

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 26/02/2018.



unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



Acúmulo, distribuição e eliminação de ferro em três espécies vegetais do manguezal

HIULANA PEREIRA ARRIVABENE

Tese apresentada ao Instituto de
Biotecnologia, campus de Botucatu,
UNESP, para obtenção do título de
Doutor no Programa de Pós-Graduação
em Ciências Biológicas (Botânica), AC:
Morfologia e Diversidade Vegetal.

BOTUCATU-SP

2016



unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"Júlio de Mesquita Filho"
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS DE BOTUCATU

**Acúmulo, distribuição e eliminação de ferro em três espécies
vegetais do manguezal**

HIULANA PEREIRA ARRIVABENE

PROF^a DR^a SILVIA RODRIGUES MACHADO
ORIENTADORA

PROF^a DR^a CAMILLA ROZINDO DIAS MILANEZ
CO-ORIENTADORA

Tese apresentada ao Instituto de Biociências, campus de Botucatu, UNESP, para obtenção do título de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas (Botânica), AC: Morfologia e Diversidade Vegetal.

BOTUCATU-SP

2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA INFORM.
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CÂMPUS DE BOTUCATU - UNESP

BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: ROSEMEIRE APARECIDA VICENTE-CRB 8/5651

Arrivabene, Hiulana Pereira.

Acúmulo, distribuição e eliminação de ferro em três espécies vegetais do manguezal / Hiulana Pereira Arrivabene.
- Botucatu, 2016

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Biociências de Botucatu
Orientador: Silvia Rodrigues Machado
Coorientador: Camilla Rozindo Dias Milanez
Capes: 20300000

1. Poluição - Aspectos ambientais. 2. Ecologia dos manguezais. 3. Manguezais. 4. Toxicidade - Testes. 5. Glândula de Sal. 6. Ferro - Toxicologia. 7. Metais - Toxicologia.

Palavras-chave: Glândulas de sal; Histoquímica; Manguezal; Poluição por ferro; Ultraestrutura.

Dedicatória

*Aos meus amados pais,
Francisco Arrivabene e Maria Célia Pereira Arrivabene
e às minhas queridas irmãs,
Karen Pereira Arrivabene e Natália Pereira Arrivabene,
por todo o amor, dedico.*

Agradecimentos

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de doutorado concedida.

À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo auxílio financeiro cedido ao projeto (Proc. 2014/06870-0).

À Prof. Dra. Silvia Rodrigues Machado pela orientação, pela confiança depositada e por todos os ensinamentos transmitidos durante o desenvolvimento desse estudo.

À Prof. Dra. Camilla Rozindo Dias Milanez pela orientação e pelo incentivo constante. Sua ética profissional e pessoal é admirável e seu apoio foi fundamental à minha formação.

Ao Prof. Dr. Daniel Alberto Wunderlin, da Universidade Nacional de Córdoba/Argentina, pela orientação nas análises químicas e pela contribuição na discussão de dados.

Aos funcionários do Centro de Microscopia Eletrônica, IBB, UNESP, pela assistência e competência no processamento das amostras.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e à Universidade Federal do Espírito Santo pela infra-estrutura disponibilizada.

Aos professores, funcionários e alunos do Departamento de Botânica do IB/UNESP e do Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal da UFES pela convivência e pelos ensinamentos.

À querida Msc. Iara da Costa Souza pela contribuição e parceria nesse e nos demais estudos que temos realizado no ecossistema Manguezal.

À querida amiga Caroline Quenupe Campos pelo companheirismo e pela dedicação durante o cultivo das plantas e análises realizadas. Sua participação foi fundamental no desenvolvimento desse estudo.

Aos amigos Livia Dorsch Rocha, Luana Morati Campos, João Felipe de Souza, Natália Pereira Arrivabene e Dayana Effgen pela colaboração e prontidão em ajudar na montagem do experimento e/ou no cultivo das plantas.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho. Muito obrigada!

Sumário

Resumo.....	1
Abstract.....	3
Introdução.....	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
1. O ecossistema manguezal.....	9
1.1. Poluição por metais.....	11
1.2. Adaptações anatômicas e fisiológicas das plantas aos metais.....	12
2. Ferro: função, transporte e regulação em plantas.....	14
3. Descrição das espécies em estudo.....	16
Apresentação dos Artigos.....	19
CAPÍTULO 1 - Differential bioaccumulation and translocation patterns in three mangrove plants experimentally exposed to iron. Consequences for environmental sensing.....	20
Abstract.....	21
Introduction.....	23
Materials and Methods.....	25
Results.....	31
Discussion.....	34
Conclusions.....	40
References.....	42
Figure Captions.....	49
Figures.....	51
Tables.....	58
Supplementary Material.....	60
CAPÍTULO 2 – Iron elimination through salt glands in leaves of two mangrove species.....	63
Abstract.....	64
Introduction.....	65
Materials and Methods.....	66

Results.....	72
Discussion.....	74
References.....	78
Figure Captions.....	82
Figures.....	84
Tables.....	90
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

ARRIVABENE, H.P. **ACÚMULO, DISTRIBUIÇÃO E ELIMINAÇÃO DE FERRO EM TRÊS ESPÉCIES VEGETAIS DO MANGUEZAL**. 2016. 102p. TESE (DOUTORADO) – INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS, UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, BOTUCATU.

