



ANA CAROLINA OLIVEIRA DUARTE

**INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS TERRAS
RARAS EM CARACTERÍSTICAS
ANATÔMICAS EM PLANTAS DE ARROZ,
MILHO, TRIGO E FEIJÃO**

LAVRAS – MG

2018

ANA CAROLINA OLIVEIRA DUARTE

**INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS TERRAS RARAS EM
CARACTERÍSTICAS ANATOMICAS EM PLANTAS DE ARROZ,
MILHO, TRIGO E FEIJÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Botânica Aplicada - Área de concentração Botânica Estrutural, para obtenção do título de Doutora.

Orientador

Dr. Sílvio Junio Ramos

LAVRAS – MG

2018

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Duarte, Ana Carolina Oliveira.

Influência de elementos terras raras em características
anatômicas em plantas de arroz, milho, trigo e feijão. / Ana
Carolina Oliveira Duarte. - 2018.

92 p. : il.

Orientador(a): Sílvio Junio Ramos.

Coorientador(a): Cynthia Oliveira, Evaristo Mauro de Castro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. fertilizantes. 2. Lântânio. 3. Culturas. I. Ramos, Sílvio Junio.
II. Oliveira, Cynthia. III. Castro, Evaristo Mauro de. IV. Título.

ANA CAROLINA OLIVEIRA DUARTE

**INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS TERRAS RARAS EM
CARACTERÍSTICAS ANATOMICAS EM PLANTAS DE ARROZ,
MILHO, TRIGO E FEIJÃO
*INFLUENCE OF RARE EARTH ELEMENTS IN ANATOMICAL
CHARACTERISTICS IN RICE, MAIZE, WHEAT AND BEANS***

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Botânica Aplicada - Área de concentração Botânica Estrutural, para obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 09 de março de 2018.

Dr. Evaristo Mauro de Castro- UFLA

Dr. Fabrício José Pereira - UNIFAL

Dra. Edna Santos de Souza- UFRA

Dra. Marinês Ferreira Pires Lira- UFLA



Orientador

Dr. Sílvio Junio Ramos

LAVRAS – MG

2018

**Ao meu pai, por ser um grande
lutador pela educação e por me ajudar a atravessar fronteiras.**

À minha mãe, sempre presente e dedicada.

Às minhas irmãs, pela paciência e amizade.

**Ao meu namorado, pelo
companheirismo e amor.**

Aos meus avós, pelo exemplo de vida e pelas orações.

Obrigada pelo incentivo, sempre.



DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e às minhas irmãs, por serem sempre presentes; pela dedicação, carinho e apoio incondicional que me impulsionaram até aqui.

Ao Diego, pelo apoio nos momentos de desânimo e por permanecer sempre ao meu lado.

Ao Dr. Sílvio Ramos, pela orientação, ensinamentos e principalmente pela oportunidade concedida.

À Dra. Cynthia de Oliveira, pelo auxílio e amizade, que foram fundamentais para minha formação.

Aos amigos, por todos os momentos divididos dentro e fora da UFLA: Marinês, Juliana Bueno, Jessica, Mírian, Daniel, Paulyene, Cassiana, Ray, Flávio, Aline, Thamires, Laís e Sthefane.

À Tia Nirlei e Frank, pela consideração, grande ajuda nessa trajetória e também pelo exemplo de dedicação e empenho.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade na avaliação deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Botânica Aplicada, pela oportunidade concedida para a realização do doutorado.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa.

A Deus.

Obrigada!

RESUMO

Os elementos terras raras (ETR) incluem os lantanídeos, ítrio e escândio, são utilizados em produtos de alta tecnologia e "tecnologias limpas". O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas e consumidor de fertilizantes fosfatados, produzindo em grande escala arroz, feijão, milho e trigo, os quais são a base da alimentação. O objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos da aplicação de ETR via solo e foliar sobre a anatomia das seguintes culturas agrícolas: arroz, trigo, milho e feijão. As doses utilizadas a partir de uma solução de ETR (contendo lantânio, cério, praseodímio e neodímio) e aplicadas via foliar foram as seguintes, para o arroz 0; 0,1; 0,25; 0,5 e 1 kg ha⁻¹; para milho: 0; 0,1; 0,3; 0,6 e 1,2 kg ha⁻¹; para o trigo: 0; 0,1; 0,3; 0,6, 1,2, 2,4 e 4,8 kg ha⁻¹. Para o feijão, a aplicação foi somente via solo a partir do uso de quatro fertilizantes contendo ETR: sal puro de fosfato de amônio e formulados comercial, de Araxá e de Catalão. O segundo fator experimental para o feijoeiro foi doses de P₂O₅ (0, 40, 80, e 160 kg ha⁻¹). Para as avaliações anatômicas, o material foi fixado em F.A.A.^{70%}, armazenado em etanol 70% e submetido à desidratação etanólica para posterior infiltração e inclusão em hidroxietil-metacrilato Leica®. As secções transversais foram realizadas com auxílio de micrótomo, coradas e montadas em lâminas permanentes e, posteriormente, avaliadas. Dos dados histométricos obtidos, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, com 5% de significância, com auxílio do software Sisvar. Em arroz, a aplicação de ETR causou espessamento das epidermes, reduções do mesofilo, diâmetro de metaxilema. A aplicação de ETR proporcionou aumento de tecidos foliares nas plantas de milho, bem como redução nos índices estomáticos acompanhado pela densidade dos estômatos da face adaxial, possivelmente por se tratar de uma cultura mais resistente e melhor adaptabilidade a estresses. Em trigo, as reduções nas espessuras dos tecidos foliares foram mais evidentes como indício de toxicidade. Já os diâmetros dos estômatos da face abaxial apresentaram redução, enquanto houve aumento no índice estomático acompanhado pela densidade estomática. No feijão, a aplicação no solo do sal puro apresentou valores semelhantes ao formulado comercial, mostrando que as maiores concentrações de ETR tiveram respostas no sentido de reduzir as espessuras dos tecidos foliares e espessando os radiculares, mitigando possíveis efeitos negativos desses elementos. Para pesquisas futuras, sugere-se focar em concentrações foliares de até 0,3 kg ha⁻¹ para milho, trigo e arroz, tendo seu limite de aplicação e evitar efeitos relacionados a toxicidade. Para o feijoeiro a aplicação entre 40 e 80 kg ha⁻¹ P₂O₅ e os formulados de Araxá e Catalão podem ser boas fontes de P e beneficiar a cultura pela presença de ETR.

Palavras-chave: Cério. Fertilizantes. Lantânio. *Oryza sativa*. *Phaseolus vulgaris*. *Triticum aestivum*. *Zea mays*.

ABSTRACT

Rare earth elements (ETRs) include lanthanides, yttrium and scandium, are used in high technology products and "clean technologies". In Brazil, is one of the largest agricultural producers and consumer of phosphate fertilizers, producing large-scale rice, beans, corn and wheat, which are the basis of food. The objective of this work was to evaluate the effects of the application of ETR on the anatomy of cultivated plants (rice, wheat, corn and beans). The foliar doses from a solution of ETR (containing La, Ce, Pr and Nd) were as follows: rice 0; 0.1; 0.25; 0.5 and 1 kg ha⁻¹; for maize: 0; 0.1; 0.3; 0.6 and 1.2 kg ha⁻¹; for wheat: 0; 0.1; 0.3; 0.6, 1.2, 2.4 and 4.8 kg ha⁻¹. For the beans, four fertilizers containing ETR: pure ammonium phosphate salt and formulated commercial, Araxá and Catalão were evaluated via soil. The second experimental factor in the beans was doses of P₂O₅, which consisted of four doses (0, 40, 80, and 160 kg ha⁻¹). For the anatomical evaluations, the material was collected, fixed in F.A.A.70%, stored in 70% ethanol and submitted to a series of ethanolic dehydration for subsequent infiltration and inclusion in hydroxyethyl methacrylate Leica®. The cross sections were made with the aid of a rotating microtome and obtained material was stained and mounted in permanent, and than evaluated. From the histometric data obtained, the averages were compared by the Scott-Knott test, with a 5% significance using the Sisvar software. In rice, the application of ETR caused thickening of the epidermis, reductions of mesophyll, diameter of metaxylem. Differently from that observed for rice, the application of ETR provided an increase of foliar tissues in maize plants, as well as reduction in stomatal indices accompanied by the density of the stomata only on the adaxial side, possibly because it is a more resistant culture and better adaptability to the stresses. In wheat, reductions in leaf tissue thickness were more evident as a sign of toxicity. In bean, the application of pure salt to the soil showed values similar to commercial formulations, showing that the highest concentrations of ETR had responses in the sense of reducing the thickness of the foliar tissues and thickening the roots, mitigating possible negative effects of these elements. For future research, it is suggested to focus on foliar concentrations up to 0.3 kg ha⁻¹ for maize, wheat and rice, to avoiding effects related to toxicity. For the bean, the application between 40 and 80 kg ha⁻¹ of P₂O₅ and the formulations of Araxá and Catalão can be good sources of P and benefit the crop by the presence of ETR.

Keywords: Fertilizers. *Oryza sativa*. *Phaseolus vulgaris*. *Triticum aestivum*. *Zea mays*.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1- Interferência de ETR na fotossíntese.....24

ARTIGO 1

Figura 1- Secções transversais de folhas de *Oryza sativa* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. A=controle; B= 0,1 kg ha⁻¹; C= 0,225 kg ha⁻¹; D= 0,5 kg ha⁻¹; E= 1,0 kg ha⁻¹. Barras= 50 µm. (EAD: Epiderme na face adaxial; EAB:Epiderme na face abaxial; CBU: Conjunto de células buliformes, FVA: Feixe vascular).....48

Figura 2- Secções transversais da nervura central de *Oryza sativa* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. A=controle; B= 0,1 kg ha⁻¹; C= 0,225 kg ha⁻¹; D= 0,5 kg ha⁻¹; E= 1,0 kg ha⁻¹. Barras= 50 µm.....49

Figura 3- Secções transversais de folhas de *Zea mays* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. A=controle; B= 0,1 kg ha⁻¹; C= 0,3 kg ha⁻¹; D= 0,6 kg ha⁻¹; E= 1,2 kg ha⁻¹. Barras= 50µm. (EAD- Epiderme na face adaxial; EAB-Epiderme na face abaxial; FVA: Feixe vascular).....50

Figura 4- Secções transversais de folhas de *Triticum aestivum* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. A=controle; B= 0,1 kg ha⁻¹; C= 0,3 kg ha⁻¹; D= 0,6 kg ha⁻¹; E= 1,2 kg ha⁻¹; F= 2,4 kg ha⁻¹; G= 4,8 kg ha⁻¹. Barras= 50µm. (EAD- Epiderme na face adaxial; EAB-Epiderme na face abaxial; FVA: Feixe vascular; BUL: Células buliformes).....53

