submetidos à análise de regressão apresentando modelo quadrático para *L. tiliaefolia* $y = 562,4x + (-116 \cdot x^2) + 239,25$ e *C. curassavica* $y = 578,9450x + (-107,55x^2) + 110,0850$ e linear para *S. terebinthifolius* $y = 137,5x + 151,7$.

Em *L. tiliaefolia* o acúmulo de ferro nos tecidos foi elevado, chegando a quase $1000\mu\text{g gms}^{-1}$ como pode ser verificado na Figura 1A. Entretanto, a queda observada em 2,0mM (Figura 1A) pode estar relacionada com a mortandade de plantas, fato que diminuiu a absorção e o conteúdo deste elemento na matéria seca.

As plantas são direta ou indiretamente afetadas pela poluição, e são capazes de responder de diferentes maneiras, podendo nesse caso, serem utilizadas como bioindicadoras da poluição atmosférica em áreas próximas a usinas de minério de ferro. A absorção excessiva deste metal eleva sua concentração a níveis tóxicos para as plantas (Grantz *et al.*, 2003).

No presente trabalho, a absorção e acúmulo de ferro nas folhas de *C. curassavica* foram potencializados pelos baixos valores de pH da solução de cultivo, chegando a atingir $800\mu\text{g gms}^{-1}$ (Figura 1B), valor quase duas vezes maior que aquele considerado fitotóxico para a maioria das plantas (Marschner, 1995).

O acúmulo de ferro na matéria seca de plantas de *S. terebinthifolius* seguiu o aumento da concentração de ferro na solução nutritiva. Na maior concentração (2,0mM) os valores de ferro total foram até duas vezes superiores ao controle (Figura 1C). Ao ser absorvido em elevadas quantidades, o ferro pode promover o aparecimento de diferentes tipos de estresse nas plantas (Becana *et al.*, 1998). Entretanto, a planta pode também buscar alternativas para transformá-lo em formas menos tóxicas (Salt *et al.*, 1998), em um processo de fitorremediação. Diferentemente de contaminantes orgânicos, os metais não podem ser degradados. Neste caso, os vegetais utilizam outras estratégias como estabilização e a acumulação (EPA, 1998).

- Injúrias foliares

As injúrias foliares observadas nas espécies estudadas aumentaram à medida que a concentração de ferro aumentava na solução nutritiva. Plantas de *L. tiliaefolia* mostraram-se sensíveis ao Fe^{2+} , apresentando mortandade das plantas expostas a concentração de 2,0mM de Fe-EDTA (Figura 2).

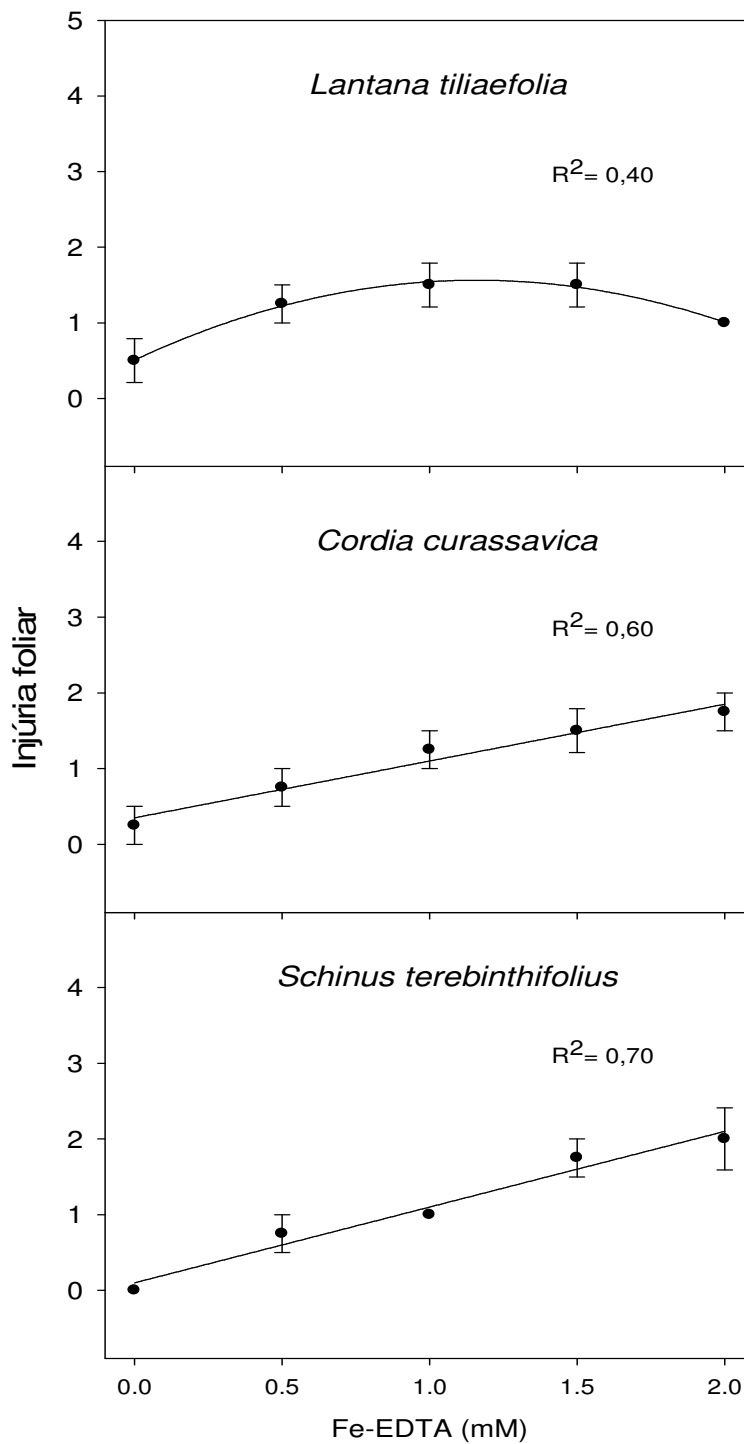


Figura 2: Injúria foliar em plantas de *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* e *S. terebinthifolius* em solução nutritiva de Hoagland & Arnon a meia força iônica com diferentes concentrações de Fe^{2+} (Fe-EDTA). Cada ponto representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão. Os dados foram submetidos à análise de regressão apresentando modelo quadrático para *L. tiliaefolia* $y = 1,8214x + (0,7857x^2) + 0,5071$ e linear para *C. curassavica* $y = 0,75 \cdot x + 0,35$ e *S. terebinthifolius* $y = 1 \cdot x + 0,1$.

As injúrias foliares induzidas pelo Fe^{2+} são caracterizadas por apresentarem-se como pontuações marrons ou avermelhadas nos espaços intervenais da superfície adaxial que se expandem rapidamente por toda a superfície foliar, apresentando nesta fase formato irregular. A manifestação inicial desses sintomas ocorreu aos 18 dias da primeira aplicação nas plantas expostas as concentrações mais elevadas (1,5 e 2,0mM).

Plantas de *L. tiliaefolia* responderam ao aumento de Fe^{2+} na solução de cultivo com aumento na quantidade de injúrias foliares e morte de plantas, este último na concentração de 2,0mM limitando assim as avaliações e justificando a queda observada no gráfico (Figura 2A). Muitas espécies vegetais respondem à exposição direta ou indireta dos poluentes através de sintomas que podem ser visíveis ou não. A presença de injúrias ou compostos fenólicos nas folhas que passam a exibir a tonalidade marrom ou avermelhada (Alves, 2001; Sanz *et al.*, 2002) pode ser indício dos efeitos tóxicos destes elementos.

Observa-se a tendência das injúrias foliares aumentarem com o aumento da concentração de Fe^{2+} na solução de cultivo nas plantas de *C. curassavica* e *S. terebinthifolius* (Figura 2B, C). A presença de injúrias nas folhas pode ser devido à absorção e acúmulo excessivo do ferro ou, quando este elemento se precipita sobre as raízes, formando uma crosta de óxido férrico que dificulta a absorção de outros nutrientes como como P, K, Ca, Mg e Zn (Howeler, 1973; Meurer, 2000) resultando no aparecimento de injúrias.

Observaram-se diferenças significativas no número de lesões foliares das plantas de *C. curassavica* expostas ao Fe-EDTA, independentemente da concentração, em relação às plantas não expostas (Figura 2B). Plantas de *Clusia hilariana* expostas a diferentes concentrações Fe^{2+} e pH 5,5 não apresentaram sintomas de toxidez ou lesões em suas folhas (Pereira, 2006). A ausência de lesões nesta espécie pode ser em função da espessura da folha ou em função do pH que pode ter precipitado parte do ferro como Fe^{3+} .