RESUMO – A poluição por metais tem sido um dos principais problemas ambientais, tendo em vista a sua toxicidade, persistência no ambiente e bioacumulação. Os manguezais frequentemente são expostos a esses contaminantes, sendo o ferro um dos metais presentes em maior concentração no sedimento e com papel biogeoquímico importante quanto à precipitação e ciclagem de metais. Investigamos o acúmulo, a distribuição e a eliminação de ferro em *Avicennia schaueriana* Stapf & Leechm. ex Modenke, *Laguncularia racemosa* (L.) C.F. Gaertn. e *Rhizophora mangle* L. submetidas a diferentes concentrações de ferro. Para esse estudo, propágulos das três espécies estudadas foram coletados em campo e cultivados em meio nutritivo de Hoagland. Após o cultivo, as plantas foram submetidas a quatro tratamentos pela adição de 0 (controle), 10, 20 e 100 mg L⁻¹ de Fe(II)SO₄ no meio nutritivo. As plantas foram então coletadas, sendo realizadas análises químicas, anatômicas, histoquímicas e ultracitoquímicas. Parte dessas análises também foi feita em campo para comparação dos dados. Os resultados mostraram que a placa de ferro é local de grande acúmulo de ferro nessas plantas. *L. racemosa* foi a espécie que mais acumulou ferro em placa e raízes, enquanto *A. schaueriana* apresentou os níveis mais altos em caules e folhas. A bioacumulação de ferro em placa e raízes de *L. racemosa* aumentou progressivamente à medida que a concentração de ferro no substrato aumentou. A secreção de ferro por glândulas de sal ocorreu e foi fortemente inibida sob concentrações de ferro acima do controle em *L. racemosa*, enquanto em *A. schaueriana* não houve uma queda evidente entre controle e concentrações de ferro mais elevadas. Em geral, *L. racemosa* apresentou os menores fatores de translocação entre as três espécies estudadas. Com o aumento de ferro no substrato houve redução nos fatores de translocação de ferro entre partes aéreas e raiz e isso foi mais evidente em *R. mangle*. A maioria dos parâmetros analisados na anatomia radicular não mostrou diferença significativa entre os tratamentos. Os parâmetros que mostraram alterações foram espessura de raiz e córtex em *A. schaueriana*, com valores maiores em plantas controle, e espessura de raiz em *L. racemosa*, com valores menores em plantas expostas a 100 mg L⁻¹. Para as três espécies estudadas, os principais locais de bioacumulação de ferro (Fe (II) e Fe (III)) em raízes foram principalmente a epiderme, mas também o córtex. A bioacumulação de ferro em caules e folhas foi diferente para cada espécie. Em caules, o câmbio vascular de *L. racemosa* e a periderme de *R. mangle* foram os principais locais de acúmulo. Por outro lado, em *A. schaueriana* não foi possível identificar os principais locais. Em folhas, o ferro foi detectado principalmente no parênquima aquífero de *A. schaueriana* e no xilema de *L. racemosa*. Ambas as espécies também mostraram acúmulo de ferro em glândulas de sal. Em *R. mangle*, a bioacumulação foliar de ferro ocorreu em diversos tecidos, sobretudo o parenquimático. Análises de material vegetal fresco, recém-coletado em campo, mostraram que glândulas de sal de *A. schaueriana* e *L. racemosa* também exibem reação histoquímica positiva quando testada com o reagente de Perl, indicando acúmulo de ferro. Além disso, ultracitoquimicamente e usando o mesmo marcador específico, o ferro foi localizado em células secretoras,

aderido à membrana de vacúolos e a plasmodesmas. Em ambas as espécies residentes em campo, a presença de ferro na secreção foi confirmada por meio de análise química. Ao nosso conhecimento, este é o primeiro estudo detalhado sobre a resposta de plantas de manguezal a concentrações crescentes de ferro sob condições controladas.

Palavras-chave: glândulas de sal, histoquímica, manguezal, poluição por ferro, ultraestrutura.

ARRIVABENE, H.P. **IRON ACUMULATION, DISTRIBUTION AND ELIMINATION IN THREE PLANT SPECIES OF MANGROVE.** 2016. 102p. PhD. THESIS – BIOSCIENCE INSTITUTE, UNESP – SÃO PAULO STATE UNIVERSITY, BOTUCATU.

ABSTRACT – Metal pollution has long been one of the major environmental problems due to its toxicity, environmental persistence and bioaccumulation. Mangroves are often exposed to these contaminants, and iron is one of the metals present in higher concentrations in sediments and has an important biogeochemical role as regards the precipitation and cycling of metals. We investigate the iron accumulation, distribution and elimination in *Avicennia schaueriana* Stapf & Leechm. ex Modenke, *Laguncularia racemosa* (L.) CF Gaertn. and *Rhizophora mangle* L. exposed to different concentrations of iron. For this study, propagules of all species were collected in field and were cultivated in Hoagland's nutritive medium. After growing, plants were exposed to four treatments by adding 0 (control), 10, 20 and 100 mg L⁻¹ of Fe(II)SO₄ to the nutritive medium. Then, plants were collected and chemical, anatomical, histochemical and ultracitochemical analysis were carried out. Part of these analyses was also made in the field for data comparison. The results showed that the Fe-plaque is a place of high iron accumulation in these plants. *L. racemosa* accumulated the highest amounts of iron in the plaque and roots, while *A. schaueriana* presented the highest levels in stems and leaves. The bioaccumulation of iron in plaque and roots of *L. racemosa* increased progressively as the added-iron concentration rose. The iron secretion through salt glands occurred and it was strongly inhibited in *L. racemosa* at iron concentrations above controls, while *A. schaueriana* did not show a noticeable drop from controls to the highest added-iron concentration used. In general, *L. racemosa* presented the lowest translocation factors among the three studied species. With the increase of iron in the substrate, there was a drop in translocation factors between aerial parts and root, and that was more evident in *R. mangle*. Most analyzed parameters in root anatomy did not show significant changes throughout iron concentrations. The parameters showing changes were the thickness of cortex and root in *A. schaueriana*, with higher values in controls, and thickness of root in *L. racemosa*, with lower values in plants exposed to 100 mg L⁻¹. The main places of iron bioaccumulation (Fe(II) and Fe(III)) in roots were mainly the epidermis, but also cortex, in the three studied species. The bioaccumulation of iron in stems and leaves was different for each species. In stems, the vascular cambium of *L. racemosa* and the periderm of *R. mangle* were the main places for accumulation. Conversely, in *A. schaueriana* it was not possible to verify the main places. In leaves, iron was mostly detected in water storage parenchyma of *A. schaueriana* and in xylem of *L. racemosa*. Both species also showed accumulation of iron in salt glands. The leaf bioaccumulation in *R. mangle* occurred in several tissues, mainly the parenchyma. Fresh plant material analysis, recently sampled in field, shown that salt glands from *A. schaueriana* and *L. racemosa* had positive histochemical reaction when tested with Perl's reagent, indicating iron accumulation. Additionally, ultracitochemistry, using the same specific marker, showed that iron was in secretory cells, adhered to the membrane of vacuoles and to plasmodesmata. In both species resident in field, the presence of iron in the secretion was confirmed by chemical analysis. To our knowledge, this is the first detailed report on the response of mangrove plants to increasing iron concentrations under controlled conditions.