ARTIGO 2

Figura 1- Secções transversais de folhas de *Phaseolus vulgaris* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. Sal puro: A, B, C e D; Formulado comercial:E, F, G e H; Formulado de Araxá: I, J, K e L; Formulado de Catalão: M, N, O e P. 0 kg ha⁻¹ P₂O₅: A, E, I e M; 40 kg ha⁻¹ P₂O₅:B, F, J e N; 80 kg ha⁻¹ P₂O₅: C, G, K e O; 160 kg ha⁻¹ P₂O₅: D, H, L e P. Barras= 50µm. EAD- Epiderme na face adaxial; EAB-Epiderme na face abaxial; FVA: Feixe vascular; PAP- Parênquima paliádico; PES- Parênquima esponjoso).....78

Figura 2- Secções transversais de nervuras de *Phaseolus vulgaris* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. Sal puro: A, B, C e D; Formulado comercial: E, F, G e H; Formulado de Araxá: I, J, K e L; Formulado de Catalão: M, N, O e P. 0 kg ha⁻¹ P₂O₅: A, E, I e M; 40 kg ha⁻¹ P₂O₅: B, F, J e N; 80 kg ha⁻¹ P₂O₅: C, G, K e O; 160 kg ha⁻¹ P₂O₅: D, H, L e P. Barras= 50µm.....80

Figura 3- Secções transversais de raízes de *Phaseolus vulgaris* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. Sal puro: A, B, C e D; Formulado comercial: E, F, G e H; Formulado de Araxá: I, J, K e L; Formulado de Catalão: M, N, O e P. 0 kg ha⁻¹ P₂O₅: A, E, I e M; 40 kg ha⁻¹ P₂O₅: B, F, J e N; 80 kg ha⁻¹ P₂O₅: C, G, K e O; 160 kg ha⁻¹ P₂O₅: D, H, L e P. Barras= 50µm. EPI- Epiderme; COR: Córtex; END: Endoderme; CIL: Cilindro vascular.....83

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE- ARTIGO 1

Tabela 1- Espessura dos tecidos foliares de plantas de *Oryza sativa* em diferentes concentrações de ETR. (EPB: Espessura da epiderme na face abaxial; EPD: Espessura da epiderme na face adaxial; MES: Espessura do mesofilo, DME: Diâmetro do metaxilema; AFE: Área do feixe vascular; ABU: Área de células buliformes; DFE: Diâmetro do feixe vascular; DBU: Diâmetro de células buliformes; PAER: Proporção de câmaras de aerênquima em relação ao mesofilo; ACR: Área de células crivadas).....47

Tabela 2- Espessura dos tecidos foliares, índices estomáticos e densidades estomáticas de plantas de *Zea mays* em diferentes concentrações de ETR. (EPD: Espessura da epiderme da face adaxial; MES: Espessura do mesofilo, EPB: Espessura da epiderme da face abaxial; DME: Diâmetro do metaxilema; FEI: Área do feixe vascular; DPB: Diâmetro polar na face abaxial; DEB: Diâmetro equatorial na face abaxial; DPD: Diâmetro polar na face adaxial; DED: Diâmetro equatorial na face adaxial; CCR: Área das células crivadas; IEB: Índice estomático na face abaxial; IED: Índice estomático na face adaxial; DEB: Densidade estomática na face abaxial; DED: Densidade estomática na face adaxial).....51

Tabela 3- Espessura dos tecidos foliares, índices estomáticos e densidades estomáticas de plantas de <i>Triticum aestivum</i> em diferentes concentrações de ETR. (EPD: Espessura da epiderme da face adaxial; MES: Espessura do mesofilo, EPB: Espessura da epiderme da face abaxial; DME: Diâmetro do metaxilema; AFE:Área do feixe vascular; ACC: Área das células crivadas; ACB: Área de células buliformes; IEB: Índice estomático na face abaxial; IED: Índice estomático na face abaxial; DAB: Densidade na face abaxial; DAD: Densidade na face adaxial; DPB: Diâmetro polar na face abaxial; DEB: Diâmetro equatorial na face abaxial; DPD: Diâmetro polar na face adaxial; DED: Diâmetro equatorial na face adaxial).....	55
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ARTIGO 2

Tabela 1- Espessura dos tecidos foliares de plantas de <i>Phaseolus vulgaris</i> em diferentes concentrações de ETR e P ₂ O ₅	77
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tabela 2- Espessura dos tecidos na nervura central das folhas de <i>Phaseolus vulgaris</i> em diferentes concentrações de ETR.....	79
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tabela 3- Espessura dos tecidos radiculares de <i>Phaseolus vulgaris</i> em diferentes concentrações de ETR.....	82
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ANEXOS

Anexo 1- Propriedades químicas das áreas de estudo	97
Anexo 2- Teores de ETR nos formulados.....	93

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Elementos terras raras	18
2.2	Efeito de elementos terras raras em plantas.....	22
2.3	Geoquímica dos elementos terras raras.....	25
2.4	As culturas.....	26
2.4.1	Arroz.....	27
2.4.2	Milho.....	27
2.4.3	Trigo.....	29
2.4.4	Feijão.....	30
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
	REFERÊNCIAS	33

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1

	INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS TERRAS RARAS NA ANATOMIA DE TECIDOS FOLIARES DE ARROZ, MILHO E TRIGO.....	39
1	INTRODUÇÃO.....	41
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	42
2.1	Análises anatômicas.....	43
3	RESULTADOS.....	45
3.1	Efeito de ETR na anatomia foliar de plantas de arroz.....	45
3.2	Efeito de ETR na anatomia foliar de plantas de milho.....	49

3.3	Efeito de ETR na anatomia foliar de plantas de trigo.....	54
4	DISCUSSÃO.....	63
5	CONCLUSÕES.....	68
	REFERÊNCIAS.....	69

ARTIGO 2

	INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS TERRAS RARAS NA ANATOMIA RADICULAR E FOLIAR DO FEJJOEIRO.....	74
1	INTRODUÇÃO.....	76
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	79
2.1	Análises anatômicas.....	79
3	RESULTADOS.....	80
4	DISCUSSÃO.....	90
5	CONCLUSÃO.....	94
	REFERÊNCIAS.....	95
	ANEXOS.....	99

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os Elementos Terras Raras (ETR) formam um grupo de elementos com números atômicos sucessivos de 57 (lantânio) até 71 (lutécio) juntamente com ítrio (39) e escândio (21), os quais são reconhecidos pela International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) devido ao semelhante comportamento químico, toxicológico e por serem, frequentemente, encontrados nos mesmos minerais de origem. Na realidade, os ETR não podem ser considerados raros na natureza, já que seu conteúdo médio na crosta terrestre é de aproximadamente 0,015%, assim como cobre, chumbo e zinco (RAMOS et al., 2016 a).

Os ETR foram chamados de "vitaminas industriais" e "materiais inovadores" devido ao seu papel no desenvolvimento industrial (RIM, 2016). Os ETR estão associados aos setores de alta tecnologia, eletrônica, militar, "tecnologias de energia verde" e tecnologia de comunicação (PANDA et al, 2014). O uso desses elementos é essencial à produção de ímãs, dispositivos eletromecânicos, *displays* de tela, vidro, lentes, laser, dispositivos de micro-ondas, cerâmicas, fotográficos, bem como em raios-X e ressonância magnética, incluindo ainda produtos químicos, transporte, cuidados da saúde e aviação (KHAN et al., 2011).

Além destas utilizações, a China foi o primeiro país a aplicar ETR diretamente via fertilizantes foliares nas culturas agrícolas e, também, é o principal país fornecedor de ETR, controlando mais de 90% do mercado global. Ao longo dos últimos trinta anos, os fertilizantes contendo ETR foram amplamente estudados e aplicados na agricultura para melhorar o rendimento e qualidade de culturas (CARPENTER et al., 2015), com ganhos variando de 5% a 15% para várias espécies e sob diferentes condições de solo e nutrientes (HU et

al., 2004). Já no Brasil, os mesmos são aplicados indiretamente via fosfogesso agrícola e, principalmente, através dos fertilizantes fosfatados (Ramos et al., 2016b).

Embora tenham sido relatados na literatura diversos efeitos benéficos dos ETR às plantas, devido ao estímulo desses elementos na absorção de nutrientes, ou ainda pelo aumento na síntese de clorofila (XU et al., 2002), esses elementos ainda não foram definidos como pertencentes a nenhum do grupos existentes na nutrição mineral de plantas (essencial ou benéficos). Por não serem classificados como essenciais, tóxicos ou benéficos, é necessário ter cautela ao introduzi-los no ecossistema, seja intencionalmente, via aplicação de fertilizantes foliares, ou involuntariamente, via fertilizantes fosfatados. Como elementos, são passíveis de bioacumulação, se transferidos do solo para organismos vivos e corpos d'água, podem comprometer toda a cadeia alimentar (RAMOS et al., 2016a).

Nos vegetais, a endocitose de ETR em células pode ser um dos principais responsáveis por seus efeitos (WANG et al., 2014). Além disso, acredita-se que os ETR protegem as plantas contra doenças, estresses, como a seca, o frio, as chuvas ácidas e metais pesados (HU et al., 2016). Os ETR também estão associados a efeitos positivos no crescimento e produção de grãos, oleaginosas e árvores frutíferas (HU et al., 2004). No entanto, não se sabe ao certo os efeitos reais e diretos desses elementos na estrutura vegetal.

Trabalhos recentes trazem resultados relevantes com o uso de microscopia eletrônica na localização de ETR na célula, bem como a alteração de organelas (OLIVEIRA et al., 2015; RICO, PERALTA, 2015; WANG et al., 2014). No entanto, são escassos os trabalhos mostrando como a anatomia quantitativa vegetal pode contribuir para esclarecer o modo de ação dos ETR nos tecidos foliares e radiculares. Assim, para que esses elementos tenham a sua ação elucidada, são necessários estudos anatômicos que demonstrem os efeitos desses

elementos nas estruturas que afetam diretamente a fotossíntese, consequentemente, na performance produtiva do vegetal.

Visto que o Brasil é um dos maiores produtores agrícolas mundiais e consumidor de fertilizantes fosfatados, além de um importante exportador de *comodities* agrícolas, os quais são amplamente consumidos como base da alimentação em muitos países. No entanto, os efeitos dos ETR sobre as culturas agrícolas ainda permanecem sem esclarecimento (THOMAS et al., 2014). Neste sentido, o presente estudo teve por objetivo avaliar os efeitos da aplicação de ETR sobre a anatomia de plantas cultivadas (arroz, trigo, milho e feijão), uma vez que a estrutura vegetal reflete diretamente a eficiência produtiva das plantas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.2 Elementos terras raras

Os Elementos Terras Raras (ETR) tornaram-se importantes do ponto de vista industrial devido à sua relativa escassez, demanda mundial crescente, além de não serem substituíveis. Houve um interesse crescente no estudo dos ETR nos últimos anos, basicamente pelas aplicações na indústria moderna. O conjunto dos ETR compreende o grupo dos lantanídeos com número atômico entre $Z=57$ e $Z=71$ na tabela periódica, incluindo também o ítrio e escândio (IUPAC). Tais elementos são membros do bloco F da tabela periódica, compartilhando uma série de propriedades físicas que os tornam inestimáveis para tecnologias críticas (RIM, 2016).