A exemplo do presente estudo, observa-se em algumas culturas que a toxidez de ferro se caracteriza pelo aparecimento de mancha vermelho-escura nas folhas, que avançam do ápice para a base ou do centro para as extremidades (Figura 3).

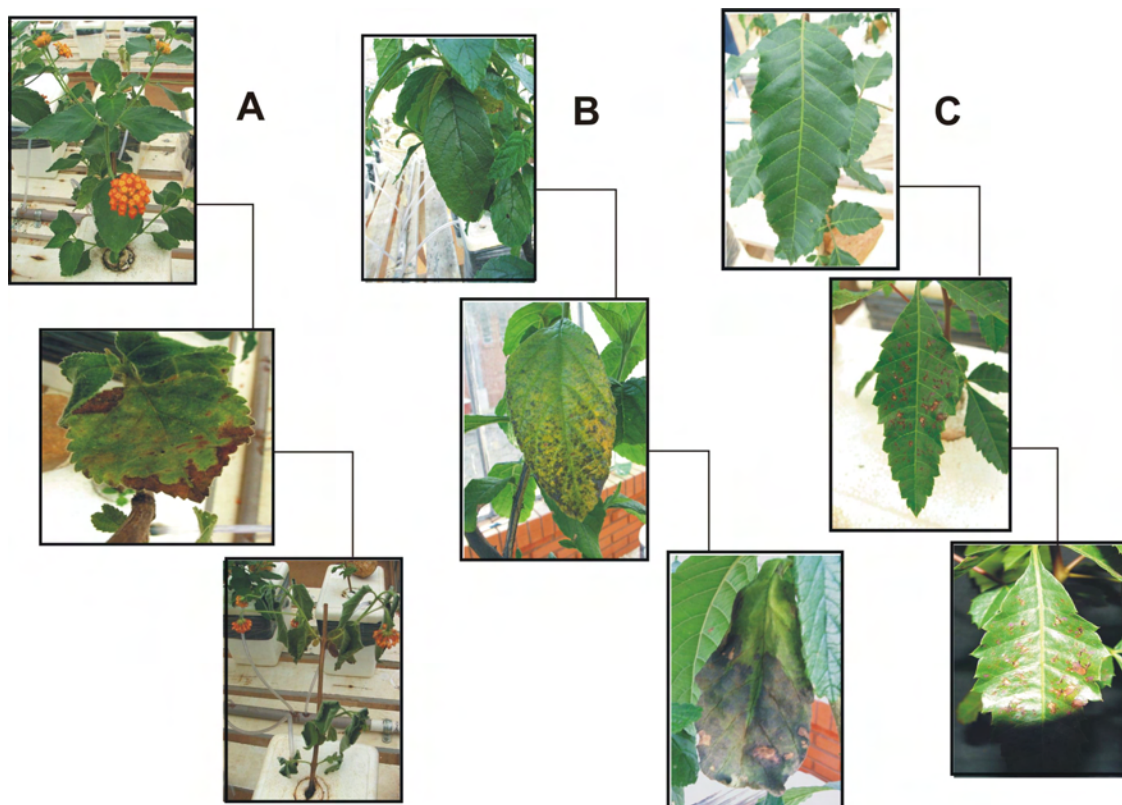


Figura 3: Injúrias foliares em plantas expostas a 2,0 mM de Fe-EDTA. Em **A-** *Lantana tiliaefolia*, **B-** *Cordia curassavica* e **C-** *Schinus terebinthifolius*.

- Teor de pigmentos

O teor de pigmentos variou de acordo com a espécie estudada. As maiores reduções foram observadas nas plantas expostas às maiores concentrações de Fe-EDTA (1,5 e 2,0mM) como pode ser observado na Figura 4.

Nas espécies avaliadas os teores de clorofila *a*, *b* e carotenóides encontrados nas plantas expostas a 1,5 e 2,0mM de óxido de ferro II foram os mais afetados e significativamente inferiores aos encontrados nas plantas controle. A maior parte do ferro absorvido pelas plantas fica armazenado nos cloroplastos. Os efeitos deletérios causados por seu excesso ocorrem primariamente nessas organelas, afetando a fotossíntese (Suh *et al.*, 2002).

Com o aumento da concentração de ferro na solução nutritiva, os teores de pigmentos foram reduzidos em todas as espécies estudadas. Neves (2004)

encontrou resultados similares em plantas de *Eugenia uniflora* (Myrtaceae) cultivadas em solução nutritiva com ferro. De modo similar, folhas maduras de plantas de *C. hilariana* que se desenvolviam em solução nutritiva com diferentes concentrações de Fe-EDTA também apresentaram redução no teor de pigmentos (Pereira, 2006).

As diferenças no teor de pigmentos das três espécies estudadas estão relacionadas possivelmente com as características da espécie e com a forma como estas respondem aos efeitos da poluição ambiental (Monni *et al.* 2001; Prusty *et al.* 2005).

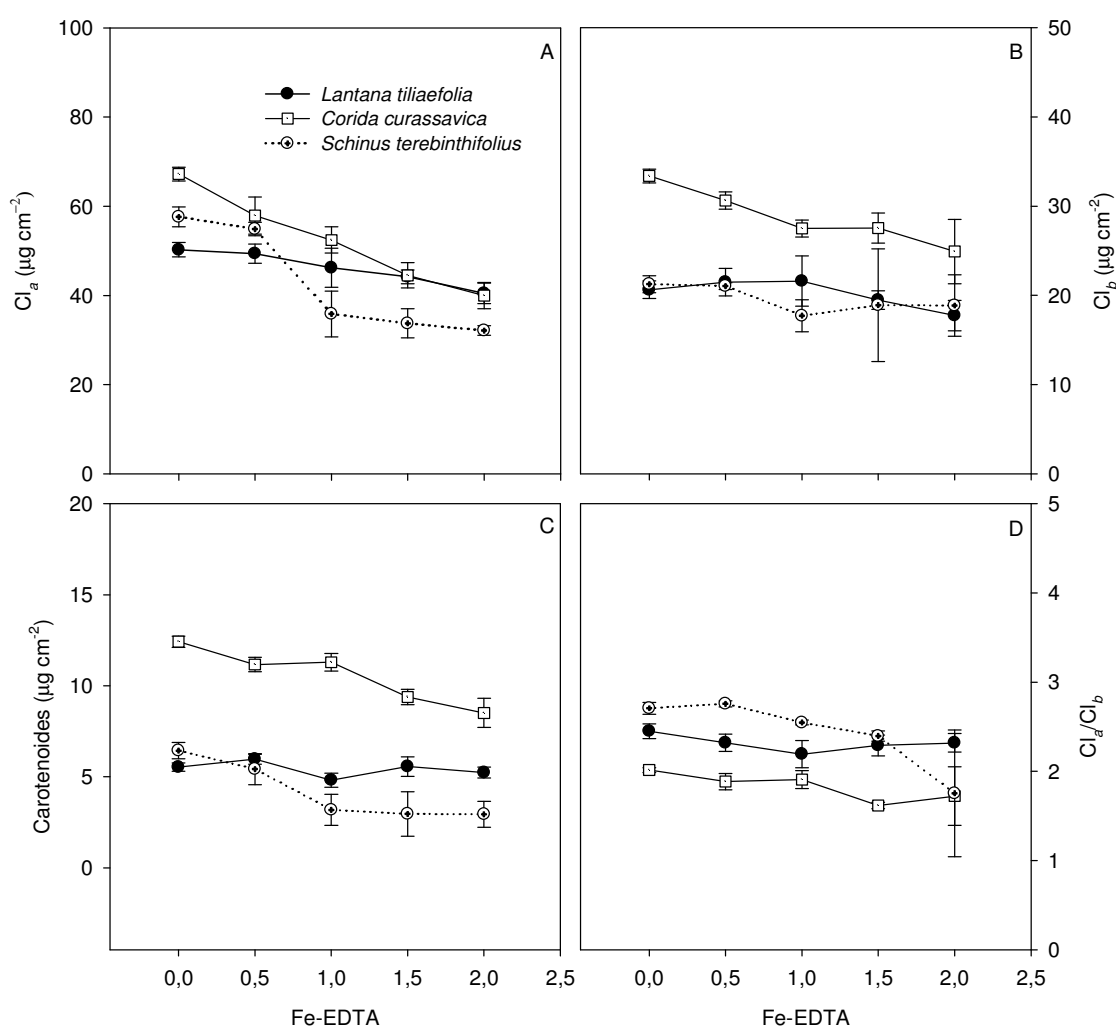


Figura 4: Clorofila *a* (Cl_a), *b* (Cl_b), carotenóides e razão Cl_a/Cl_b em plantas de *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* e *S. terebinthifolius* cultivadas em solução nutritiva de Hoagland & Arnon à meia força iônica com diferentes concentrações de Fe^{2+} (Fe-EDTA). Cada ponto representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão.