Keywords: histochemistry, iron pollution, mangrove, salt glands, ultrastructure.

Introdução

A poluição por metais contaminantes tem sido um dos principais problemas da atualidade, tendo em vista a sua toxicidade, persistência no ambiente e bioacumulação (Gbaruko & Friday 2007). Esses poluentes representam uma ameaça potencial a vários organismos, afetando negativamente a densidade e diversidade de comunidades bióticas (Hsu *et al.* 2006).

Devido à sua distribuição costeira e proximidade de centros urbanos, os manguezais frequentemente são expostos à poluição por metais (Peters *et al.* 1997, Silva Filho *et al.* 1998, Tam & Yao 1998, Tam & Wong 2000, Defew *et al.* 2005), os quais se acumulam em teores elevados no sedimento. De um modo geral, a alta capacidade de adsorção da matéria orgânica acarreta em baixa biodisponibilidade dos metais acumulados (Lacerda & Abrão 1984, Silva *et al.* 1990). Contudo, em concentrações tão elevadas, uma ínfima fração biodisponível assume uma importância considerável no que diz respeito à bioacumulação de metais em espécies animais e vegetais do manguezal (Szefer *et al.* 1998, Guhathakurta & Kaviraj 2000, MacFarlane *et al.* 2003).

As espécies vegetais do manguezal possuem relativa tolerância aos metais pesados presentes no sedimento (Macfarlane & Burchett 2002) devido a adaptações anatômicas e fisiológicas nas raízes que dificultam a absorção de metais por meio, principalmente, da oxidação do sedimento (Thibodeau & Nickerson 1986, Liu *et al.* 2009), da formação de placas de ferro na superfície radicular (Machado *et al.* 2005) e de barreiras na epiderme e endoderme (MacFarlane & Burchett 2000). Mais recentemente, alguns trabalhos demonstraram que as glândulas de sal presentes nas folhas de algumas espécies de mangue podem secretar metais, tais como zinco (Macfarlane & Burchett 1999, 2000), cobre (Macfarlane & Burchett 2000) e ferro (Arrivabene 2011).

De um modo geral, o ferro é um dos metais em maior concentração no sedimento dos manguezais (Defew *et al.* 2005), sendo que em áreas contaminadas, sobretudo por atividades mineradoras, o nível desse elemento pode aumentar substancialmente. Peters e colaboradores (1997) compilaram, em revisão, valores entre 100 – 33.492 µg/g de Fe no sedimento em áreas diversas de manguezal. No Espírito Santo, estado detentor do maior complexo de produção e exportação de pelotas de ferro do mundo (IBEF 2011), os valores chegam a 23.298 µg/g de Fe (Arrivabene 2015), estando muito acima da maioria dos valores encontrados em outras áreas de manguezal poluídas (Lacerda *et al.* 1989, Silva *et al.* 1990, Sadiq & Zaidi 1994, Sherman

et al. 1998, Sarangi *et al.* 2002, Defew *et al.* 2005). Além disso, o ferro apresenta-se como um dos elementos responsáveis por modular a biodisponibilidade e especiação de metais no sedimento, uma vez que, devido ao ambiente anaeróbico e ao alto teor de matéria orgânica e de sulfeto no sedimento dos manguezais, a formação e precipitação de Fe como sulfetos de ferro contribuem para a alta taxa de sedimentação nesse ambiente (Morse & Rickards 2004).

O ferro é um micronutriente essencial às plantas, envolvido em importantes funções metabólicas, como na biossíntese de clorofila e proteínas (Marschner 2012). Contudo, em níveis muito elevados, esse elemento pode ser tóxico às plantas, podendo acarretar estresse oxidativo e danificar lipídios, proteínas e DNA pela formação de radicais hidroxila na reação de Fenton (Connolly & Guerinot 2002). Quando em excesso, um possível mecanismo para a detoxificação de ferro em plantas tolerantes é sua compartimentalização em vacúolos, onde não reage com substâncias metabolicamente ativas na célula (Kim & Guerinot 2007).

A maior parte dos trabalhos que avaliaram a distribuição do ferro em espécies vegetais do manguezal se concentrou unicamente na análise do teor de ferro foliar (Cuzzuol & Campos 2001, Bernini *et al.* 2006, Agoramorthy *et al.* 2008). Estudos que avaliem a distribuição do ferro em diferentes órgãos vegetais de espécies de mangue, incluindo raiz, caule e folha, foram desenvolvidos *in situ* (Silva *et al.* 1990, Saifullah *et al.* 2004), sendo encontrado apenas um estudo sobre a bioacumulação de ferro em condições controladas (Cheng *et al.* 2012b). Além disso, estudos anteriores não relataram a distribuição de ferro em todos os compartimentos vegetais. Também não foram encontradas publicações acerca das respostas anatômicas e ultraestruturais de mangues ao ferro contido no sedimento, tampouco um estudo integrado sobre a distribuição desse elemento ao longo dos tecidos vegetais ou, ainda, onde se encontram possíveis barreiras à sua translocação.

Sabendo que as florestas de manguezal são consideradas barreiras biogeoquímicas para o transporte de poluentes em áreas costeiras tropicais (Silva *et al.* 1990) e que essas áreas têm sido consideradas em planos de gestão da poluição como uma alternativa no tratamento de águas residuais urbanas (Silva *et al.* 1990, Tam & Wong 1997), investigações sobre a viabilidade do uso de espécies de mangue na retenção de metais e informações sobre os mecanismos de aprisionamento desses poluentes tornam-se fundamentais.