Os ETR possuem propriedades especiais em relação ao magnetismo, eletrônica e luminescência. Estes elementos são divididos em dois grupos distintos: leves (Light Rare Earth Elements) e pesados (Hard Rare Earth Elements). Os leves compreendem: La, Ce, Pr, Nd, Pm e Sm, os quais são encontrados em maior quantidade no ambiente, apresentam massas atômicas menores, além de maior solubilidade e alcalinidade (MIGASZEWSKI; GALUSZKA, 2014). Por outro lado, o Ministério da Terra e Recursos da China refere-se ao samário, európio e gadolínio (números atômicos 62 a 64, respectivamente) como elementos médios (Medium Rare Earth Elements) (LIU,TAN,HU., 2016). O promécio é o único que não tem ocorrência natural, pois é um produto de fissão de urânio (MULLER, SCHWEIZER, SEILER, 2016).

O grupo formado por esses elementos constitui o décimo quinto mais abundante. Dentre os ETR, os mais abundantes são o cério (Ce) e o ítrio (Y), sendo encontrados mais frequentemente na crosta terrestre do que o chumbo, molibdênio ou arsênio (PANG, LI, PENG, 2002). Tais elementos são muito

parecidos quimicamente e fisicamente, devido à sua configuração eletrônica (estado de oxidação "+3"), particularmente estável, com exceção do Ce e Eu (estados de oxidação "+4" e "+2", respectivamente) (ALONSO et al., 2012). Com relação à sua distribuição natural, mostram regularidade e seguem a Regra Oddo-Harkins, em que elementos com um número atômico uniforme (Ce, Nd, Sm, Gd, Dy, Er e Yb) são mais abundantes, além de diminuir os conteúdos com um aumento da massa atômica (CHEN, 2011).

Segundo Fernandez (2017), os primeiros relatos da descoberta dos elementos terras raras na Suécia datam de 1787, quando Karl Arrhenius, um tenente do exército sueco, coletou o mineral preto próximo à vila de Ytterby. Somente em 1794, um óxido de ítrio impuro foi isolado a partir mineral pelo químico finlandês Johann Gadolin nomeando-a Ytterby que, posteriormente, foi renomeado como ítrio pelo químico sueco Anders Gustav Ekeberg. Com o avanço na tecnologia de separação, o cério foi preparado pela primeira vez em 1827 pelo químico sueco e mineralogista Carl Mosander. Os elementos em forma pura foram preparados pela primeira vez em 1931. No entanto, seus usos foram modestos até as melhorias na separação e as tecnologias metalúrgicas que ocorreram na década de 1950 (US GEOLOGICAL SURVEY, 2013).

De acordo com os dados compilados na revisão de Ramos et al. (2016), outra versão afirma que o primeiro registro ocorreu em 1751, quando o químico sueco Axel Frederik Cronstedt descobriu uma pedra em Bastnas na Suécia, em que Martin Heinrich Klaproth e Jons Jacob Berzelius juntamente com Wilhelm Hisinger em 1803, isolaram uma "terra" que chamaram de Cerium (ROBINSON, BASTRON, MURATA, 1958). Com o avanço das pesquisas e das novas tecnologias, descobriu-se que estas duas "terras" (ítrio e cério) eram uma mistura complexa de vários elementos.

Os ETR receberam a denominação genérica "terra" por se tratar de óxidos metálicos e o termo "raro" em virtude desses elementos ocorrerem associados a minerais, além de difícil separação. Deste modo, os ETR não são necessariamente raros, por serem encontrados em quase todas as formações rochosas (TYLER, 2004), remetendo a uma ideia errônea, não sendo de fato escassos, visto sua abundância relativa na crosta terrestre. Como exemplo, o elemento túlio ($0,5 \text{ mg kg}^{-1}$) e lutécio ($0,8 \text{ mg kg}^{-1}$) que são os menos abundantes na crosta terrestre, são mais abundantes que a prata ($0,07 \text{ mg kg}^{-1}$) e o bismuto ($0,008 \text{ mg kg}^{-1}$) (MARTINS; ISOLANI, 2005). O grupo recebe o nome por estes elementos estarem distribuídos e a concentração dos mesmos em minério ser baixa, onde a maioria dos depósitos contém menos de 1% de ETR e não ultrapassando 9%. Além disso, a extração e processamento é difícil e dispendiosa, devido em parte às suas semelhanças químicas já mencionadas e a maioria desses elementos não serem extraídos como produtos primários, mas obtidos como subprodutos.

Existem aproximadamente 34 países do mundo com reservas para a exploração mineral de ETR (CHEN, 2011). De acordo com o US Geological Survey (USGS) Commodity Mineral (2016), reservas de ETR em todo o mundo são estimadas em 130 milhões de toneladas. A China (aproximadamente 55 milhões de toneladas) e Brasil (aproximadamente 22 milhões de toneladas) possuem grandes reservas, correspondentes a 42,3% e 16,9% do total mundial, respectivamente, e seguidos pela Austrália (aproximadamente 3,2 milhões de toneladas) (FERNANDEZ, 2017; JORJANI; SHAHBAZI, 2012). Quanto à produção, o USGS Mineral Commodity mostrou que, das 124 mil toneladas produzidas em 2015, a China contribuiu com 87,5%, seguido pela Austrália (8,3%), Estados Unidos (3,4%), Rússia (2,1%), Tailândia (1,7%) e Malásia (0,2%). Além de maior produtor, a China lidera o consumo com cerca de 60% em 2015 (LAURENT, 2015). China's Rare Earth Industry Association estima que

o consumo de ETR da China ainda aumentará de 98.000 toneladas em 2015 para 149.000 toneladas em 2020 (USGS, 2016). Nota-se que, apesar de ter a segunda maior reserva mundial, o Brasil não corresponde à esta posição, na produção e consumo.

Os ETR estão presentes no cotidiano em muitas aplicações tecnológicas, como geradores eólicos, baterias de veículos híbridos, *display* de celulares e TVs, imãs, equipamentos médicos, entre outras aplicações fazendo com que sua demanda continue em ascensão (TYLER, 2004). Além disso, a mineração ilegal e o tráfico de ETR são problemas generalizados na China, e tal monopólio tem elevado os preços desses elementos e levantado preocupações de que possa afetar suas reservas e o fornecimento (LIU, TAN, HU, 2016; MANCHERI, 2015). Durante 2001 - 2015, o consumo médio do Japão atingiu 148,5 kg por 1000 habitantes, seguido pelos EUA com 50,4 kg por 1000 habitantes e China com 48,1 kg por 1000 habitantes. Ao longo do período de 1972-2010, a média de preços de bastnasita e monazita por quilo em 2015, foram de USD 5,7 e 1,4, respectivamente (FERNANDEZ, 2017).

Na China existe a comercialização de fertilizantes enriquecidos com ETR, e diversos estudos mostrando ganhos de produtividade em várias espécies vegetais e animais. Nesse país, os fertilizantes contendo ETR são compostos por nitratos, cloretos e mistura NPK: 25-28% de óxido de lantânio (La_2O_3), 49-51% de dióxido de cério (CeO_2) e 15-17% de óxido de neodímio (Nd_2O_3) (XIONG, 1995). São três os tipos de fertilizantes mais difundidos: 1) Changle: nitratos; 2) Nongle: cloreto e óxidos; e, 3) MAR: complexo com aminoácidos (EL-RAMADY, 2010). Em 1986, Changle foi registrado como o primeiro fertilizante comercial enriquecido com ETR na China. Changle e Nongle foram geralmente recomendados em doses de 400-700 g ha^{-1} , dissolvido em água. Nos anos subsequentes, outros fertilizantes foram utilizados na forma de composto de bicarbonato de amônio (GUO, 1995), onde a indústria de fertilizantes chinesa foi

capaz de produzir um total de 5 milhões de toneladas de fertilizantes de carbonato de amônio para suprir as necessidades de 6,68 milhões de hectares de terras agrícolas. MAR contém 17 aminoácidos em conjunto com os elementos La, Ce, Pr e Nd. Além disso, fertilizantes compostos NPK e fertilizantes líquidos com adição de ETR e outros microelementos ou pesticidas foram desenvolvidos (XIONG et al., 2000).

Há um número relativamente baixo de investigações sobre ETR, em comparação com outros grupos de elementos, em vários aspectos ambientais (TYLER, 2004). Isto se deve, inicialmente a problemas analíticos, tanto a falta de equipamento adequado e falta de materiais de referência (CAO et al., 2000). No entanto, o aumento da produção, associado à demanda e ao aumento da concentração no solo impulsionou o avanço e desenvolvimento de novas tecnologias. Com relação aos métodos de quantificação, espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS), tem sido usado efetivamente para medir o conteúdo de elementos individuais de terras raras em amostras biológicas e ambientais (XU et al., 2003).

2.2 Efeitos de ETR em plantas

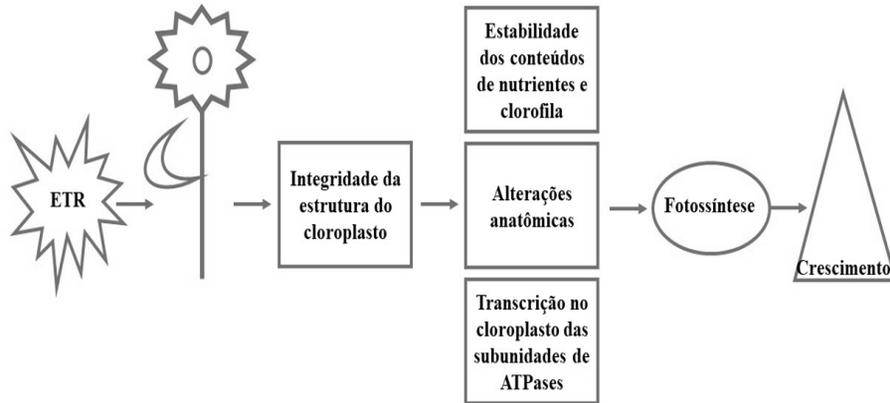
O entendimento sobre a função biológica dos ETR está em seus estágios iniciais (SKOVRAN; MARTINEZ-GOMEZ, 2015). Embora estes elementos ainda não tenham sido classificados como essenciais, benéficos ou tóxicos, várias hipóteses têm sido propostas para a atuação dos mesmos no crescimento e desenvolvimento das plantas, tanto no nível metabólico, estrutural e citogenético, quanto na questão ambiental (RAMOS et al., 2016a). Isso foi atribuído ao comportamento desses metais no ambiente, determinados pelas suspeitas de acumulação e, possivelmente, entrada na cadeia alimentar. Assim, os

mecanismos de assimilação, transporte e acúmulo em plantas vasculares são ainda pouco conhecidos.