- Fluorescência da clorofila *a*

Os efeitos das diferentes concentrações de ferro na fluorescência da clorofila *a* (Fv/Fm), da taxa de transporte de elétrons (ETR) e da dissipação não fotoquímica (NPQ) apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos das espécies avaliadas (Figura 5).

A razão Fv/Fm é um importante indicador da estimativa quântica do PSII (Björkman & Demmig, 1987) que, independentemente da espécie avaliada, diminuiu com o aumento na concentração de ferro na solução de cultivo. Os maiores valores foram de 0,836 para as plantas do tratamento 0mM e os menores 0,711 para aquelas expostas a 2,0mM de Fe-EDTA. As reduções na razão Fv/Fm são associadas a danos no complexo coletor de luz e aos centros de reação do PSII (Demmig-Adams, 1989; Adams *et al.*, 1994) causados pela redução nos teores de clorofila *a* devido ao excesso de ferro (Figura 4).

Em condições de alta irradiância a planta dissipa o excesso de energia ativando o ciclo das xantofilas (Muller *et al.*, 2001) que tem como função a defesa da planta a um fotodano. O aumento observado no NPQ pode ser um ajuste para manutenção do fluxo normal de elétrons no fotossistema II nestas espécies (Malkin & Nyiogi, 2000), uma vez que o Ciclo de Calvin não estaria consumindo o NADPH produzido. Assim, se o consumo via ciclo for reduzido, o fluxo de elétrons será inibido com conseqüente redução na ETR.

Plantas de *L. tiliaefolia* e *S. terebinthifolius* expostas a concentrações superiores a 1,0 mM de Fe-EDTA apresentaram redução na ETR e aumentos no NPQ. As reduções no ETR e os aumentos no NPQ sugerem que a maior parte da energia de excitação esteja sendo dissipada em processos não fotoquímicos (Maxwell & Jonhson, 2000) possivelmente devido aos efeitos do ferro no metabolismo celular.

Em *C. curassavica*, entretanto, os valores de ETR e NPQ encontrados indicam que o ferro aparentemente está sendo benéfico para o ETR, reduzindo a dissipação não fotoquímica (NPQ) não indicando dano ao centro de reação do PSII (Adams *et al.*, 1994; Demmig-Adams *et al.*, 1996).

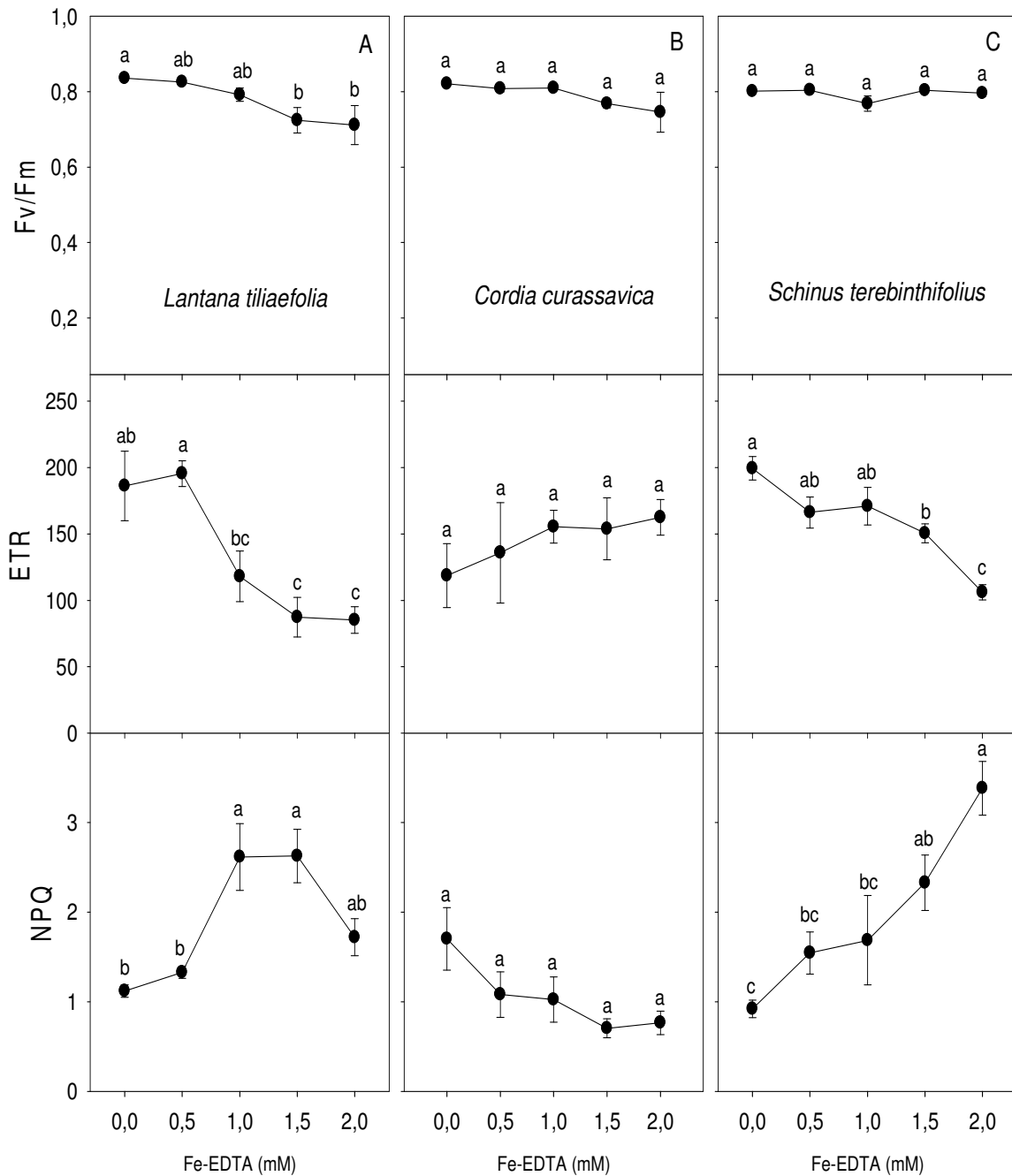


Figura 5: Efeito de diferentes tratamentos de Fe-EDTA (0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0mM) na fluorescência da clorofila *a* (Fv/Fm), na taxa de transporte de elétrons (ETR) e na dissipação não fotoquímica (NPQ) de *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* (B) e *S. terebinthifolius* (C) cultivadas em solução hidropônica de Hoagland & Arnon a meia força iônica e pH 5,3. Cada ponto representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão.

Nas espécies estudadas não foi possível verificar através dos parâmetros avaliados se o aumento na concentração de ferro na solução nutritiva causou fotoinibição ou outro tipo de dano aos complexos coletores de luz, como degradação da proteína D1. Em ambientes de alta irradiância as folhas normalmente absorvem mais fótons do que a capacidade de utilização nos processos fotossintéticos. Em situações de estresse a utilização da energia de excitação através da cadeia de transporte de elétrons é limitada e a redução na eficiência quântica do PSII torna-se mais expressiva por um longo período (Demming-Adams *et al.*, 1996).

- Trocas gasosas

As trocas gasosas decresceram gradualmente nas plantas expostas as maiores concentrações de Fe-EDTA, sendo as mais afetadas aquelas expostas a 2mM, independentemente da espécie. Foram observadas reduções significativas na taxa fotossintética (A), na taxa transpiratória (E), na condutância estomática (g_s) e aumento na relação entre a concentração interna e externa de CO_2 (C_i/C_a) conforme Figura 6.

Os valores de trocas gasosas, apresentados a seguir, corroboram os resultados encontrados para o teor de pigmentos das plantas expostas ao Fe-EDTA (Figura 4).

Em geral, observou-se em todas as plantas expostas ao Fe-EDTA, independentemente da espécie, redução significativa em A . Em relação ao controle, as reduções das plantas expostas a maior concentração de Fe-EDTA (2,0mM) foram da ordem de aproximadamente 74, 90 e 80% em *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* e *S. terebinthifolium*, respectivamente.