Além disso, a avaliação do papel funcional de glândulas de sal na eliminação de metais abre uma nova perspectiva de estudo, a qual merece ser investigada em maior profundidade, visto que, tradicionalmente, essas estruturas têm sido descritas unicamente como adaptações à elevada concentração de sal no sedimento (Sobrado 2004, Ye *et al.* 2005).

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar, experimentalmente (Fig. 1), o acúmulo, a distribuição e a eliminação de ferro em *Avicennia schaueriana*, *Laguncularia racemosa* e *Rhizophora mangle*, procurando especificamente responder às seguintes questões: (1) Com o aumento do teor de ferro no substrato há um maior acúmulo desse elemento na placa de ferro?; (2) Com o aumento do teor de ferro no substrato há um maior acúmulo desse elemento em raízes, caules e folhas?; (3) Há um maior teor de ferro acumulado em raízes em relação a caules e folhas?; (4) Com o aumento do teor de ferro no substrato há alterações anatômicas nas raízes? (5) Caso sejam encontradas alterações, elas estariam correlacionadas com a formação da placa de ferro e com a quantidade de ferro acumulada nos tecidos vegetais? (6) A epiderme e endoderme radicular constituem os principais locais de acúmulo de ferro na raiz?; (7) Em nível celular, o vacúolo constitui o principal local de acúmulo de ferro?; (8) Há eliminação de ferro pelas glândulas de sal em *A. schaueriana* e *L. racemosa*?; (9) Com o aumento do teor de ferro no substrato há uma maior eliminação desse elemento pelas glândulas de sal?; (8) Há alterações ultraestruturais em glândulas de sal de indivíduos submetidos a maiores concentrações de ferro no substrato?

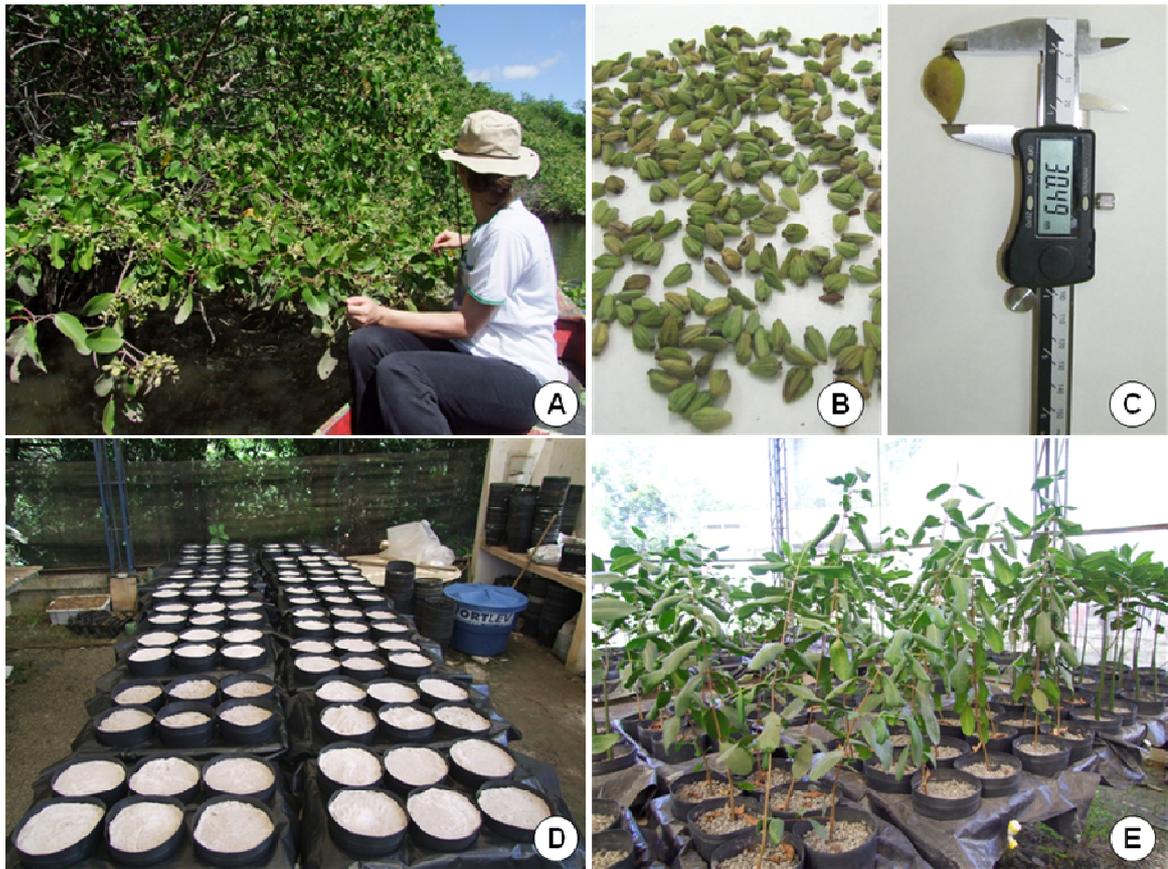


Figura 1. A-E. Etapas do experimento por meio do qual visamos responder às perguntas propostas neste estudo. **A.** Coleta em campo dos propágulos para montagem do experimento. Propágulos de *L. racemosa* (**B**) e *A. schaueriana* (**C**) coletados. **D.** Montagem do experimento em casa de vegetação. **E.** Mudanças com 8 meses de idade.

Considerações Finais

Os resultados mostram que as plantas têm padrões diferenciais em relação à bioacumulação, translocação e secreção de ferro através de glândulas de sal.

Em geral, o aumento do teor de ferro no substrato acarretou em maior acúmulo desse elemento em placa de ferro, raízes e caules, mas não em folhas. Os menores fatores de translocação encontrados sob maiores doses de ferro mostram que o aumento do teor de ferro no substrato afetou significativamente a translocação desse elemento nas três espécies estudadas.