Estudos na década de 1980 sobre a adição desses elementos em fertilizantes, em uma área de 0,5 milhões de ha, mostraram aumento na qualidade e no rendimento de várias espécies de plantas, incluindo cereais, frutas e legumes, com respostas positivas das plantas, da ordem de 5 a 15% resultante da aplicação desses elementos (XIONG, 1995). Alguns efeitos dos ETR em plantas estão relacionados principalmente a mudanças fisiológicas como: aumento da atividade enzimática, aumento no conteúdo de clorofila e na taxa fotossintética, aumento da resistência à fatores ambientais, além dos efeitos sinérgicos e antagônicos na absorção de nutrientes como N, K e P. As hipóteses que sustentam os efeitos benéficos dos ETR no metabolismo das plantas vão desde o estímulo no sistema antioxidante, à absorção de nutrientes, à fixação de nitrogênio e CO₂ e à potencialização da produção de biomassa pelo aumento da taxa fotossintética, devido ao aumento da taxa de transporte de elétrons na fase fotoquímica da fotossíntese (RAMOS et al., 2016). No entanto, os mecanismos responsáveis pelas interferências causadas por ETR ainda não estão claros (FIGURA 1).

Também, foi relatado que altas concentrações de ETR diminuem significativamente a taxa fotossintética e teor de clorofila (CHATURVEDI, GANNAVAPARU, KUMAR, 2014.; SHYAM; AERY., 2012; WANG et al., 2014). Nesse caso, os ETR podem entrar nas células de plantas e serem depositados nos cloroplastos, podendo danificar sua estrutura, afetando negativamente fotossíntese e, conseqüentemente, o crescimento das plantas (GUO, 2014.; WANG et al., 2014).

Figura 1- Interferência de ETR na fotossíntese.



Fonte: Adaptado de Hu et al., 2016

De acordo com os dados compilados por Ramos et al.(2016) e pelos dados de Oliveira et al. (2015), existem também hipóteses dos efeitos dos ETR nas alterações estruturais dos vegetais (substituição de Ca na estrutura da parede celular, em citoesqueleto e em membranas de organelas, alteração no tamanho e densidade de estruturas anatômicas tais como estômatos, tricomas, e espessura do tecidos); citogenético (aumento do índice mitótico, anomalias do ciclo celular que beneficiam a produção de biomassa, tais como o aparecimento de células binucleadas).

Também, é importante relatar que a produção de fitohormônios é afetada pela presença de ETR e esta interação tem sido proposta como um dos mecanismos pelos quais estes elementos podem influenciar o crescimento das plantas (LUO, ZHANG, WANG, 2008; RAMOS et al., 2016; WANG et al., 2014). Os ETR têm efeito positivo na eficiência do uso da água pelas plantas devido a um aumento do teor de prolina, um aminoácido com uma alta capacidade de hidratação (WANG et al., 2012; RAMOS et al., 2016), eliminando espécies

reativas de oxigênio (EROs) e promovendo a inibição da peroxidação lipídica (WANG et al., 2014).

Assim, as avaliações anatômicas são pertinentes no entendimento das alterações histológicas desencadeadas pela aplicação de ETR em plantas. Tais modificações, quando associadas aos parâmetros fotossintéticos e dados de produtividade podem complementar o entendimento do comportamento dos elementos em cada espécie. Da mesma maneira, a literatura é vasta quando se trata de avaliar os efeitos de outros elementos ou metais pesados sobre características anatômicas de espécies variadas. No entanto, são extremamente escassos os estudos envolvendo anatomia vegetal e os ETR.

2.3 Geoquímica dos elementos terras raras

Os ETR são amplamente utilizados em petrologia e sedimentologia para rastreamento geoquímico, caracterizados por processos naturais ou em estudos ambientais como indicadores de fontes de poluição geogênica ou antropogênica. Estes elementos também podem mostrar processos geoquímicos sutis em sistemas naturais (ZHOU et al., 2010). O conteúdo de ETR naturalmente encontrado nos solos depende basicamente do material de origem, bem como de processos geoquímicos e biológicos que nele ocorrem. Os solos originados de rochas ígneas, xisto e arenito, tendem a conter mais ETR quando comparados aos demais, sendo a bastnaesita o depósito de ETR mais importante no mundo (RAMOS et al., 2016 b).

Um dos minerais de maior relevância como portador de elementos terras raras é a monazita, o qual é encontrado em rochas ígneas exploradas para a produção de fertilizantes fosfatados. Desta maneira, as rochas fosfáticas exploradas no Brasil podem apresentar elevados teores de elementos terras raras

em sua constituição química, sendo esta composição dependente da localidade onde a matéria-prima é extraída. Assim, os fertilizantes fosfatados produzidos no Brasil, especialmente nas unidades industriais de Catalão-GO e Araxá-MG, o ácido fosfórico e subprodutos como fosfogesso podem portar grandes quantidades de ETR nos sistemas agrícolas.

Embora quase não haja exploração em larga escala de minerais de terras raras no Brasil, as fontes são significativas e ocorrem principalmente em associação com complexos carbonáticos (ANTONIASSI et al., 2015). Os fertilizantes agrícolas são insumos agropecuários fundamentais para assegurar a produção de alimentos com qualidade e em quantidade suficiente para atender às necessidades da população. Em cálculos realizados por Ramos et al. (2016 b) os fertilizantes fosfatados possivelmente adicionaram 12 mil toneladas de Ce aos solos brasileiros em 2014, valores esses muito próximos da quantidade de micronutrientes aplicados na agricultura brasileira.

2.4 As Culturas

Quatro importantes culturas agrícolas foram utilizadas neste trabalho, devido ao amplo cultivo destas no Brasil e pela elevada demanda de fertilizantes fosfatados que estas exigem para o seu cultivo. Possivelmente, essas culturas estão recebendo, indiretamente, grandes quantidades de ETR. Porém, os efeitos dos ETR sobre as plantas e os mecanismos de ação desses elementos ainda não são conhecidos para a maioria das espécies cultivadas.

2.4.1 Arroz

O arroz (*Oryza sativa* L.) pertence à família Poaceae, sendo responsável por alimentar mais da metade da população mundial. É a terceira maior cultura cerealífera, apenas ultrapassada pelo milho e trigo. Acredita-se que o arroz seja cultivado há 12 mil anos e tenha originado na China. O arroz é cultivado mundialmente, sendo a Ásia a principal produtora, onde concentra-se mais de 80% da produção mundial. Segundo os dados da FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), em 2014, foram colhidas aproximadamente 13 milhões de toneladas em 2.300 ha no Brasil.

Populações crescentes exigirão maior produção de arroz e estima-se que a demanda atual seja de 500 milhões toneladas. No entanto a produção não tem crescido na mesma proporção. No mundo são 153 milhões de hectares de cultivo, que compõem 11% do total terras aráveis (FAOSTAT, 2014), sendo que a demanda global deverá aumentar 24% no próximos 20 anos, o que exige esforços para aumentar a produção de arroz para garantir a segurança alimentar (LIU et al. 2015), a qual pode ser alcançada pela utilização de fertilizantes, devendo a presença e os efeitos dos ETR serem avaliados.

2.4.2 Milho

O milho (*Zea mays* L.) também pertence à família Poaceae, é extensivamente utilizado como alimento tanto humano quanto animal, devido às suas qualidades nutricionais, uma vez que contém quase todos os aminoácidos conhecidos. Todas as evidências científicas levam a crer que seja uma planta de origem mexicana, já que a sua domesticação começou há cerca de 7.500 anos. A cultura é importante, devido ao seu alto potencial produtivo em

relação aos outros cereais e à ampla adaptabilidade ambiental, além de receber as maiores doses de fertilizantes fosfatados no Brasil. O milho tem importância expressiva no cenário agrícola mundial, dado à extensão de áreas cultivadas, às diferentes formas de uso e ao papel socioeconômico que representa (EMBRAPA, 2015).

O cultivo de milho é altamente beneficiado pela tecnologia e pelas inovações da pesquisa agrícola, sendo um dos principais casos de sucesso da chamada 'revolução verde'. O Brasil é o 3º produtor mundial de milho, ficando atrás de EUA e China (FAO, 2014), sendo que a maior parte da produção se concentra nas regiões Sul, Sudeste e Centro-oeste. No Brasil, que também é um exportador, o Paraná é o maior estado produtor, com cerca de 27% da produção nacional, seguido de Mato Grosso e Minas Gerais. Estima-se que em 2014 foram 79 milhões de toneladas colhidas em 15 milhões de ha (FAOSTAT, 2014). De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, no Brasil apenas 5% do milho produzido se destina ao consumo humano, 65% é utilizado na alimentação animal e 11% é consumido pela indústria, para diversos fins (espessantes, colantes, produção de óleos/etanol).

O plantio ocorre tanto na chamada "safrinha" quanto na safra. Lavouras bem sucedidas apresentam valor médio de germinação na faixa de 95%. A produtividade média varia entre 250 e 350 sacas/ha e as taxas de aplicação de fertilizantes geralmente são desenvolvidas com o objetivo de maximizar os rendimentos. Deste modo, a aplicação de ETR vem acontecendo, todavia, sem avaliar os efeitos desses elementos nessa importante cultura agrícola.

2.4.3 Trigo

O trigo pertence à família Poaceae. Trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma das mais importantes culturas de cereais, com um papel dominante na manutenção da segurança alimentar e da renda dos agricultores. O grão de trigo é um alimento básico, usado na alimentação humana para fabricação de farinha e forragem na alimentação animal. Sua farinha é largamente utilizada na fabricação de pães, massas e biscoitos. A qualidade do grão produzido é que determina a sua utilização pela indústria, em virtude do teor de glúten (CONAB, 2017).

Originário de regiões montanhosas do Sudoeste da Ásia, o trigo foi cultivado na Europa já como um dos mais importantes cereais para alimentação humana. Grãos de trigo carbonizados, que datam de mais de 6 mil anos. Atualmente, cultiva-se trigo de inverno e de primavera, sendo que no Brasil é de hábito primaveril e a maioria das cultivares são insensíveis ao fotoperíodo. O trigo tem a propriedade de manter as suas características de qualidade mesmo quando armazenado por um longo período, desempenhando um papel importante no desenvolvimento das civilizações (EMBRAPA, 1996).

Com o aumento da população e a diminuição das terras aráveis, melhorar o rendimento de grãos é a única maneira de atender à demanda de alimentos. O aumento da produção de grãos ocorre, em parte, devido ao uso de variedades melhoradas, e parcialmente atribuível a uma melhor gestão de nutrientes (GUO, 2009). Em 2003, o consumo mundial per capita de trigo foi de 67 kg. No Brasil, foram colhidas 6 milhões de toneladas em 2 milhões de ha plantados no ano de 2014. Segundo a USDA, em 2015 foram colhidas no mundo 719,8 milhões de toneladas em 221,3 milhões de hectares, sendo a União Europeia a maior produtora (155,4 milhões de toneladas em 26,8 milhões de hectares).

Em busca de produtividade, conteúdo de farinha no grão, teor de nutrientes, resistência a doenças ou adaptação ao clima e ao solo, pesquisadores testaram milhares de cruzamentos, chegando a obter cerca de 30 mil variedades de trigo. O maior volume, porém, vem de três espécies, que representam mais de 90% do trigo cultivado no mundo, sendo *Triticum aestivum* a mais consumida no Brasil, com um teor de proteína em torno de 15%. Além destes estudos que visam à produtividade e qualidade, a aplicação indireta de ETR via fertilizantes necessita ser estudada.