A absorção e acúmulo de ferro nas folhas das espécies estudadas foram potencializados pelo pH da solução de cultivo, alcançando valores próximos a 1mg gms^{-1} (Figura 1), quase duas vezes maior que o nível considerado fitotóxico (Marschner, 1995). Altos níveis de ferro nas células podem gerar estresse oxidativo, com o aumento na formação de espécies reativas de oxigênio podendo levar a redução na atividade enzimática (Schutzendubel & Polle, 2002) e comprometer o processo fotossintético.

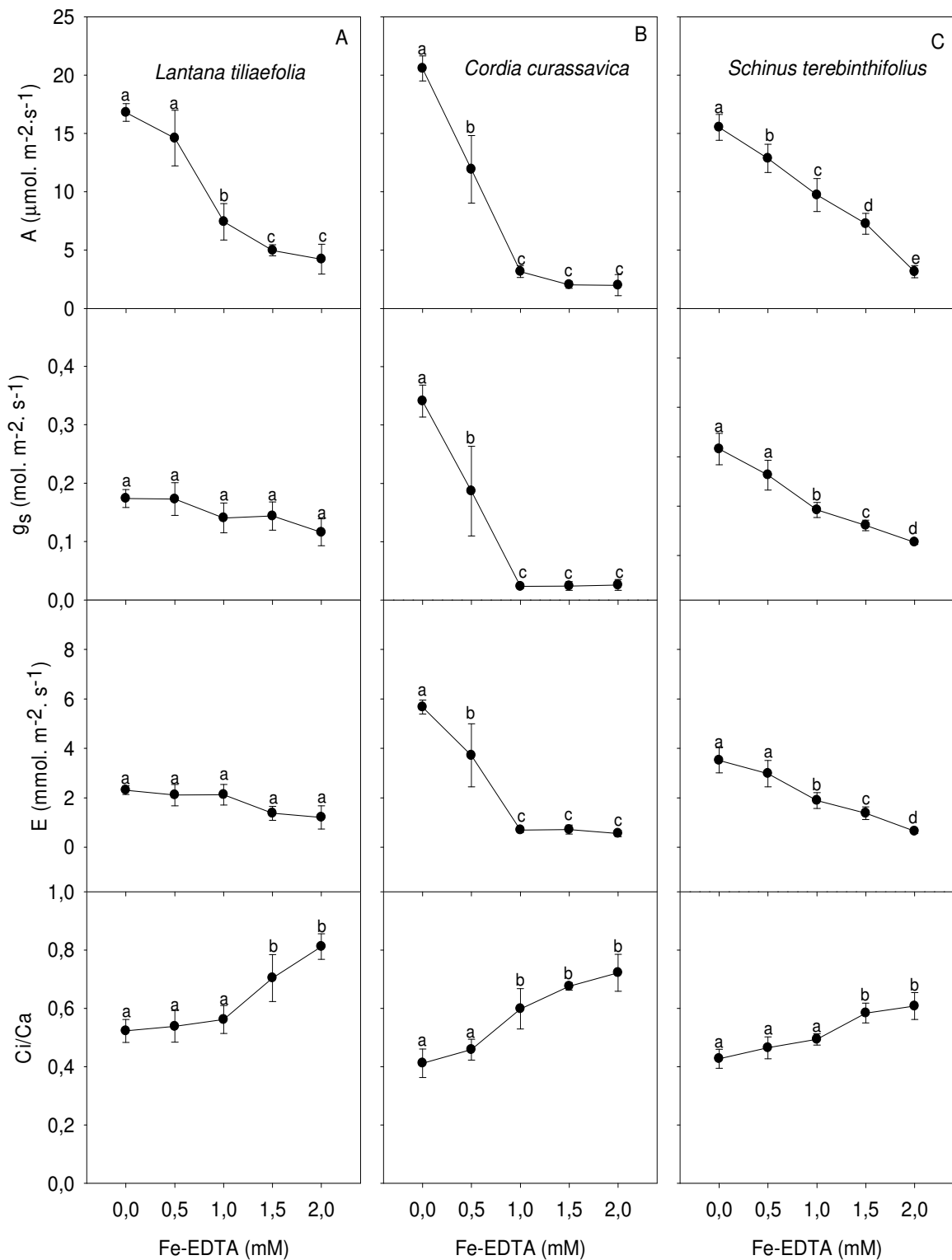


Figura 6: Efeito de diferentes tratamentos de Fe-EDTA (0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0mM) nas trocas gasosas de *L. tiliaefolia* (A), *C. curassavica* (B) e *S. terebinthifolius* (C) cultivadas em solução hidropônica de Hoagland & Arnon a meia força iônica e pH 5,3. Cada ponto representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão.

Reduções significativas foram observadas para g_s e E nos tratamentos expostos ao Fe-EDTA. A relação Ci/Ca das plantas tratadas com Fe-EDTA apresentou aumento significativo, sendo de até 40% em relação ao controle. Nas concentrações $\leq 0,5\text{mM}$ não ocorreram reduções significativas em A , g_s , E nem na relação Ci/Ca independentemente da espécie avaliada.

A maior absorção e acúmulo de ferro nas folhas das plantas avaliadas pode ter sido potencializada pelo menor controle na homeostase do ferro sendo os valores acumulados próximos a 1mg gms^{-1} exceto em *S. terebinthifolius*, que acumulou valores quase duas vezes menores (Figura 1). Mesmo acumulando menos ferro nos tecidos, a queda na taxa fotossintética em *S. terebinthifolius* foi similar a das outras espécies avaliadas (Figura 6).

A redução observada em A e o aumento na relação Ci/Ca deve-se a alta concentração de ferro na solução de cultivo que em baixo pH torna-se bio-disponível para absorção (Becana *et al.*, 1998; Hell & Stephan, 2003) e, quando em excesso, torna-se tóxico para as plantas (Fageria *et al.*, 1990; Briat & Lobréaux, 1997).

Os aumentos observados na relação Ci/Ca das plantas expostas ao Fe-EDTA podem estar associados à inibição da capacidade de redução do carbono no ciclo de Calvin. A manutenção da Ci/Ca elevada mesmo com a baixa condutância estomática é um indicativo de que o ferro além de causar danos no sistema radicular promoveu limitações no processo de fixação do CO_2 . Padrão similar de resposta foi detectado em *E. uniflora* por Neves *et al.* (2009), atribuindo-se, em parte, ao estresse oxidativo decorrente do excesso de ferro no tecido foliar.

- Fenologia reprodutiva

Os resultados observados indicam que, de modo geral, as espécies que cresceram na solução com ferro apresentaram alterações na produção de flores e frutos, entretanto, as respostas variaram com a espécie estudada. Nas maiores concentrações de ferro, plantas de *C. curassavica* e *S. terebinthofolius* não produziram flores e frutos ao passo que em *L. tiliaefolia* a produção de

flores e frutos cresceu nas plantas à medida que a concentração de ferro aumentava na solução de cultivo (Figura 7).

As avaliações fenológicas em *L. tiliaefolia* indicaram que a produção de flores e frutos aumentou com o aumento da concentração de ferro na solução de cultivo. Por outro lado, não foram observados frutos nas plantas cultivadas em 2,0mM de Fe-EDTA devido à morte das plantas causada pelos efeitos tóxicos do ferro no interior celular e pela formação de placas nas raízes, impedindo a absorção de nutrientes (Figura 7A).

Estudos indicam que os efeitos tóxicos do ferro podem afetar o metabolismo vegetal diminuindo o acúmulo de reservas das plantas expostas a elevadas concentrações além de promover a formação de placas que cobrem as raízes impedindo a absorção de nutrientes e tornando-as quebradiças (Smolders & Roelofs, 1996; Armstrong *et al.*, 1996; Van der Welle *et al.*, 2007), como observado no presente estudo.

Em plantas de *C. curassavica* e *S. terebinthifolius* a produção de flores e frutos reduziu com o aumento da concentração de ferro na solução de cultivo, principalmente nos tratamentos com concentração de ferro superior a 1,0mM. A toxidez causada por elementos traço depende da sensibilidade da espécie e das condições ambientais (Narayan *et al.*, 1994). O estresse causado pela poluição pode limitar o desenvolvimento ou a reprodução de espécies mais sensíveis, enquanto as tolerantes vão conseguir sobreviver (Saikkonen *et al.*, 1998; Brun *et al.*, 2003), levando a mudanças competitivas na vegetação e alterando a composição da comunidade vegetal (Ryser & Sauder, 2006).

As reduções no crescimento e o aparecimento de manchas foliares podem ser decorrentes da formação de placas de ferro na raiz e redução da taxa (Smolders *et al.*, 1995; Lamers *et al.*, 1998; Zang *et al.*, 1999; Silva, 2003; Pereira 2006).