Não observamos maior teor de ferro em raiz quando comparado a parte aérea para *A. schaueriana*, diferente do comumente relatado em literatura. Assim, o maior teor de ferro acumulado em raízes mostrado em alguns estudos, pode ser devido à retenção desse metal na placa de ferro e não ao acúmulo real desse elemento nos tecidos radiculares.

Houve maior acúmulo de ferro em *L. racemosa* (para raiz) e *A. schaueriana* (para caule e folha) em relação a *R. mangle*, com menor acúmulo, o que destaca a absorção diferencial de elementos devido aos mecanismos reguladores de sal nas raízes.

Poucas alterações anatômicas foram encontradas em raízes sob diferentes doses de ferro. Não houve aumento da lacuna de ar e essa não se correlacionou com a placa de ferro, tão pouco com a quantidade de ferro acumulada nos tecidos vegetais.

A epiderme se confirmou como o principal local de acúmulo de ferro em raízes e, provavelmente, confere a principal barreira à entrada desse metal nas plantas. Contudo, histoquimicamente, não detectamos acúmulo de ferro na endoderme radicular.

A eliminação de ferro por glândulas de sal de *A. schaueriana* e *L. racemosa* foi indicada por meio de teste histoquímico e ultracitoquímico, e confirmada por meio de análise química. Contudo, diferente do relatado em literatura, não verificamos maior secreção de ferro sob concentrações crescentes desse elemento no substrato.

Para fins de monitoramento ambiental da poluição por ferro, avaliando-se as três espécies, *L. racemosa* foi a que apresentou melhor capacidade de uso como bioindicadora, uma vez que a bioacumulação de ferro em placa de ferro e raízes foi maior e aumentou progressivamente com o aumento de ferro no substrato. Além disso, nessa espécie, a quantidade de ferro secretada por glândulas de sal foi fortemente inibida quando os indivíduos foram expostos a maiores dosagens de ferro.

Ao nosso conhecimento, este é o primeiro estudo detalhado sobre a resposta de plantas de manguezal a concentrações crescentes de ferro sob condições controladas, complementando dados existentes em campo.

Referências Bibliográficas

- AGORAMOORTHY, G.; CHEN, F-A.; HSU, M.J. Threat of heavy metal pollution in halophytic and mangrove plants of Tamil Nadu, India. **Environmental Pollution**, v. 155, p. 320-326, 2008.
- ARMSTRONG, W. **Aeration in higher plants**. In: Advances in botanical Research, Vol. 7. Ed. Woolhouse H.W.W. Academic Press, pp. 225-332. 1979.
- ARRIVABENE, H.P. **Morfoanatomia, histoquímica e teor de ferro foliar em *Avicennia schaueriana* Stapft & Leechm, *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. e *Rhizophora mangle* L. ocorrentes em cinco áreas de manguezal do estado do Espírito Santo**. 130f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.
- ARRIVABENE, H.P.; Souza, I.C; CÓ, W.L.O.; CONTI, M.M.; WUNDERLIN, D.A.; MILANEZ, C.R.D. Effect of pollution by particulate iron on the morphoanatomy, histochemistry, and bioaccumulation of three mangrove plant species in Brazil. **Chemosphere**, v. 127, pp. 27-34, 2015.
- BALL, M. Mangrove species richness in relation to salinity and waterlogging: a case study along the Adelaide River floodplain, northern Australia. **Global Ecology & Biogeography Letters**, v. 7, n. 1, p. 73-82, 1998.
- BARAKAT, M.A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 4, n. 4, p. 361-377, 2011.
- BARBIER, E.B.; HACKER, S.D.; KENNEDY, C.; KOCH, E.W.; STIER, A.C.; SILLIMAN, B.R. The value of estuarine and coastal ecosystem services. **Ecological Monographs**, v. 81, n. 2, p. 169-193, 2011.
- BAYEN, S. Occurrence, bioavailability and toxic effects of trace metals and organic contaminants in mangrove ecosystems: a review. **Environment international**, v. 48, p. 84-101, 2012.
- BERNINI, E.; SILVA, M. A. B.; CARMO, T. M. S.; CUZZUOL, G. R. F. Composição química do sedimento e de folhas das espécies do manguezal do estuário do Rio São Mateus, Espírito Santo, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 29, n.4, p.689-699, 2006.

- CHENG, H., CHEN, D.T., TAM, N.F.Y., CHEN, G.Z., LI, S.Y., YE, Z.H.. Interactions among Fe^{2+} , S^{2-} , and Zn^{2+} tolerance, root anatomy, and radial oxygen loss in mangrove plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, p. 2619–2630, 2012b.
- CHENG, H.; JIANG, Z.Y.; LIU, Y.; YE, Z.H.; WU, M.L.; SUN, C.C.; SUN, F.L.; FEI, J.; WANG, Y.S. Metal (Pb, Zn and Cu) uptake and tolerance by mangroves in relation to root anatomy and lignification/suberization. **Tree physiology**, v. 34, n. 6, 2014a.
- CHENG, H.; LIU, Y.; TAM, N.F.Y.; WANG, X.; LI, S.Y.; CHEN, G.Z.; YE, Z.H. The role of radial oxygen loss and root anatomy on zinc uptake and tolerance in mangrove seedlings. **Environmental pollution**, v. 158, n. 5, p. 1189-1196, 2010.
- CHENG, H.; TAM, N.F.Y.; WANG, Y.; Li, S.; CHEN, G.; YE, Z. Effects of copper on growth, radial oxygen loss and root permeability of seedlings of the mangroves *Bruguiera gymnorhiza* and *Rhizophora stylosa*. **Plant and soil**, v. 359, n. 1-2, p. 255-266, 2012a.
- CHENG, H.; WANG, M.; WONG, M.H.; YE, Z. Does radial oxygen loss and iron plaque formation on roots alter Cd and Pb uptake and distribution in rice plant tissues?. **Plant and soil**, v. 375, n. 1-2, p. 137-148, 2014b.
- CLOUGH, B. **Continuing the Journey Amongst Mangroves**. ISME Mangrove Educational Book Series No. 1. International Society for Mangrove Ecosystems (ISME), Okinawa, Japan, and International Tropical Timber Organization (ITTO), Yokohama, Japan. 2013.
- CONNOLLY, E.L.; GUERINOT, M. L. Iron stress in plants. **Genome Biology**, v.3, p. 1024.1–1024.4., 2002.
- COSTANZA, R., D'ARGE, R., GROOT, R. D., FARBER, S., GRASSO, M., HANNON, B., LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R.V.; PARUELO, J.; RASKIN, R.G.; SUTTON, P.; BELT, M.V.D. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, p. 253-260, 1997.
- CRAM, W.J.; TORR, P.G.; ROSE, D.A. Salt allocation and leaf development and leaf fall in mangroves. **Trees**, v. 16, p. 112–119, 2002.
- CUZZUOL, G.R.F.; CAMPOS, A. Aspectos nutricionais na vegetação de manguezal do estuário do Rio Mucuri, Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 24, n. 2, p. 227-234, 2001.
- DEFEW, L.H.; MAIR, J.M.; GUZMAN, H.M. An assessment of metal contamination in mangrove sediments and leaves from Punta Mala Bay, Pacific Panama. **Marine Pollution Bulletin**, v. 50, p. 547–552, 2005.