2.4.4 Feijão

Feijão é um nome genérico para uma grande variedade de sementes de plantas de alguns gêneros da família Fabaceae. O “feijão comum” (*Phaseolus vulgaris* L.) é um alimento de alto valor nutritivo. Além de participar da geração de emprego e renda, é uma opção no Brasil para compor os programas de políticas públicas focados na qualidade de vida (SOUZA, 2006). É fonte de nutrientes essenciais como proteínas, ferro, cálcio, vitaminas, carboidratos e fibras. Acredita-se que esse efeito benéfico do consumo do feijão é devido à presença de metabólitos secundários, sendo os que estão presentes em maiores concentrações os compostos fenólicos e os flavonoides.

O feijoeiro, além de ser uma cultura de subsistência, em algumas regiões brasileiras ocupa posição de destaque na agricultura empresarial de alta produtividade e rendimento econômico. O cultivo de feijão no Brasil é realizado em três épocas (água, seca e inverno) e produtividades baixas são comumente observadas, principalmente nas épocas de cultivo de águas e seca em função da tecnologia utilizada, das variações climáticas e do esgotamento progressivo da fertilidade do solo (ZUCARELI et al., 2006). Apesar da enorme importância da

cultura do feijão, o rendimento médio brasileiro é baixo. Mesmo tendo um potencial produtivo superior a 4000 kg/ha, a média brasileira é de apenas 817 kg/ha, sendo altamente influenciada pelo sistema de cultivo. No ano de 2014 no Brasil, foram 3 milhões de ha plantados, gerando uma produtividade de 32 milhões de toneladas. Os Estados Unidos, o Japão, a Turquia e a Itália, têm rendimento médio superior a 1400 kg/ha, de acordo com a FAO (FAOSTAT, 2014).

É uma cultura exigente em nutrientes, sensível aos fatores climáticos e muito suscetível a pragas e doenças. O fósforo é limitante na produtividade do feijoeiro em solos brasileiros. Limitações na disponibilidade de P no início do ciclo vegetativo podem resultar em restrições no desenvolvimento, das quais uma planta não se recupera (SOUTO et al., 2009). Portanto, como a cultura é exigente em adubação fosfatada, os quais podem carrear grandes quantidades de ETR, torna-se necessário estudar os efeitos desses elementos com mais detalhes nessa importante fonte nutricional para os brasileiros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As informações disponíveis na literatura são de fundamental importância em termos de efeitos sobre vegetais e o potencial de utilização de ETR no crescimento e rendimento de culturas. No entanto, ainda há lacunas, principalmente no que diz respeito à concentração para aplicação segura e o que seria considerado tóxico para as plantas, além de mais estudos para desvendar os efeitos fisiológicos e anatômicos que esses elementos podem promover nas plantas. A clara compreensão das relações entre a quantidade absorvida e o conteúdo de ETR nas plantas, e seus efeitos nos vegetais é essencial para elucidar a atuação desses elementos.

Assim, mais estudos são necessários para obter informações adicionais e de precisão sobre os efeitos reais e sobre as doses para uma utilização segura de fertilizantes fosfatados portadores de ETR. Para a utilização de ETR na agricultura, tal como ocorre na China, seus efeitos sobre todas as partes da cadeia alimentar, bem como no meio ambiente devem ser elucidadas.

A anatomia quantitativa vegetal pode contribuir e complementar as pesquisas que tem por finalidade desvendar os mecanismos de ação de ETR. Desta maneira, questões associadas à produção, processamento, utilização de ETR e seus efeitos na produção de alimentos constituem uma área próspera de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, E. et al. Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies. **Environ Science Technology**, Berkeley, v. 46, n. 6, p. 3406–14, 2010.
- ANTONIASSI, J.L. et al. In: Deng F. (Ed.). Assessment and characterization of REE minerals from an alkali-carbonatitic complex. **Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)**. Mianyang, China: Springer Geochemistry /Mineralogy, 2015. P.173-186,
- CAO, X.D., et al. Determination of trace rare earth elements in plant and soil samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry. **Int. J. Environ. Anal. Chem.**, London, v. 76, n. 4, p.295–309, 2000.
- CARPENTER, D., et al. Uptake and effects of six rare Earth elements (REEs) on selected native and crop species growing in contaminated soils. **PLoS One**. San Francisco, 10-21, 2015. Disponível em: <<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0129936>>. Acesso em: 20 de nov. 2017.
- CHATURVEDI, N., GANNAVAPURU, R., KUMAR N. Effect of lanthanum on the growth and physiological activities of Zea mays, Vigna radiata and Vigna mungo. **Int. J. Environ. Sci.** New Delhi, v. 4, n. 5, p. 653-659, 2014.
- CHEN Z. Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. **J. Rare Earths**, Amsterdam, v. 29, n.1, p. 1–6, 2011.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (BRASIL). Aroldo Antônio de Oliveira Netto e Candice Mello Romero Santos (Orgs.) **A cultura do trigo**. Brasília-Conab, 2107. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_05_03_16_09_46_a_cultura_do_trigo_versao_digital_nova_logo.pdf>. Acesso em: em 21 de novembro de 2017.
- EL-RAMADY, H.R.H. **Ecotoxicology of rare earth elements: Ecotoxicology of rare earth elements within soil and plant environments**. VDM Verlag Dr. Muller Aktiengesellschaft & Co. KG 2010.
- EMBRAPA.GUARIENTE, E.M. **Qualidade industrial de trigo**. 2. ed. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1996.

EMBRAPA MILHO E SORGO. Sistema de Produção. 19. ed. Sete Lagoas, Nov., 2015.

EVANS, J. A critical issue. **Chemistry & Industry**, v.11, p.21–23, 2011.

FAO. Maize, rice and wheat: area harvested, production quantity, yield. Rome: **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Statistics Division, 2014.

FAOSTAT: **Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação**. «Preliminary 2014 Data Now Available». Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/?#data/QC>>. Acesso em: em 21 de novembro de 2017.

FERNANDEZ, V. Rare-earth elements market: A historical and financial perspective. **Resources Policy**, Amsterdam, v. 53, p. 26–45, mar, 2017.

GUO, B.S. Present and Future Situation of Rare Earth Research in Chinese Agronomy, In **Proceedings of the 1st International Conference on Rare Earth Development and Applications**, Beijing, Sept, p.10–14, 1985; Science Press: Beijing, 1995; 1522–1526.

GUO, S. F., et al. Effect of La (III) on some physiological index and eltrastructure of honeysucłçe (*Lonicera japônica* Thunb.). **Adv. Mater. Res, Zurich**, vols.864-867, p. 295-298, 2014.

GUO Z.L. et al. Differences of nitrogen efficiency in Henan wheat varieties. **Acta Agric.Boreali-Sin.** Beijing, v. 24, n.2, p. 185–189, 2009.

HU, Z. et al. Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: A Review. **J. Plant Nutr.**, Oxfordshire, v.27, n.1, p.183–220, 2004.

HU, H., et al. Combined effects of simulated acid rain and lanthanum chloride on chloroplast structure and functional elements in rice. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin v,23, n.9, p. 8902–8916, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s11356-015-5962-9>>. Acesso em 27 de out. 2017.

IUPAC. **Nomenclature of Inorganic Chemistry: IUPAC Recommendations**. Cambridge, 2005.

JORJANI E, SHAHBAZI M. The production of rare earth elements group via tributyl phosphate extraction and precipitationstripping using oxalic acid. **Arab. J. Chem. King Saud University**, Riyadh, v. 2, p. 433–59, 2012.

KHAN, S. B et al. Exploration of CeO₂ nanoparticles as a chemi-sensor and photo-catalyst for environmental applications. **Sci. Total Environ**, Amsterdam, v.409, n.,15, p.2987-2992, 2011.

LAURENT, A. **Commodities at a glance: Special issue on rare earths**, n. 5. UNCTAD: Geneva, 2014. Disponível em: <http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2014d1_en.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2017.

LIU, D., WANG, X., CHEN, Z. Effects of rare earth elements and REE-binding proteins on physiological responses in plants. **Protein and Peptide Letters**, Gainesville, v.19, n. 2, p. 198–202, 2012.

LIU, H., et al. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in central China. **Agron for Sustain Development**, Dijon, v. 35, n.1, p. 285-294, 2015.

LIU, H., TAN, D., HU, F., **Rare earhts:shade of gray. Can China continue to fuel your global clean & smart future?** Hong Kong: CWR, 2016. (Report, June, 2016.). Disponível em: <<http://chinawaterrisk.org/wp-content/uploads/2016/07/CWR-Rare-Earths-Shades-Of-Grey-2016-ENG.pdf>>. Acesso em: 04 abr.2017.

LUO, J., ZHANG J., WANG Y. Changes in endogenous hormone levels and redox status during enhanced adventitious rooting by rare earth element neodymium of *Dendrobium densiflorum* shoot cuttings. **J. Rare Earths**, Amsterdam, v. 26, n.6, p. 869–74, 2008.

MANCHERI, N., World trade in rare earths, Chinese export restrictions, and implications. **Resour. Policy**, Amsterdam, v. 46, 262–271, 2015.

MARTINS, T.S.; ISOLANI, P.C. Terras raras: aplicações industriais e biológicas. **Química Nova**, v. 28, p. 111-117, 2005.

MIGASZEWSKI ZM, GAŁUSZKA A. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: A Review. **Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.**, Oxford, 45, n. 5, p. 429– 471, 2014.

MULLER, M. A., SCHWEIZER, D., & SEILER, V. **Wealth Effects of Rare Earth Prices and China's Rare Earth Elements Policy. Journal of Business**

- Ethics**, v. 138, n.4, p.627–648, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s10551-015-2773-3>>. Acesso em: 12 maio 2017.
- OLIVEIRA, C. et al. Bioaccumulation and effects of lanthanum on growth and mitotic index in soybean plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v, 122, p.136–144, 2015. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.07.020>>. Acesso em: 12 maio 2017.
- PANDA, R., et al. Leaching of rare earth metals (REMs) from Korean monazite concentrate. **J. Ind. Eng. Chem.** Amsterdam, v.20, p. 2035-2042, 2014.
- PANG, X. LI D, PENG A. Application of rare-earth elements in the agriculture of China and its environmental behavior in soil. **Environ. Sci. Pollut. Res. Int.**, Berlin, 9, n. 2, p. 143–8, 2002.
- RAMOS, S. J. et al. Rare Earth Elements in the Soil Environment. **Current Pollution Reports**, Amsterdam, v.2, n.1, p.28–50, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s40726-016-0026-4>>. Acesso em: 12 março 2017.
- RAMOS, S. J. Rare earth elements in raw materials and products of the phosphate fertilizer industry in South America: Content, signature, and crystalline phases. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v.168, p. 177-186, 2016. Disponível em: <doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.009>. Acesso em: 12 mar. 2017.
- RICO, C. M., PERALTA-VIDEA, J. R., GARDEA-TORRESDEY, J. L. Differential Effects of Cerium Oxide Nanoparticles on Rice, Wheat, and Barley Roots: A Fourier Transform Infrared (FT-IR) Microspectroscopy Study. **Applied Spectroscopy**, Thousand Oaks, v.69, n.2, p.287–295, 2015. Disponível em: <<http://doi.org/10.1366/14-07495>>. Acesso em: 30 mar. 2017.
- RIM, K.T. Effects of rare earth elements on the environment and human health: A literature review. **Toxicology and Environmental Health Sciences**, Berlin, v.8, n3, p.189–200, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s13530-016-0276-y>>. Acesso em: 30 mar. 2017.
- ROBINSON, W.O., BASTRON H., MURATAET, K.J. Biogeochemistry of the rare earth elements with particular reference to hickory trees. **Geochim, Cosmochim.** Acta, Amsterdam, v,14, p,55–67, 1958.
- SHYAM, R. AERY, N. Effect of cerium on growth, dry matter production, biochemical constituents and enzymatic activities of cowpea plants (*Vigna unguiculata* L.) Walp.). **J. Soil Sci. Plant Nutr.** Temuco, v.12, n. 1, p, 1-14, 2012.