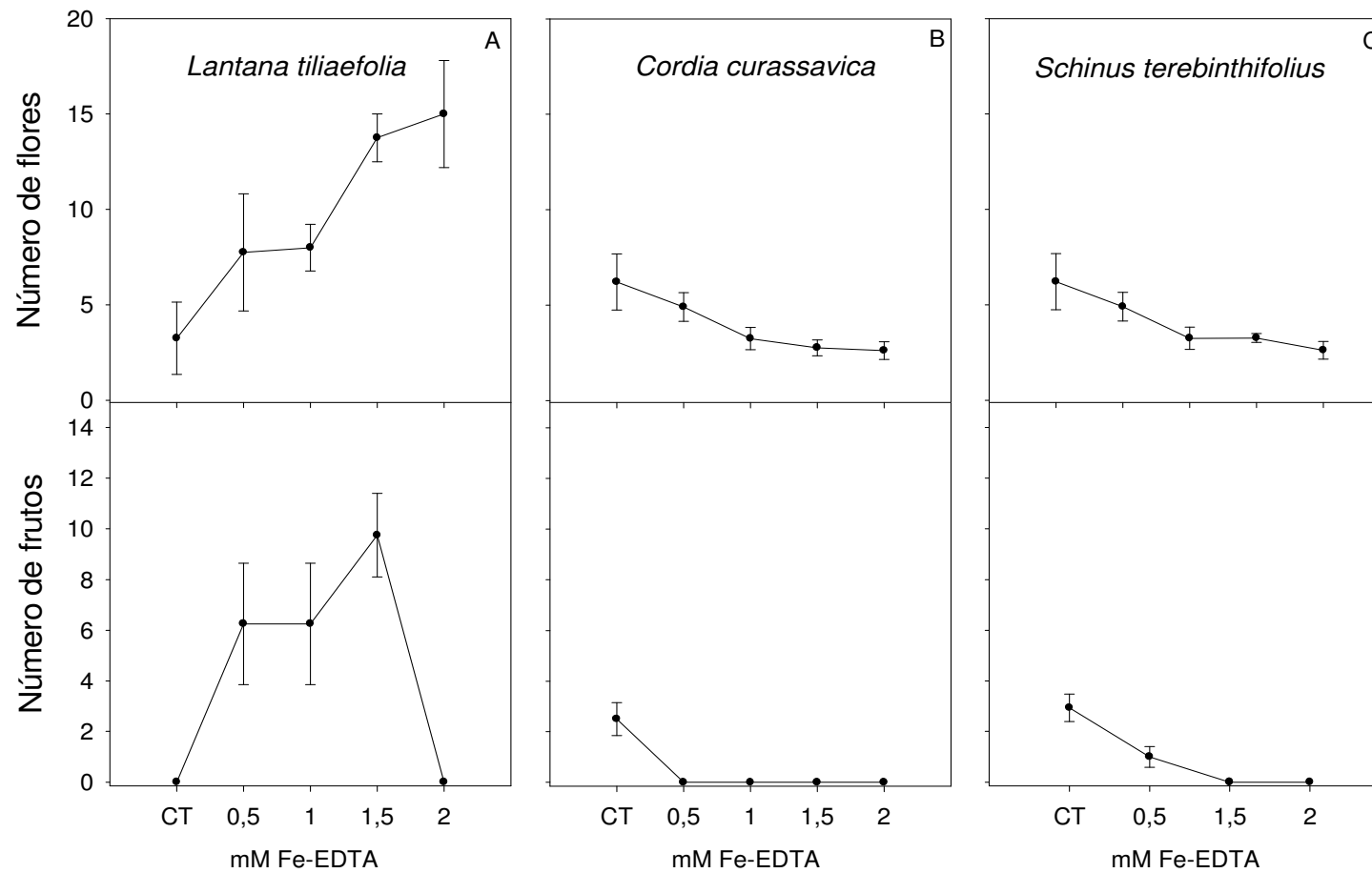


Figura 7: Número de flores e frutos produzidos em plantas de *L. tiliaefolia* (A), *C. curassavica*(B) e *S. terebinthifolius* (C) em solução hidropônica de Hoagland & Arnon a meia força iônica e pH 5,3 em diferentes concentrações de Fe²⁺ (Fe-EDTA). Cada ponto representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão.

- Biomassa vegetal

As espécies estudadas sofreram redução na biomassa de raízes, folhas e na área foliar. O incremento na biomassa das plantas submetidas às diferentes concentrações de Fe-EDTA foi significativamente inferior ao das plantas não expostas, independentemente da espécie, conforme Figura 8.

A biomassa de raízes reduziu significativamente com o aumento do ferro na solução de cultivo em todas as espécies avaliadas, sendo as maiores reduções observadas na maior concentração (2,0mM). Nesta concentração, as maiores reduções foram de aproximadamente 80, 60 e 85% para *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* e *S. terebinthifolius*, respectivamente.

A redução na biomassa das espécies avaliadas é um dos sintomas mais freqüentes de estresse ambiental em plantas. O ferro em altas concentrações é fitotóxico e geralmente causa efeitos deletérios ou inibitórios em plantas por desencadear a formação de espécies reativas de oxigênio que podem causar restrições ao desenvolvimento vegetal (Price & Hendry, 1991).

A biomassa foliar reduziu com o aumento do ferro na solução de cultivo em todas as espécies avaliadas. Foram observadas diferenças significativas entre plantas controle (0mM) e os tratamentos (Figura 8). Nas plantas expostas a 2,0mM de Fe-EDTA as reduções observadas em relação às plantas controle foram de aproximadamente 83, 54 e 82% para *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* e *S. terebinthifolius*, respectivamente. Diferentes autores (Brum *et al.*, 2003; Chauan *et al.*, 2004; Kuki *et al.*, 2009) relatam que em condições de elevada poluição, o desenvolvimento e a produtividade vegetal podem ser reduzidos.

A área foliar das plantas expostas ao Fe-EDTA reduziu à medida que se aumentava a concentração de Fe-EDTA na solução de cultivo. Entre as plantas controle (0mM) e aquelas que cresciam em solução com 2,0mM foram observadas reduções de 70, 60 e 85% para a biomassa de raízes, folhas e área foliar, respectivamente.