- DU LAING, G.; RINKLEBE, J.; VANDECASTEELE, B.; MEERS, E.; TACK, F.M.G. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: a review. **Science of the Total Environment**, v. 407, n. 13, p. 3972-3985, 2009.
- ELLISON, A.M.; FARNSWORTH, E.J.; MERKT, R.E. Origins of mangrove ecosystems and the mangrove biodiversity anomaly. **Global Ecology and Biogeography**, v. 8, n. 2, p. 95-115, 1999.
- FRANCISCO, A.M.; Díaz, M.; Romano, M.; Sánchez, F. Descripción morfoanatomia de los tipos de glândulas foliares em El mangle blanco *Laguncularia racemosa* L. Gaertn (f.). **Acta Microscopica**, v. 18, n. 3, p. 237-252, 2009.
- GBARUKO B.C.; FRIDAY O.U. Bioaccumulation of heavy metals in some fauna and flora. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v.4, n.2, p. 197-202, 2007.
- GIMENO-GARCÍA, E.; ANDREU, V.; BOLUDA, R.. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. **Environmental pollution**, v. 92, n. 1, p. 19-25, 1996.
- GIRI, C.; OCHIENG, E.; TIESZEN, L.L.; ZHU, Z.; SINGH, A.; LOVELAND, T.; MASEK, J.; DUKE, N. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, n. 1, p. 154-159, 2011.
- GUHATHAKURTA, H.; KAVIRAJ, A. Heavy metal concentration in water, sediment, shrimp (*Penaeus monodon*) and mullet (*Liza parsia*) in some brackish water ponds of Sunderban, India. **Marine Pollution Bulletin**, v. 40, n. 11, p. 914-920, 2000.
- HOSSAIN, M.A.; PIYATIDA, P.; DA SILVA, J.A.T.; FUJITA, M. Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation. **Journal of Botany**, v. 2012, p. 1-37, 2012.
- HSU, M.J.; SELVARAJ, K.; AGORAMOORTHY, G. Taiwan's industrial heavy metal pollution threatens terrestrial biota. **Environmental Pollution**, v. 143, p. 327-334, 2006.
- HWANG, Y-H.; CHEN, S-C. Salt tolerance in seedlings of the mangrove *Kandelia candel* (L.) Druce, Rhizophoraceae. **Botanical Bulletin of Academia Sinica**, v. 36, n. 1, p. 25-31, 1995.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE EXECUTIVOS DE FINANÇAS – IBEF. Disponível em: <<http://ibefes.ning.com/page/ibefes-faz-visita-tecnica-a>>. Acesso em: 13 fev. 2011.

- KIM, S.A.; M. L. GUERINOT. Mining iron: Iron uptake and transport in plants. **FEBS Letters**, v. 581, p. 2273–2280, 2007.
- KJERFVE, B.; LACERDA, L.D. **Mangroves of Brazil**. In: LD Lacerda (ed.) Conservation and sustainable utilization of mangrove forest in Latin America and Africa regions, Part I: Latin America, 1st edn. ITTO/ISME, Okinawa, pp 245–272. 1993.
- KOBAYASHI, T.; NISHIZAWA, N.K. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. **Annual review of plant biology**, v. 63, p. 131-152, 2012.
- LACERDA, L.D.; ABRÃO, J. J. Heavy metal accumulation by mangrove and saltmarsh intertidal sediments. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 7, p. 49-52, 1984.
- LACERDA, L.D.; SOUZA, C.M.M.; PESTANA, M.H.D. Trace metals geochemical associations in sediments of a non-contaminated estuary. **Ciência e Cultura**, v. 41, p. 301-304, 1989.
- LEWIS, M.; PRYOR, R.; WILKING, L. Fate and effects of anthropogenic chemicals in mangrove ecosystems: a review. **Environmental pollution**, v. 159, n. 10, p. 2328-2346, 2011.
- LIU, Y.; TAM, N.F.Y.; YANG, J.X.; PI, N.; B, WONG, M.H.; YE, Z.H. Mixed heavy metals tolerance and radial oxygen loss in mangrove seedlings. **Marine Pollution Bulletin**, v. 58, p. 1843–1849, 2009.
- LU, H.; LIU, B.; ZHANG, Y.; YE, J.; YAN, C. Comparing analysis of elements sub-cellular distribution in *Kandelia obovata* between SEM-EDX and chemical extraction. **Aquatic Botany**, v. 112, p. 10-15, 2014.
- MACFARLANE, G.R.; BURCHETT, M.D. Cellular distribution of copper, lead and zinc in the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. **Aquatic Botany**, v. 68, p. 45–59, 2000.
- MACFARLANE, G.R.; BURCHETT, M.D. Toxicity, growth and accumulation relationships of copper, lead and zinc in the grey mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. **Marine Environmental Research**, v. 54, p. 65–84, 2002.
- MACFARLANE, G.R.; BURCHETT, M.D. Zinc distribution and excretion in the leaves of the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. **Environ. Experimental Botany**, v. 41, p. 167–175, 1999.
- MACFARLANE, G.R.; PULKOWNIK, A.; BURCHETT, M.D. Accumulation and distribution of heavy metals in the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.: biological indication potential. **Environmental Pollution**, v. 123, p. 139–151, 2003.