- SKOVRAN, E., MARTINEZ-GOMEZ, N.C. Just add lanthanides. **Science**, Washington, DC, v. 348, p. 862–863, 2015. Disponível em: <doi:10.1126/science.aaa9091>. Acesso em: 30 mar. 2017.
- SOUTO, J. A. et al. Efeito da aplicação de fósforo no desenvolvimento de plantas de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L) millsp). **Revista Verde, Mossoró**, v.4, n. 1, p. 135-140, 2009.
- SOUZA, R. F. de. et al. Nutrição fosfatada e rendimento do feijoeiro sob influência da calagem e adubação orgânica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.30, n. 4, p. 656-664, 2006.
- THOMAS, P.J., et al. Rare Earth elements (REE): effects on germination and growth os selected crop and native plant species. **Chemosphere**, Oxford, v.96, p.57-66, 2014.
- TYLER, G. Rare earth elements in soil and plant systems: a review. **Plant Soil.**, Berlin, v.267, n.1e 2, p.191–206, 2004.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Metal prices in the United States through 2010: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report** ,2012–5188. Reston, VA, 2013. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/sir/2012/5188>>. Acesso em: 30 mar. 2017.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY **Mineral commodity summaries 2015: U.S. Geological Survey. Reston, VA: USGS, 2016**
- WANG, L. et al. Combined effects of lanthanum (III) chloride and acid rain on photosynthetic parameters in rice. **Chemosphere**, Oxford, v.112, p.355–61, 2014.
- WANG, X. et al. Cerium toxicity, uptake and translocation in *Arabidopsis thaliana* seedlings. **J. Rare Earths The Chinese Society of Rare Earths**, Beijing, V. 30, p, 579–85, 2012.
- XIONG, B. K. Application of rare earths in Chinese agriculture and their perspectives of development. In: **Rare earths in agricultural sciences**. Carlton South: Australian Academy of Technology and Engineering, 1995. p. 3–9.
- XIONG, B.K. et al. **Rare Earth Element Research and Applications in Chinese Agriculture and Forest** (in Chinese). Beijing, China: Metallurgical Industry Press, 2000.

XU, X. K. et al. Distributions of rare earths and heavy metals infield-grown maize after application of rare earth-containing fertilizer. **Sci. Total Environ.** Amsterdam, v. 293, p. 97–105, 2002.

XU, X., ZHU, W., WANG, Z., & WITKAMP, G. Accumulation of rare earth elements in maize plants (*Zea mays L.*) after application of mixtures of rare earth elements and lanthanum. **Plant and soil**, 267–277, 2003.

ZHOU, J. et al. Effects of LaCl₃ on photosynthesis and the accumulation of tanshinones and salvianolic acids in *Salvia miltiorhiza* seedlings. **J. Rare Earths**, Amsterdam, v. 29, p.494-498, 2011.

ZUCARELI, C. et al. Adubação fosfatada, componentes de produção, produtividade e qualidade fisiológica em sementes de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, Pelotas, RS, v. 28, n. 01, p. 5-15.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO 1
INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS TERRAS RARAS NA ANATOMIA
FOLIAR DE ARROZ, MILHO E TRIGO

RESUMO

Os elementos terras raras (ETR) são amplamente utilizados em produtos de alta tecnologia e, também na agricultura, principalmente na China, onde são comercializados fertilizantes enriquecidos com ETR. No Brasil, os fertilizantes fosfatados são considerados portadores indiretos de ETR, sendo esses elementos aplicados em diversas culturas. No presente estudo, três importantes culturas agrícolas foram utilizadas, devido ao amplo cultivo e pela elevada demanda de fertilizantes fosfatados que exigem para os seus cultivos. Assim, este estudo objetivou avaliar as alterações anatômicas foliares em função da aplicação de uma mistura de ETR em plantas de *Oryza sativa*, *Zea mays* e *Triticum aestivum*. Foram realizados três experimentos, sendo as culturas cultivadas até a produção de grãos. As doses utilizadas nas aplicações foliares, a partir de uma solução “MIX” de ETR (La, Ce, Pr e Nd) para o arroz foram as seguintes: 0; 0,1; 0,25; 0,5 e 1 kg ha⁻¹; para milho: 0; 0,1; 0,3; 0,6 e 1,2 kg ha⁻¹; para o trigo: 0; 0,1; 0,3; 0,6, 1,2, 2,4 e 4,8 kg ha⁻¹. Para as avaliações anatômicas, o material foi fixado em F.A.A._{70%}, armazenado em etanol 70% e submetidas à desidratação etanólica para posterior infiltração e inclusão em hidroxietil-metacrilato Leica®. As secções transversais foram realizadas com auxílio de micrótomo rotativo, cujo material obtido foi incorporado a lâminas permanentes. As secções paradérmicas de milho e trigo foram feitas a partir de impressão das faces foliares. Os dados histométricos obtidos tiveram as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott, com 5% de significância com auxílio do software Sisvar. Em arroz, a aplicação de ETR causou o espessamento das epidermes, reduções das espessuras do mesofilo, diâmetro de metaxilema, área do feixe. Diferentemente dos resultados observados para o arroz, a aplicação de ETR proporcionou aumento de tecidos foliares nas plantas de milho: epidermes, mesofilo, no diâmetro de metaxilemas, na área dos feixes vasculares e na área das células crivadas. Nos índices estomáticos, apenas na face adaxial houve redução acompanhada pela densidade dos estômatos. Em trigo, de maneira mais evidente, as reduções nas espessuras dos tecidos foram em: epidermes, mesofilo, diâmetro do metaxilema, área dos feixes, na área de células crivadas e na área das células buliformes. Já os diâmetros dos estômatos da face abaxial reduziram, houve aumento no índice estomático acompanhado pela densidade estomática. Para pesquisas futuras, sugere-se focar em concentrações até 0,3 kg ha⁻¹ para as três culturas, tendo seu limite de aplicação e evitar efeitos relacionados à toxicidade do vegetal.

Palavras-chave: Fertilizantes. *Oryza sativa*. *Triticum aestivum*. *Zea mays*.

ABSTRACT

The rare earth elements (REE) are widely used in high technology products and in agriculture, mainly in China, where REE-enriched fertilizers are commercialized. In Brazil, phosphate fertilizers are considered indirect carriers of REE, and these elements are applied in different crops. In the present study, three important crops were used because their wide cultivation and high demand for phosphate fertilizers. Thus, the aim of this study was to evaluate the foliar anatomical changes depending on a REE mixture application in *Oryza sativa*, *Zea mays* and *Triticum aestivum* plants. Three experiments were carried out and the crops were grown until the production of grains. The doses used in leaf applications from a "MIX" solution of REE (La, Ce, Pr and Nd) for rice were: 0; 0.1; 0.25; 0.5 and 1 kg ha⁻¹; for maize: 0; 0.1; 0.3; 0.6 and 1.2 kg ha⁻¹; and for wheat: 0; 0.1; 0.3; 0.6, 1.2, 2.4 and 4.8 kg ha⁻¹. For the anatomical evaluations, the material was fixed in F.A.A._{70%}, stored in 70% ethanol and submitted to ethanolic dehydration for subsequent infiltration and inclusion in hydroxyethyl methacrylate Leica®. The cross sections were made with the rotating microtome aid, and the material was incorporated into permanent slides. The paradermic sections of corn and wheat were made from the leaf face impression. The mean of the histometric data were compared using the Scott-Knott test, with 5% of significance using the Sisvar software. In rice, the REE application caused the thickening of the epidermis, reductions in the thickness of the mesophyll, diameter of the metaxylem, and bundle area. Differently from the results observed for rice, the application of REE provided increase of foliar tissues in maize plants: epidermis, mesophyll, diameter of metaxilems, vascular bundle area and sieve cell area. In the stomatal index, only on the adaxial epidermis there was a reduction followed by the stomata density. In wheat, the most evident reductions in tissues thickness were: epidermis, mesophyll, metaxylem diameter, bundles area, sieve cell area, and bulliform cells area. The stomata diameter of the abaxial epidermis decreased and there was an increase in the stomatal index followed by the stomata density. For future researches, it is suggested to focus on concentrations up to 0.3 kg ha⁻¹ for the three crops, limiting the application and avoiding effects related to vegetable toxicity.

Keywords: Fertilizers. *Oryza sativa*. *Phaseolus vulgaris*. *Triticum aestivum*. *Zea mays*.

INTRODUÇÃO

Os elementos terras raras (ETR) são 17 elementos da tabela periódica divididos em dois subgrupos, denominados leves (Light Rare Earth Elements) e pesados (Hard Rare Earth Elements) em função de seus raios iônicos (PANG, LI, PENG, 2002). Esses elementos estão na lista de matérias-primas "críticas" pela União Européia, Japão e EUA devido à ampla gama de aplicações e demanda, principalmente em produtos de alta tecnologia (XIE et al., 2014). Os ETR são maleáveis, dúcteis e considerados ótimos condutores elétricos, o que permite sua aplicação em vários segmentos industriais, como automotivo, nuclear, petrolífero, eletrônico, militar, metalúrgico e energia renovável (MASSARI; RUBERTI, 2013). São também considerados "críticos" em virtude dos riscos de falta de oferta e devido aos seus impactos na economia serem maiores do que da maioria das outras matérias-primas. Neste sentido, esses elementos se tornaram um objeto de grande interesse nos últimos anos (SUN et al., 2015).

Segundo Ramos et al. (2016), os ETR estão associados às rochas utilizadas para a produção de fertilizantes fosfatados, sobretudo encontrados em quantidades maiores em rochas ígneas. Além da aplicação industrial, esses elementos vêm sendo aplicados na agricultura, principalmente na China, onde são comercializados fertilizantes enriquecidos com ETR (LIU et al., 2012). Conseqüentemente, esses elementos são encontrados em quantidades significativas em diversos fertilizantes comercializados no Brasil e no mundo. Assim, os fertilizantes fosfatados são considerados portadores indiretos de ETR e, possivelmente, estão sendo aplicados quantidades significativas de ETR no sistema agrícola brasileiro. Como exemplo, para solos brasileiros, estima-se que cerca de 10,5 mil toneladas de ETR são aplicadas anualmente no solo via fertilizantes fosfatados (RAMOS et al., 2016). Diversos estudos realizados na China mostram ganhos de produtividade e qualidade dos alimentos associados aos ETR (RIM, 2016), fato ainda pouco estudado em outros países.