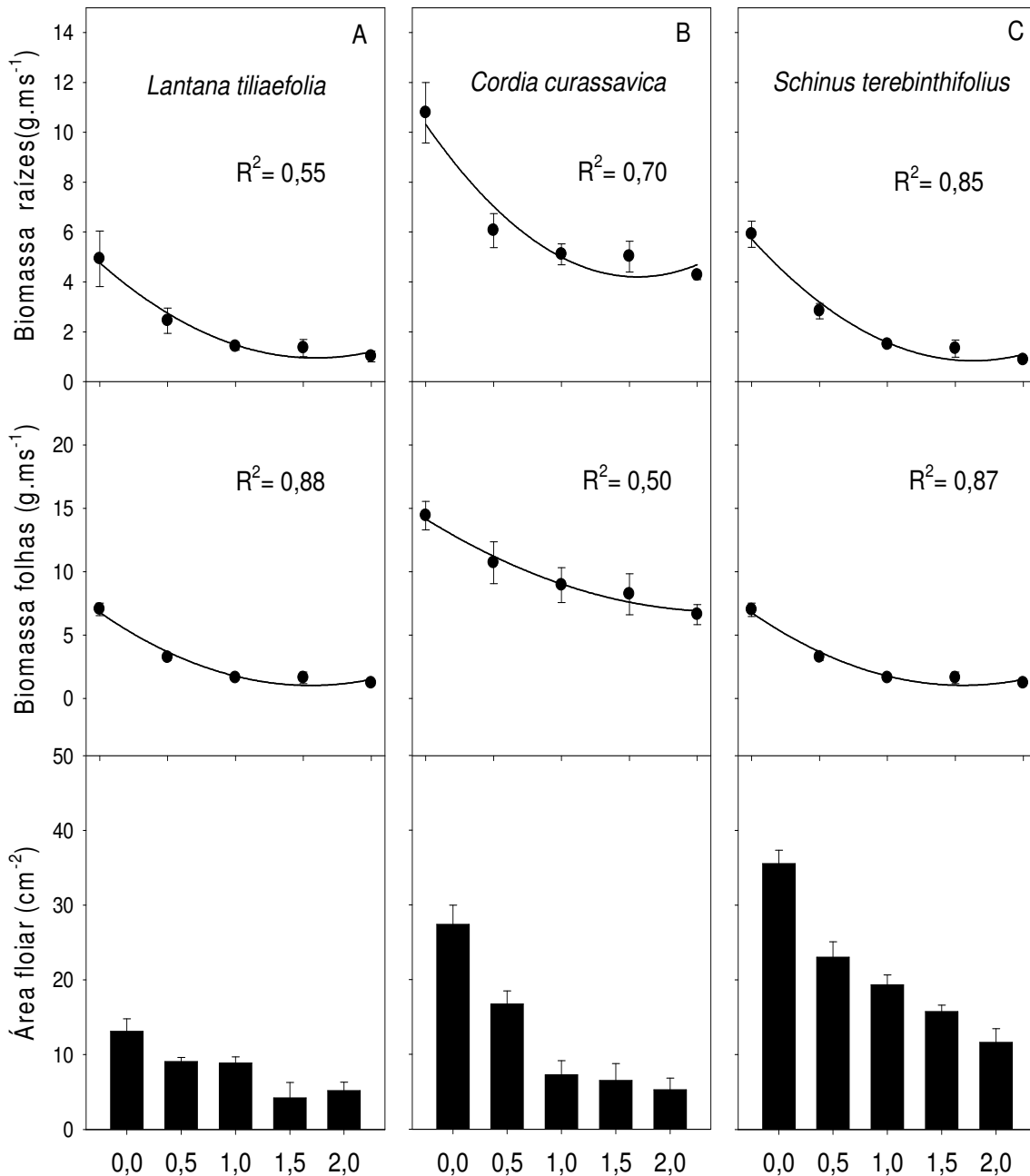


Figura 8: Biomassa de raízes, folhas e área foliar de plantas de *L. tiliaefolia* (A), *C. curassavica* (B) e *S. terebinthifolius* (C) submetidas a diferentes concentrações de Fe-EDTA. Cada ponto representa a média de cinco repetições e as barras o erro padrão. Os dados foram submetidos à análise de regressão apresentando modelo quadrático para todas as espécies. Para biomassa de raízes: $y = 4,7957x + 1,5061x^2 + 4,7653$; $y = -9,3003x + x^2 + 10,4446$; $y = -5,9977x + 1,8403x^2 + 5,7232$. Para biomassa de folhas: $y = -7,4108x + 2,3839x^2 + 6,7909$; $y = -9,9301x + 3,5485x^2 + 14,3937$; $y = -7,3617x + 2,3645x^2 + 6,7707$ para *L. tiliaefolia*, *C. curassavica* e *S. terebinthifolius*, respectivamente.

Em todas as espécies avaliadas, a queda na biomassa de raízes, da parte aérea e na área foliar pode ser também em decorrência da redução observada nas trocas gasosas nas plantas expostas ao Fe-EDTA (Figura 6), resultando em menor produção de fotoassimilados. Efeitos similares são constatados por diferentes autores ao estudarem os efeitos restritivos impostos pelo excesso de ferro na biomassa e produção de diferentes espécies (Nikolic & Kastori, 2000; Li *et al.*, 2001; Goos *et al.*, 2004; Chatterjee *et al.*, 2006). Se fossem considerados os sintomas observados e as reduções na biomassa, a exposição ao ferro por um período maior resultaria na morte das plantas, sobretudo daquelas cultivadas em solução com 2,0mM de Fe-EDTA.

A tolerância de algumas espécies aos metais pesados é definida como a habilidade para sobreviver em ambientes com concentrações tóxicas destes elementos (Tilstone & Macnair, 1997). Dependendo da espécie vegetal, a tolerância a metais pode ser resultado de duas estratégias básicas: a exclusão e a acumulação nos tecidos.

A estratégia de exclusão consiste na restrição do transporte do metal para o interior da planta, que pode ser utilizada na revegetação de áreas degradadas e em processos de fitoestabilização do metal para formas menos tóxicas. A estratégia de acumulação consiste na concentração de metais nos tecidos vegetais (fitoextração), o que requer ajustes fisiológicos altamente especializados (Dahmani-Muller *et al.*, 2000). *L. tiliaefolia* acumulou elevadas concentrações de ferro em suas folhas podendo ser considerada uma possível fitoextratora deste metal quando comparada as outras espécies estudadas.

O efeito negativo das altas concentrações de ferro aplicadas às 3 espécies estudadas é visível na Figura 9, onde é possível observar o declínio do desenvolvimento tanto da parte aérea como do sistema radicular.

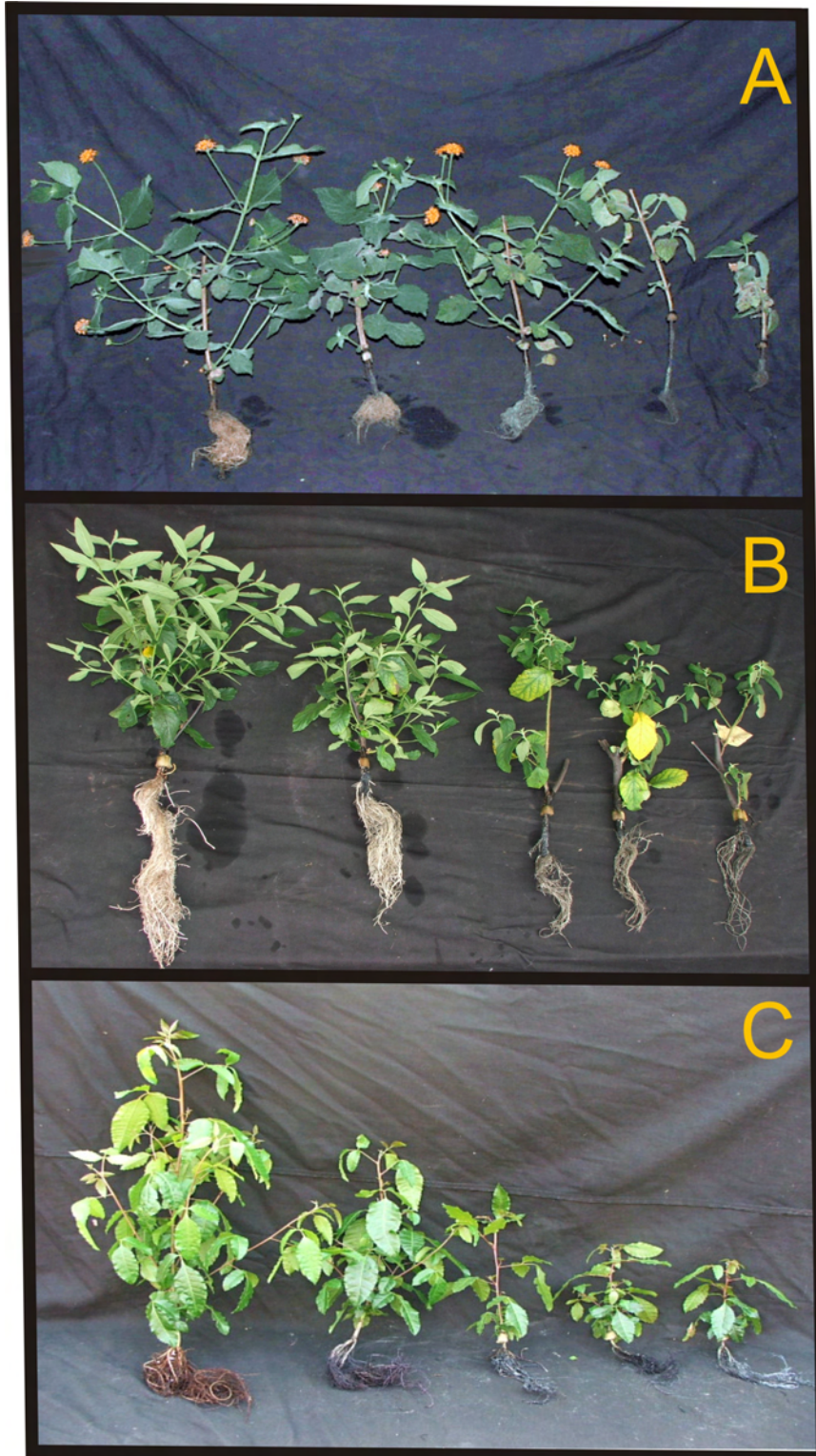


Figura 9: Espécies submetidas às diferentes concentrações de Fe-EDTA. Em A (*Lantana tiliaefolia*), B (*Cordia curassavica*) e C (*Schinus terebinthifolius*). Da esquerda para a direita, plantas com 0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0mM de Fe-EDTA.

4. Conclusões

As plantas utilizadas neste experimento, independentemente da espécie, apresentam reduções significativas em muitos parâmetros avaliados.

A produção de flores e frutos é afetada em todas as espécies submetidas ao ferro na solução de cultivo principalmente na concentração de 2,0mM.