- MACHADO, W.; SANTELLI, R.E.; CARVALHO, M.F.; MOLISANI, M.M.; BARRETO, R.C.; LACERDA, L.D. Relation of reactive sulfides with organic carbon, iron, and manganese in anaerobic mangrove sediments: implications for sediment suitability to trap trace metals. **Journal of Coastal Research**, v. 24, p. 25-32, 2008.
- MACHADO, W.; SILVA-FILHO, E.V.; OLIVEIRA, R.R.; LACERDA, L.D. Trace metal retention in mangrove ecosystems in Guanabara Bay, SE Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 44, p. 1277–1280, 2002.
- MACHADO, W.; GUEIROS, B.B.; LISBOA-FILHO, S.D.; LACERDA, L.D. Trace metals in mangrove seedlings: role of iron plaque formation. **Wetlands Ecology and Management**, v. 13, p. 199–206, 2005.
- MANSANO, V.F.; BARROS, L.A.V. de; ASSUNÇÃO, V.A. *Rhizophoraceae* in **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB208>>. Acesso em: 28 Jun. 2015
- MARQUETE, N.; LOIOLA, M.I.B. *Combretaceae* in **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB90>>. Acesso em: 28 Jun. 2015
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher plants**. New York: Academic Press, 2012.
- MENEZES, N. L. Rhizophores in *Rhizophora mangle* L: an alternative interpretation of so-called "aerial roots". **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. v. 78, n. 2, p. 213-226, 2006.
- MORSE, J.W.; RICKARD, D. Peer reviewed: chemical dynamics of sedimentary acid volatile sulfide. **Environmental science & technology**, v. 38, n. 7, p. 131A-136A, 2004.
- NAIDOO, G.; HIRALAL, T.; NAIDOO, Y. Ecophysiological responses of the mangrove *Avicennia marina* to trace metal contamination. **Flora**, v. 209, n. 1, p. 63-72, 2014.
- PARIDA, A.K.; DAS, A.B.; SANADA, Y.; MOHANTY, P. Effects of salinity on biochemical components of the mangrove, *Aegiceras corniculatum*. **Aquatic Botany**, v. 80, n. 2, p. 77-87, 2004.
- PETERS, E.C.; GASSMAN, N.J.; FIRMAN, J.C.; RICHMOND, R.H.; POWER, E.A. Ecotoxicology of tropical marine ecosystems. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 16, p. 12–40, 1997.
- PI, N.; TAM, N.F.Y.; WU, Y.; WONG, M.H. Root anatomy and spatial pattern of radial oxygen loss of eight true mangrove species. **Aquatic Botany**, v. 90, n. 3, p. 222-230, 2009.

- PROFICE, S.R.; KAMEYAMA, C.; CÔRTEZ, A.L.A.; BRAZ, D.M.; INDRIUNAS, A.; VILAR, T.; PESSOA, C.; EZCURRA, C.; WASSHAUSEN, D. *Acanthaceae* in **Lista de Espécies da Flora do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB33>>. Acesso em: 28 Jun. 2015
- SADIQ, M.; ZAIDI, T.H. Sediment composition and metal concentrations in mangrove leaves from the Saudi coast of the Arabian Gulf. **Science of the Total Environment**, v. 155, p.1-8, 1994.
- SADOONI, F.N.; AL-SAAD, H. Mangrove-bearing limestone from the Eocene Damman Formation, Arabian Gulf: implications for the mangrove dispersal controversy. **Carbonates and evaporites**, v. 27, n. 3-4, p. 243-250, 2012.
- SAENGER, P. **Mangrove Ecology, Silviculture and Conservation**. Kluwer Academic Publishers. 2002.
- SAIFULLAH, S.M.; ISMAIL, S.; KHAN S.H.; SALEEM, M. Land Use—Iron Pollution in Mangrove Habitat of Karachi, Indus Delta. **Earth Interactions**, v. 8, p. 1-9, 2004.
- SARANGI, R.K.; KATHIRESAN, K.; SUBRAMANIAN, A.N. Metal concentrations in five mangrove species of the Bhitarkanika, Orissa, east coast of India. **Indian Journal of Marine Species**, v. 31, n. 3, p. 251-253, 2002.
- SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; HEMMINGSON, E. A.; GAREY, W. Salt balance in mangroves. **Plant Physiology**, v. 37, p. 722-729, 1962.
- SHERMAN, R.E.; FAHEY, T.J.; HOWARTH, R.W. Soil-plant interactions in a neotropical mangrove forest: iron, phosphorus and sulfur dynamics. **Oecologia**, v. 115, 553-563, 1998.
- SILVA FILHO, E.V.; PAIVA, R.P.; WASSERMAN, J.C.; LACERDA, L.D. Geochemical Characterization of Rain Water Particulate Material on a Coastal Sub-Tropical Region in SE – Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 9, p. 482-486, 1998.
- SILVA, C.A.R.; LACERDA, L.D.; REZENDE, C.E. Metals reservoir in a red mangrove forest. **Biotropica**, v. 22, n. 4, p. 339-345, 1990.
- SOBRADO, M. A. Leaf characteristics and gas exchange of the mangrove *Laguncularia racemosa* as affected by salinity. **Photosynthetica**, v. 43, p. 217-221, 2005.
- SOBRADO, M.A. Influence of external salinity on the osmolality of xylem sap, leaf tissue and leaf gland secretion of the mangrove *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. **Trees**, v. 18, p. 422–427, 2004.