Apesar do crescente número de estudos referentes aos efeitos de ETR no crescimento das plantas, não há relatos concretos do real funcionamento desses elementos em promover o crescimento das plantas. Há relatos que os ETR podem regular o crescimento vegetal através da mudança da distribuição de enzimas e afetar significativamente a estabilidade de membranas (HU et al. 2004 ; XU et al. 2012). Foi relatado também que os ETR podem inibir a acumulação de metais nas células vegetais, diminuindo a causa da toxicidade ou promovendo a síntese de açúcares solúveis, proteínas, lipídios e aminoácidos na planta para quelar os metais pesados e impedi-los de causar toxicidade às plantas (WANG et al., 2012). No entanto, estudos sobre as alterações anatômicas ocasionadas pela aplicação de ETR são escassos na literatura atual. Tais estudos poderiam contribuir para o entendimento de efeitos ETR, bem como contribuir para estudos relacionados a outros elementos, como por exemplo, os metais pesados.

O arroz (*Oryza sativa* L.) é responsável por alimentar mais da metade da população mundial (FAO, 2014). O milho (*Zea mays* L.) é uma importante cultura agrícola, que para expressar o seu potencial produtivo recebe elevadas doses de fertilizantes fosfatados (EMBRAPA, 2015). *Triticum aestivum* é um alimento básico, usado para a alimentação humana e animal (CONAB, 2017). Com o aumento da população e demanda por alimentos, melhorar o rendimento de grãos é uma maneira de atender à demanda por alimentos, o que, conseqüentemente, necessita maior aplicação de fertilizantes para garantir a produção. No entanto, nenhum estudo de campo foi consolidado mostrando possíveis alterações estruturais da planta de arroz, milho e trigo em função da utilização de ETR.

As análises anatômicas podem contribuir para o melhor entendimento de como os ETR modificam as estruturas vegetais e agem nas plantas. Assim, o presente estudo objetivou avaliar as alterações anatômicas foliares em função da aplicação de uma solução de ETR em plantas de *Oryza sativa*, *Zea mays* e *Triticum aestivum*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados três experimentos de campo, sendo arroz e trigo conduzidos na fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) no município de Lambari-MG. Enquanto o experimento com o milho foi conduzido no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária da UFLA (CDCT) – Fazenda Muquém, no município de Lavras-MG. As propriedades químicas das áreas de plantio são apresentadas nos anexos 1. Para as três culturas agrícolas, o delineamento experimental foi em blocos casualizados, foram utilizadas 4 repetições por tratamento, sendo essas culturas cultivadas até a produção de grãos.

As doses aplicadas via foliar, a partir de uma solução “MIX” de ETR (todos na forma sais puros de nitratos) contendo lantânio, cério, praseodímio e neodímio nas concentrações 23,95%, 41,38%, 4,32% e 13,58% respectivamente, conforme indicado por Wen et al., 2001. Para o arroz, foram utilizados os seguintes tratamentos: 0; 0,1; 0,25; 0,5 e 1 kg ha⁻¹ do Mix de ETR. No milho, foram utilizados: 0; 0,1; 0,3; 0,6 e 1,2 kg ha⁻¹ do Mix de ETR. Já para o trigo foram utilizados os tratamentos: 0; 0,1; 0,3; 0,6, 1,2, 2,4 e 4,8 kg ha⁻¹ do Mix de ETR. Foram instaladas 24 parcelas para o arroz e milho, e 32 parcelas para o trigo. As parcelas experimentais consistiram em quatro linhas (com comprimento de 5m), cada uma contendo 0,34 m, 0,17 m e 0,70 m entre plantas igualmente espaçadas, respectivamente para arroz, milho e trigo.

Todas as adubações foliares com ETR foram realizadas no período de pré-floração, em que o potencial de rendimento de grãos é determinado (ARAUS et al., 2012). As três espécies estudadas, receberam o volume de calda de 400 L ha⁻¹. As adubações com o nitrogênio foram equivalentes para todos os tratamentos e culturas agrícolas. As adubações de base e de cobertura, assim como o controle de plantas invasoras e pragas, foram realizadas de acordo com

recomendações da 5ª aproximação do Manual de adubação e calagem de Minas Gerais e ainda balizados em publicações referentes para cada cultura da Empresa Brasileira de Pesquisa em Agropecuária – EMBRAPA.

2.1 Análises anatômicas

Para as avaliações anatômicas, o material foi coletado no estádio fenológico de enchimento de grãos. As amostras foliares (0,5cm x 0,5cm) foram retiradas da região mediana e fixadas em F.A.A._{70%} (formaldeído, ácido acético e etanol 70% na proporção de 1:1:18), posteriormente armazenado em etanol 70% (JOHANSEN, 1940). Para confecção do laminário, as amostras de folha já fixadas foram submetidas à série de desidratação etanólica (70%, 90% e 100%), permanecendo por duas horas em cada uma das soluções. Após essa etapa, as amostras foram infiltradas e incluídas em Kit Historesina de hidroxietilmetacrilato (Leica®, Heidelberg, Alemanha), seguindo as instruções propostas pelo fabricante. As secções transversais foram realizadas com auxílio de micrótopo semiautomático rotativo (KD-3368, Ciencor Scientific, São Paulo, Brasil), com a espessura ajustada para 8 µm. Esse material foi corado com azul de toluidina 1% e as secções montadas em lâmina e lamínula com bálsamo do Canadá (O'BRIEN, FEDES, MCCULLY, 1964). As secções paradérmicas de milho e trigo foram feitas através de impressão das faces abaxial e adaxial com auxílio de cola resina cianoacrilato.

As lâminas foram observadas em microscópio trinocular (CX31, Olympus Tokyo, Japan) com sistema de captura acoplado, sendo digitalizadas e analisadas em software de análise de imagem UTHSCSA-Imagetool. As avaliações anatômicas quantitativas, foram realizadas em 4 repetições para cada tratamento, sendo confeccionada uma lâmina por repetição, fotografadas cinco secções por lâmina e mensurados quatro campos por imagem. Nas amostras de arroz foram mensurados os seguintes tecidos/estruturas foliares: espessura da

epiderme em ambas as faces, espessura do mesofilo, diâmetro do metaxilema, área do feixe vascular, área de células buliformes, diâmetro do feixe vascular, diâmetro de células buliformes, área de células crivadas. Foram mensurados os seguintes tecidos/estruturas nas três culturas: espessuras das faces da epiderme, espessura do mesofilo, diâmetro do metaxilema, área do feixe vascular; área das células crivadas. Somente em milho e trigo foram mensurados os diâmetros polares e diâmetros equatoriais dos estômatos. Em arroz e trigo, área e densidade de células buliformes foram avaliadas. Além destes, foram calculados, em milho e trigo, a densidade estomática e o índice estomático de acordo com Castro et al. (2009) e Pereira et al. (2011) e a proporção de câmaras de aerênquima em relação à área da nervura em arroz ($P = \text{área do aerênquima} / \text{área do mesofilo}$).

Os dados histométricos obtidos foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro Wilk. Posteriormente, foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott, com 5% de significância. Todos esses procedimentos foram realizados com auxílio do software Sisvar 5.0 (FERREIRA, 2011).

3 RESULTADOS

3.1 Efeito de ETR na anatomia foliar de plantas de arroz

As avaliações dos tecidos foliares mostraram modificações significativas com a adição de ETR pulverizados nas folhas de arroz. Ambas as faces da epiderme tiveram maiores espessuras com o aumento de ETR. Já a espessura do mesofilo, diâmetro de metaxilema, área do feixe mostraram redução com aumento de ETR (TABELA 1). Desse modo, a espessura do mesofilo foi menor, no entanto, a densidade e área células buliformes foram mantidas, mantendo as funções deste tipo de células nas maiores doses de ETR testadas (FIGURA 1).

A área de células crivadas e a densidade de feixes não apresentaram diferenças significativas, não comprometendo assim, o transporte de fotossimilados nas plantas de arroz (TABELA 1). A proporção de aerênquima na nervura reduziu com o aumento de ETR, uma vez que a espessura da folha e nervura total também reduziram (FIGURA 2).

Tabela 1- Espessura dos tecidos foliares de plantas de *Oryza sativa* em diferentes concentrações de ETR. (EPB: Espessura da epiderme na face abaxial; EPD: Espessura da epiderme na face adaxial; MES: Espessura do mesofilo, DME: Diâmetro do metaxilema; AFE:Área do feixe vascular; ABU: Área de células buliformes; DFE: Densidade de feixe vascular; DBU: Densidade de células buliformes; PAER: Proporção de câmaras de aerênquima em relação ao mesofilo; ACC: Área de células crivadas).

Tratamentos (kg ha ⁻¹)	EPB(μm)	EPD(μm)	MES(μm)	DME(μm)	AFE(mm ²)
0	5,93 ± 0,52 b	6,62 ± 0,75 b	93,79 ± 4,65 a	45,28 ± 2,09 a	14790,41 ± 2073,81 a
0,1	6,32 ± 0,67 b	7,37 ± 0,74 b	94,56 ± 7,59 a	46,46 ± 3,19 a	16104,54 ± 1371,51 a
0,225	7,49 ± 0,53 a	7,40 ± 0,77 b	96,92 ± 4,44 a	46,21 ± 3,22 a	16034,97 ± 1221,43 a
0,5	7,21 ± 0,52 a	7,99 ± 0,70 a	92,84 ± 4,47 a	42,32 ± 1,83 b	12802,00 ± 740,77 b
1	7,76 ± 0,61 a	8,66 ± 0,97 a	85,31 ± 5,58 b	43,15 ± 2,89b	11678,73 ± 1440,53 b
Cv (%)	17,28	20,77	11,72	12,19	11,56

Tratamentos (kg ha ⁻¹)	ABU (mm ²)	DFE(mm ²)	DBU(mm ²)	PAER (%)	ACC (mm ²)
0	4236,13 ± 349,42 a	4,7 ± 0,00a	4,7 ± 3,00a	39± 0,03a	1561,27 ±251,67 a
0,1	4654,69 ± 616,61 a	4,9 ± 0,00a	4,7 ± 2,98a	44± 0,06a	1808,45 ±303,52 a
0,225	4597,16 ± 645,46 a	4,6 ± 0,00a	4,5 ± 0,98	42± 0,03a	1749,14 ±268,97 a
0,5	4053,64 ± 342,63 a	5,1 ± 0,00 a	4,6 ± 1,87a	41± 0,03a	1384,54 ±198,14 a
1	3454,02± 385,48 a	4,9 ± 0,00a	4,9 ± 4,87a	31± 0,08b	1727,31 ±522,45 a
Cv(%)	19,33	13,82	12,91	13,62	17,89