Observa-se também aumento no número de lesões foliares e reduções nos parâmetros de fotossíntese e no teor de pigmentos. Também foi observado, nas plantas expostas ao Fe-EDTA, redução nos parâmetros de crescimento e produção de biomassa.

Lantana tiliaefolia apresentou o maior acúmulo de ferro nos tecidos, principalmente na concentração de 2,0mM. Por outro lado, *S. terebinthifolius* apresenta mecanismos que controlam a absorção de ferro, podendo ser utilizada no repovoamento de áreas contaminadas pela atividade mineradora de ferro.

Em um ambiente afetado por este tipo de poluição é possível que as espécies estudadas possam, ao longo do tempo, desaparecerem ou ter sua diversidade alterada. Estas espécies podem ser usadas como organismos indicadores de poluição por ferro.

Experimentos de dose-resposta são ferramentas importantes em estudos para verificar os efeitos dos poluentes sobre as plantas, uma vez que possibilitam estabelecer uma relação inequívoca entre a sintomatologia observada e o fator de estresse.

Assim, pelo exposto, a continuidade de pesquisas envolvendo essas plantas, com objetivos específicos de bioindicação ou biomonitoramento, torna-se promissora, podendo contribuir com informações necessárias para estudos de impacto ambiental e/ou de recuperação de áreas degradadas.

5. Referências

ADAMS III, W. W.; DEMMING-ADAMS, B.; VERHOEVEN, A. S.; BARKER, D. H. (1994) Photoinhibition during winter stress: involvement of sustained xanthophyll cycle-dependent energy dissipation. **Australian Journal of Plant Physiology**. 22: 261-276

ALVES, V. (2001) **Análise dos efeitos dos poluentes de fábrica de cimento em plantas bioindicadoras: *Nicotiana tabacum* L. (Solanaceae) e *Zinnia elegans* Cav. (Asteraceae)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ARMSTRONG J, AFREEN-ZOBAYED F, ARMSTRONG W. (1996) Phragmites die-back: sulphide- and acetic acid induced bud and root death, lignifications, and blockages within aeration and vascular systems. **New Phytologist**. 34: 601-614

BECANA M, MORAN JF, ITURBE-ORMAETXE I (1998) Iron-dependent oxygen free radical generation in plants subjected to environmental stress: toxicity and antioxidant protection. **Plant and Soil**. 201: 137-147

BJÖRKMAN O, DEMMIG B (1987) Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77K amongst vascular plants of diverse origins. **Planta**. 170: 489-504

BRIAT JF, LOBRÉAUX S (1997) Iron transport and storage in plants. Trends in **Plant Science**. 2:187-193

BRUN LA, LE CORFF J. & MAILLET, J (2003) Effects of elevated soil copper on phenology, growth and reproduction of five ruderal plant species. **Environmental Pollution**. 122: 361-368

CHATTERJEE, C, GOPAL, R, DUBE, BK (2006) Impact of iron stress on biomass, yield, metabolism and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). **Scientia Horticulturae**. 108: 1-6

CHAUAN, S. V.; CHAURASIA, B.; RANA, A. (2004) Impact of air pollution on floral morphology of *Cassia siamea* Lamk. **Journal of Environmental Biology**. 25: 291-297

DAHMANI-MULLER H, VAN OORT F, GÉLIE B, BALABANE M (2000) Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. **Environmental Pollution**. 109: 231-238

DEMMIG-ADAMS B, ADAMS WIII, BARKER DH, LOGAN BA, BOWLING DR, VERHOEVEN AS (1996). Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation. **Physiologia Plantarum**. 98: 253-264

DEMMIG-ADAMS, B.; WINTER, K.; KRÜGER, A.; CZYGAN, F. C. (1989) Light response of CO₂ assimilation, dissipation of excess excitation energy, and zeaxanthin content of sun and shade leaves. **Plant Physiology**. 90: 881-886

EMBERSON, L. D.; ASHMORE, M. R.; MURRAY, F.; KUYLENSTIERNA, J. C. I.; PERCY, K. E.; IZUTA, T.; ZHENG, Y.; SHIMIZU, H.; SHEU, B. H.; LIU, C. P.; AGRAWAL, M.; WAHID, A.; ABDEL-LATIF, N. M.; VAN TIENHOVEN, M.; BAUER, DE L. I. & DOMINGOS, M. (2001) Impacts of air pollutants on vegetation in developing countries. **Water, Air & Soil Pollution**. 130: 107-118

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. United States (1996) Air quality criteria for particulate matter. EPA Report No. EPA/ 600/P-95/001aFaF-Cf, vol. 3. National Center for Environmental Assessment-RTP Office, Research Triangle Park (NC)

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; WRIGHT, R. J. (1990) Iron nutrition of plants: an overview on the chemistry and physiology of its deficiency and toxicity. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 25: 553-570

FURLANI, A. M. C. (2004) Nutrição mineral. In: KERBAUY, GB., Ed. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro, Guanabara-Koogan. 380p.

GOOS, R. J.; JOHNSON, B.; HARGROVE, G. (2004) Greenhouse evaluation of controlled release iron fertilizer for soybean. **Journal of Plant Nutrition**. 27: 43-55

GRANTZ, D. A., GARNER, J. H. B. & JOHNSON, D. W. (2003) Ecological effects of particulate matter. **Environmental International**. 29: 213- 239

HELL, R. & STEPHAN. U. W. (2003) Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. **Planta**. 216: 541-551

HOAGLAND, D. R. & ARNON, D. I. (1938) **The method for growing plants without soil: water-culture**. Berkeley: Univ. of California, 32p. Circular of the Agricultural Experimentation Station

HOWELER, R. H (1973) Iron- induced orange disease of rice in relation to physico-chemical changes in flooded oxisol. **Soil Science Society of American Proceedings**. 37: 898-903

INNES, J. L. (1995) Influence of air pollution on the foliar nutrition of conifers in great britain. **Environmental Pollution**. 88: 183-192

IVES, A. R. & CARDINALE, B. J. (2004) Food-web interactions govern the resistance of communities after non-random extinctions. **Nature**. 429: 174-177

KAMPFENKEL, K.; MONTAGU, M. V.; INZÉ, D. (1995) Effects of Iron Excess on *Nicotiana glauca* Plants: Implications to Oxidative Stress. **Plant Physiology**. 107: 725-735

KLUMPP, A, DOMINGOS, M, KLUMPP, G (2002) Foliar nutrient contents in tree species of the Atlantic Forest as influenced by air pollution from the industrial complex of Cubatão, SE-Brazil. **Water, Air & Soil Pollution**. 133: 315-333

KUKI, N. K.; OLIVA, M. A.; PEREIRA, E. G. (2008) Effects of simulated deposition of acid mist and iron ore particulate matter on photosynthesis and the generation of

oxidative stress in *Schinus terebinthifolius* Radii and *Sophora tomentosa* L. **Science of the Total Environment**. 403: 207–214

LAMERS LPM, TOMASSEN HBM, ROELOFS JGM (1998) Sulfate-induced eutrophication and phytotoxicity in freshwater wetlands. **Environmental Science Technology**. 32:199-205

LAMERS, L. P. M.; LOEB, R.; ANTHEUNISSE, A. M.; MILETTO, M.; LUCASSEN, E. C. H. E. T.; BOXMAN, A. W.; SMOLDERS, A. J. P.; ROELOFS, J. G. M. (2006) Biogeochemical constraints on the ecological rehabilitation of wetland vegetation in river floodplains. **Hydrobiologia**. 565: 165-186

LARCHER, W. (2000) **Ecofisiologia vegetal**. RiMa Artes e Textos, São Carlos, 531p.

LI, H.; YANG, X.; LOU, A. (2001) Ameliorating effect of potassium on iron toxicity in hybrid rice. **Journal of Plant Nutrition**. 24: 1849-1860

MALKIN, R. & NYIOGI, K. (2000) **Photosynthesis**. In.: Buchanan, B. B.; Gruissem, W. Society of Plant Biologists, Monona Drive, Rockville, USA, p. 568-628.

MARSCHNER, H. (1995) **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press, London. Second ed. 889p.

MAXWELL, K. & JOHNSON, G. N. (2000) Chlorophyll fluorescence— a practical guide. **Journal of Experimental Botany**. 51: 659-668

McFARLANE, D. J.; WILLIAMSON, D. R. (2002) An overview of water logging and salinity in southwestern Australia as related to the “Ucarro” experimental catchment. **Agricultural Water Management**. 53: 5-29

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Gênese, 2000, 174p.