- SOUZA, I.; BONOMO, M.M.; MOROZESK, M.; ROCHA, L.D.; DUARTE, I.D.; FURLAN, L.M.; ARRIVABENE, H.P.; MONFERRÁN, M.V.; MATSUMOTO, S.T.; MILANEZ, C.R.D.; WUNDERLIN, D.A.; FERNANDES, M.N. Adaptive plasticity of *Laguncularia racemosa* in response to different environmental conditions: integrating chemical and biological data by chemometrics. **Ecotoxicology**, v. 23, n. 3, p. 335-348, 2014a.
- SOUZA, I.C; MOROZESK, M.; DUARTE, I.D.; BONOMO, M.M.; ROCHA, L.D.; FURLAN, L.M.; ARRIVABENE, H.P.; MONFERRÁN, M.V.; MATSUMOTO, S.T.; MILANEZ, C.R.D.; WUNDERLIN, D.A.; FERNANDES, M.N. Matching pollution with adaptive changes in mangrove plants by multivariate statistics. A case study, *Rhizophora mangle* from four neotropical mangroves in Brazil. **Chemosphere**, v. 108, p. 115-124, 2014b.
- SOUZA, I.C; ROCHA, L.D.; MOROZESK, M.; BONOMO, M.M.; ARRIVABENE, H.P.; DUARTE, I.D., FURLAN, L.M., MONFERRÁN, M.V.; MATSUMOTO, S.T.; MILANEZ, C.R.D.; WUNDERLIN, D.A.; FERNANDES, M.N. Changes in bioaccumulation and translocation patterns between root and leaf of *Avicennia schaueriana* as adaptive response to different levels of metals in mangrove system. **Marine pollution bulletin**, 2015.
- SOUZA, V; LORENZI, H. **Botânica sistemática: guia ilustrado para identificação das famílias de fanerógamas nativas e exóticas no Brasil, baseado em APG II**. 2008.
- SPALDING, M. **World atlas of mangroves**. Routledge, 2010.
- SUÁREZ, N.; SOBRADO, M. A. Adjustments in leaf water relations of mangrove (*Avicennia germinans*) seedlings grown in a salinity gradient. **Tree Physiology**, v. 20, p. 277–282, 2000.
- SZEFER, P.; GELDON, J.; ALI, A.A.; OSUNA, F.P.; RUIZ-FERNANDESS, A.C. R.; GALVAN, G. Distribution and association of trace metals in soft tissue and byssus of *Mytella strigata* and other benthic organisms from Mazatlan Harbour, Mangrove Lagoon of the northwest coast of Mexico. **Environment International**, v. 24, n. 3, p. 359-374, 1998.
- TAM, N.F.Y.; WONG, W.S. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. **Environmental Pollution**, v. 110, p. 195–205, 2000.
- TAM, N.F.Y.; WONG, Y.-S. Accumulation and distribution of heavy metals in a simulated mangrove system treated with sewage. **Hydrobiologia**, v. 352, p. 67–75, 1997.

- TAM, N.F.Y.; YAO, M.W.Y. Normalisation and heavy metal contamination in mangrove sediments. **Science of the Total Environment**, v. 216, p. 33-39, 1998.
- THIBODEAU, F.R.; NICKERSON, N.H. Differential oxidation of mangrove substrate by *Avicennia germinans* and *Rhizophora mangle*. **American Journal of Botany**, v. 73, n. 4, p. 512-516, 1986.
- THOMINE, S.; VERT, G. Iron transport in plants: better be safe than sorry. **Current opinion in plant biology**, v. 16, n. 3, p. 322-327, 2013.
- TOMLINSON, P. B. **The botany of mangroves**. New York: Cambridge University Press, 1994.
- TRIPATHI, R.D.; TRIPATHI, P.; DWIVEDI, S.; KUMAR, A.; MISHRA, A.; CHAUHAN, P.S.; NORTON G.J.; NAUTIYAL, C.S. Roles for root iron plaque in sequestration and uptake of heavy metals and metalloids in aquatic and wetland plants. **Metallomics**, v. 6, n. 10, p. 1789-1800, 2014.
- VALIELA, I.; BOWEN, J.L.; YORK, J.K. Mangrove Forests: One of the World's Threatened Major Tropical Environments At least 35% of the area of mangrove forests has been lost in the past two decades, losses that exceed those for tropical rain forests and coral reefs, two other well-known threatened environments. **Bioscience**, v. 51, n. 10, p. 807-815, 2001.
- VO, Q.T.; KUENZER, C.; VO, Q.M.; MODER, F.; OPPELT, N. Review of valuation methods for mangrove ecosystem services. **Ecological Indicators**, v. 23, p. 431-446, 2012.
- WALTERS, B.B.; RÖNNBÄCK, P.; KOVACS, J.M.; CRONA, B.; HUSSAIN, S. A.; BADOLA, R.; PRIMAVERA, J.H.; BARBIER, E.; DAHDOUH-GUEBAS, F. Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: a review. **Aquatic Botany**, v. 89, n. 2, p. 220-236, 2008.
- WENG, B.; XIE, X.; WEISS, D.J.; LIU, J.; LU, H.; YAN, C. *Kandelia obovata* (S., L.) Yong tolerance mechanisms to cadmium: subcellular distribution, chemical forms and thiol pools. **Marine pollution bulletin**, v. 64, n. 11, p. 2453-2460, 2012.
- WOODROFFE, C. **Mangrove sediments and geomorphology**. In: Robertson AI, Alongi DM (eds.) Coastal and estuarine studies, Vol 41. American Geophysical Union, Washington, pp 7–41. 1992.

- YE, Y.; TAM, N.F.Y; LU, C.Y.; WONG, Y.S. Effects of salinity on germination, seedling growth and physiology of three salt secreting mangrove species. **Aquatic Botany**, v. 83, p. 193–205, 2005.
- ZHOU, Y.W.; PENG, Y.S.; LI, X.L.; CHEN, G.Z. Accumulation and partitioning of heavy metals in mangrove rhizosphere sediments. **Environmental Earth Sciences**, v. 64, n. 3, p. 799-807, 2011.
- ZHOU, Y-W.; ZHAO, B.; PENG, Y-S; CHEN, G-Z. Influence of mangrove reforestation on heavy metal accumulation and speciation in intertidal sediments. **Marine Pollution Bulletin**, v. 60, p. 1319-1324, 2010.