MONNI, S.; UHLIG, C.; HANSEN, E.; MAGEL, E. (2001) Ecophysiological responses of *Empetrum nigrum* to heavy metal pollution. **Environmental Pollution**. 112: 121-129

MÜLLER, P.; LI, X-P; NIYIGI, K. K. (2001) Non-photochemical quenching. A response to excess light energy. **Plant Physiology**. 125: 1558-1566

NARAYAN, D.; AGRAWAL, M.; PANDEY, J. & SINGH, J. (1994) Changes in vegetation characteristics downwind of an aluminum factory in India. **Annals of Botany**. 73: 557-565

NEVES, N. R. (2004) **Fotossíntese e estresse oxidativo em plantas de *Eugenia uniflora* L. submetidas ao excesso de ferro particulado e chuva ácida**. Dissertação de Mestrado em Fisiologia Vegetal, UFV 45p.

NEVES, N. R.; OLIVA, M. A.; CENTENO, D. da C.; COSTA, A. C.; RIBAS, R. F. ; PEREIRA, E. G. (2009). 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** 407: 3740-3745

NIKOLIC, M. & KASTORI, R. (2000) Effect of bicarbonate and Fe supply on Fe nutrition of grapevine. **Journal of Plant Nutrition**. 23: 1619-1627

OLIVEIRA, C. R. M. de; OLIVA, M. A.; PEREIRA, E. G. (2007) Efeito do Material Particulado de Ferro no Teor de Pigmentos de *Schinus terebinthifolius* Raddi. **Revista Brasileira de Biociências**. 5: 681-683

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

PEREIRA, E. G. (2006) **Efeitos fisiológicos e bioquímicos causados pela deposição de ferro particulado em *Clusia hilariana*, uma espécie CAM de restinga**. Dissertação de Mestrado em Fisiologia Vegetal, UFV, 71p.

PRICE, A. H. & HENDRY, G. A. F. (1991) Iron-catalysed oxygen radical formation and its possible contribution to drought damage in nine native grasses and three cereals. **Plant Cell Environmental**. 13: 491-498

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

RHOADS, F. M. (1971) Relations between Fe in irrigation water and leaf quality of cigar wrapper tobacco. **Agronomy Journal**. 63: 938-940

RYSER, P.; SAUDER, W. R. (2006) Effects of heavy-metal-contaminated soil on growth, phenology and biomass turnover of *Hieracium piloselloides*. **Environmental Pollution**. 140:52-61

SAIKKONEN, K., KOIVUNEN, S., VUORISALO, T., MUTIJAINEN, P., (1998) Interactive effects of pollination and heavy metals on resource allocation in *Potentilla anserina* L. **Ecology**. 79: 1620-1629

SALT, D. E.; SMITH, R. D., RASKIN, I. (1998) Phytoremediation. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. 49: 643-668

SANZ, M. J.; PEÑAS, G. S.; CALATAYUD, V.; GALLEGRO, M. T. & CERVERÓ, J. (2002) **La contaminación atmosférica de los bosques: guía para la identificación de daños visibles causados por ozono**. Ministério Del médio Ambiente, Madrid. España.

SCHÜTZENDÜBEL, A. & POLLE, A. (2002) Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by micorrhization. **Journal of Experimental Botany**. 53: 1351-1365

SILVA, L. C. (2003) **Avaliações bioquímicas, fisiológicas e anatômicas dos efeitos de poluentes atmosféricos sobre espécies vegetais de restinga**. Tese de doutorado em Fisiologia Vegetal, UFV, 109pg.

SMOLDERS, A. J. P.; NIJBOER, R. C.; ROELOFS, J. G. M. (1995) Prevention of sulphide accumulation and phosphate mobilization by the addition of iron (II) chloride to a reduced sediment: An enclosure experiment. **Freshwater Biology**. 343: 559-568

SMOLDERS, A. J. P.; ROELOFS, J. G. M. (1996) The roles of internal iron hydroxide precipitation, sulphide toxicity and oxidizing ability in the survival of *Stratiotes aloides* roots at different iron concentrations in sediment pore water. **New Phytologist**. 1332: 253-260

SUH, H.; KIM, C. S.; LEE, J.; JUNG, J. (2002) Photodynamic Effect of Iron Excess on Photosystem II Function in Pea Plants. **Photochemistry and Photobiology**. 75: 513-518

TILSTONE, G. H.; MACNAIR, M. R. (1997) Nickel tolerance and copper-nickel co-tolerance in *Mimulus guttatus* from copper mine and serpentine habitats. **Plant Soil**. 191: 173-180

VAN DER WELLE MEW, NIGGEBRUGGE K, LAMERS LPM, ROELOFS JGM (2007) Differential responses of the freshwater wetland species *Juncus effusus* L. and *Caltha palustris* L. to iron supply in sulfidic environments. **Environmental Pollution**. 147: 222-230

VANSUYT, G.; LOPEZ, FINZ, e´D.; BRIAT, J. F.; FOURCROY, P. (1997) Iron triggers a rapid induction of ascorbate peroxidase gene expression in *Brassica napus*. **FEBS Letters**. 410: 1195-2000

WELLBURN, A. R. (1994) The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**. 144: 307-313

WELLE, M. E. W. van der; NIGGEBRUGGE, K.; ROELOFS, J. G. M.; LAMERS, L. P. M. (2007) Differential responses of the freshwater wetland species *Juncus effusus* L. and *Caltha palustris* L. to iron supply in sulfidic environments. **Environmental Pollution**. 147: 222-230

ZHANG, X. K.; ZHANG, F. S.; MAO, D. R. (1999) Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.): phosphorus uptake. **Plant and Soil**. 209: 187-192

CONCLUSÕES GERAIS

No presente estudo, observou-se que o impacto das emissões provenientes da indústria mineradora de ferro e suas interações com as espécies de restinga são significativos. Os efeitos do material sólido particulado de ferro e da deposição úmida ácida puderam ser detectados nos diferentes parâmetros avaliados nas plantas estudadas.

Entre os aspectos ecológicos mais afetados pela ação conjunta da deposição ácida e de *MSPFe* nas espécies estudadas, o aparecimento de lesões nas folhas, a redução na produção de flores e frutos e as limitações a emergência de plântulas merecem destaque. As análises do índice de produção de frutos, conteúdo de ferro e enxofre na matéria seca corroboram os efeitos negativos dos poluentes na fenologia reprodutiva e estabelecimento inicial das espécies estudadas, podendo ser responsável pela redução na biodiversidade da vegetação de Restinga.

Nos experimentos realizados em ambiente semi-controlado foi possível observar que a maior parte dos danos estavam associados à produção de flores e frutos e à redução na produção de biomassa vegetal. As análises fisiológicas levam a concluir que a redução observada na fotossíntese, tanto no experimento com deposição de *MSPFe* como hidropônico, não é consequência direta de um componente difusional, mas, provavelmente de um componente metabólico. O *MSPFe* não causou danos as reações luminosas da fotossíntese. Foi observado fotoinibição aguda nas plantas do experimento com hidropônia. O Fe^{2+} aplicado em solução nutritiva promoveu a queda acentuada na produção de biomassa das espécies, sendo os danos mais severos em *L. tiliaefolia*.

O teor de pigmentos nas plantas do experimento em área de Restinga foi superior nas plantas localizadas na área exposta. Em ambiente semi-controlado as plantas expostas ao ferro, independentemente do tipo de aplicação (deposição ou hidroponia) resultou na redução do teor de pigmentos, especialmente clorofila *a*.

Muitos poluentes apresentam propriedades que podem alterar a composição do meio onde são depositados. Assim, a fenologia reprodutiva, a

anatomia foliar, a fisiologia e o metabolismo vegetal podem ser usadas como ferramentas, em conjunto ou associadas para avaliação e medição dos efeitos dos poluentes no ambiente, indicando como a espécie estudada responde, constituindo assim importante ferramenta em programas de biomonitoramento e avaliação de risco ecológico.

Espécies vegetais de ocorrência natural em áreas acometidas pela poluição ambiental podem ser usadas como bioindicadoras passivas ou ativas de estresse em programas de biomonitoramento da qualidade do ar. Em estudos de impacto ambiental o uso destes organismos pode fornecer informações acuradas acerca do grau de integridade do ambiente onde se encontram graças a sua capacidade de responder aos estímulos ambientais.

Assim, as técnicas empregadas nesta investigação bem como os resultados descritos podem auxiliar futuros estudos, fornecendo informações sobre o que está acontecendo com as espécies localizadas nas adjacências de áreas expostas a fontes emissoras de poluentes antropogênicos, podendo também ser uma ferramenta útil para a manutenção e preservação destes ambientes.