* Letras distintas referentes à mesma coluna indicam diferença significativa entre as médias nas concentrações de ETR testadas na solução (kg ha⁻¹), pelo teste de Scott-Knott (p<0,05). ±: Erro padrão da média

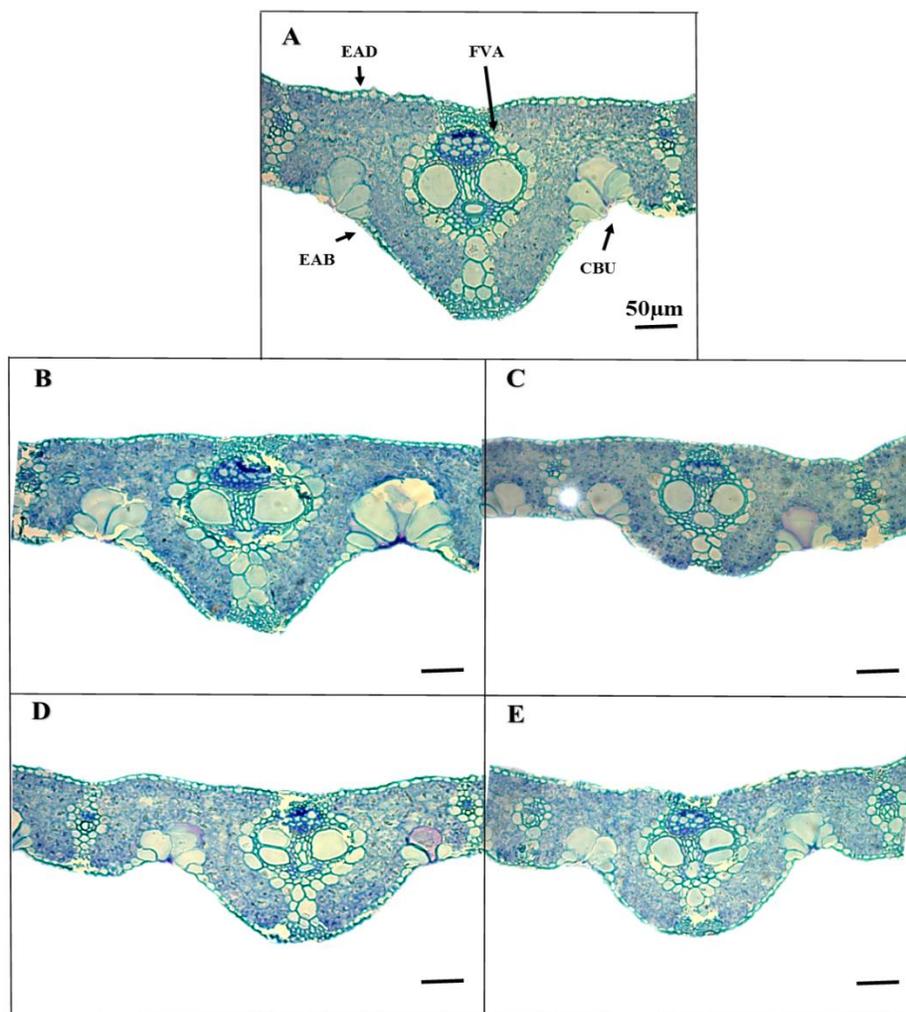


Figura 1- Secções transversais de folhas de *Oryza sativa* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. A=controle; B= 0,1 kg ha⁻¹; C= 0,225 kg ha⁻¹; D= 0,5 kg ha⁻¹; E= 1,0 kg ha⁻¹. Barras= 50 μm. (EAD: Epiderme na face adaxial; EAB:Epiderme na face abaxial; CBU: Conjunto de células buliformes, FVA: Feixe vascular).

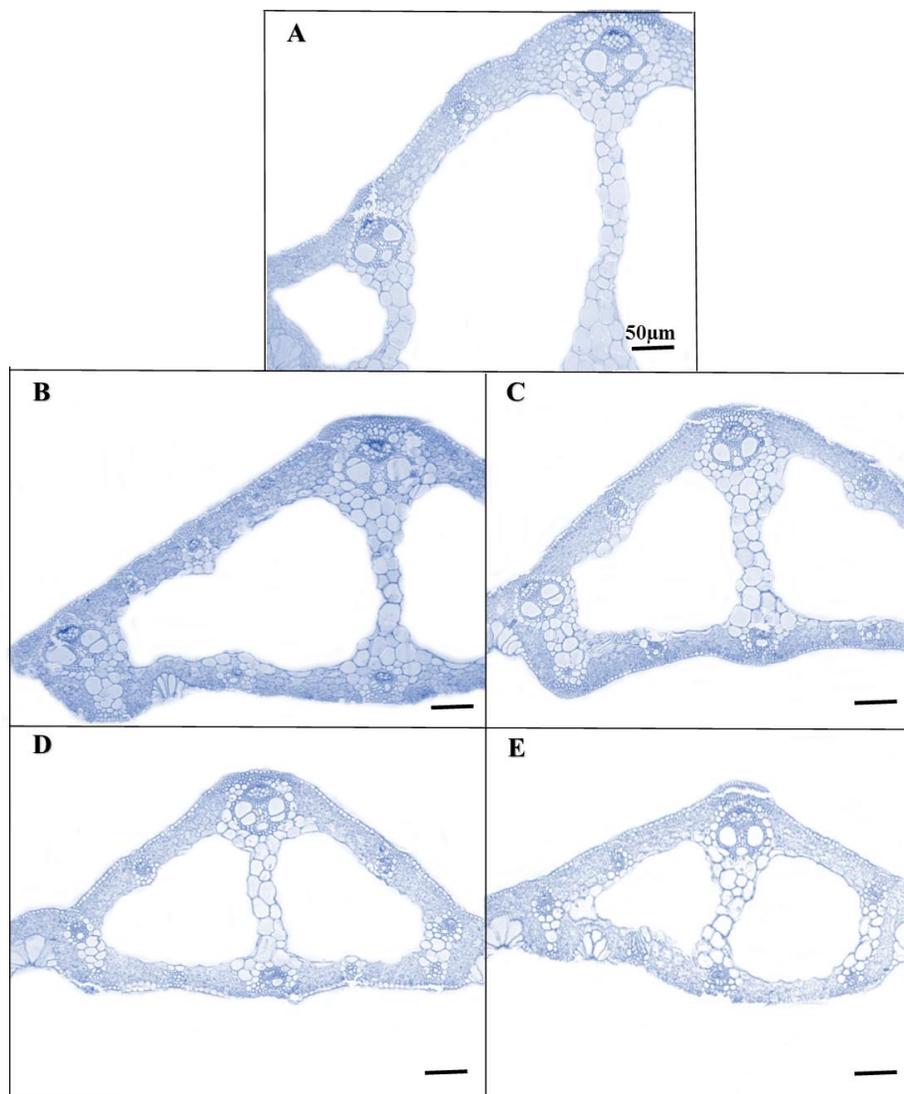


Figura 2- Secções transversais da nervura central de *Oryza sativa* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. A=controle; B= 0,1 kg ha⁻¹; C= 0,225 kg ha⁻¹; D= 0,5 kg ha⁻¹; E= 1,0 kg ha⁻¹. Barras= 50 μm.

3.2 Efeito de ETR na anatomia foliar de plantas de milho

A aplicação de ETR em folhas de milho causou modificações significativas nos tecidos e índices foliares (TABELA 2). Diferentemente dos resultados observados para o arroz, a aplicação de ETR proporcionou aumento de estruturas foliares nas plantas de milho conseqüentemente, da espessura das folhas nas maiores concentrações dos elementos. Os ETR utilizados não alteraram significativamente as espessuras das faces da epiderme. Porém, houve aumentos na espessura do mesofilo, no diâmetro de metaxilemas, na área dos feixes vasculares e na área das células crivadas (FIGURA 3).

Os diâmetros polares e equatoriais dos estômatos não tiveram alterações significativas, mantendo-se até as maiores concentrações da mistura de ETR. Com relação aos índices estomáticos, apenas na face adaxial houve redução, uma vez que a densidade dos estômatos também reduziu nesta face (TABELA 3).

Tabela 2- Espessura dos tecidos foliares, índices estomáticos e densidades estomáticas de plantas de *Zea mays* em diferentes concentrações de ETR. (EPD: Espessura da epiderme da face adaxial; MES: Espessura do mesofilo, EPB: Espessura da epiderme da face abaxial; DME: Diâmetro do metaxilema; AFE: Área do feixe vascular; DPB: Diâmetro polar na face abaxial; DEB: Diâmetro equatorial na face abaxial; DPD: Diâmetro polar na face adaxial; DED: Diâmetro equatorial na face adaxial; ACC: Área das células crivadas; IEB: Índice estomático na face abaxial; IED: Índice estomático na face abaxial; DNB: Densidade estomática na face abaxial; DND: Densidade estomática na face adaxial).

FOLHA					
Tratamentos (kg ha ⁻¹)	EPD(μm)	MES(μm)	EPB(μm)	DME(μm)	AFE(mm ²)
0	19,78 ± 1,41a	114,43 ± 4,46b	17,68 ± 1,21a	48,42 ± 2,32b	19231,16 ± 775, 23c
0,1	20,68 ± 1,04a	132,11 ± 13,75b	19,08 ± 1,45a	51,48 ± 4,15b	21828,84 ± 723,32 b
0,3	19,65 ± 1,49a	138,11 ± 7,74b	19,02 ± 3,14a	56,30 ± 2,40a	24803,01b ± 2010,03b
0,6	20,22 ± 2,10a	146,32 ± 13,18a	18,57 ± 3,36a	56,45 ± 3,35a	28573,82 ± 1780, 01a
1,2	20,04 ± 1,51a	150,13 ± 12,30a	19,42 ± 1,27a	57,34 ± 2,85a	26748,60 ± 2365,03a
Cv (%)	18,75	15,26	15,33	11,45	17,09
DIÂMETROS					
Tratamentos (kg ha ⁻¹)	DPB(μm)	DEB(μm)	DPD (μm)	DED (μm)	ACC (mm ²)
0	37,28 ± 2,33a	22,47 ± 2,10a	38,94 ± 1,77a	20,97 ± 1,65a	2723,43 ± 183,00b
0,1	39,62 ± 2,12a	22,98 ± 1,65a	40,68 ± 2,16a	20,72 ± 1,70a	2865,39 ± 476,36b
0,3	38,86 ± 1,95a	22,79 ± 1,61a	40,25 ± 2,20a	20,60 ± 1,60a	3676,84 ± 391, 10a
0,6	39,51 ± 2,11a	22,11 ± 1,60a	40,55 ± 1,70a	20,44 ± 1,61a	3361,37 ± 342,80a
1,2	40,32 ± 2,22a	22,96 ± 1,90a	41,54 ± 2,75a	20,48 ± 1,77a	3583,54 ± 541,08a
Cv(%)	11,37	16,23	10,66	15,74	17,88

Continua

Tratamentos (kg ha ⁻¹)	IEB (%)	IED (%)	DNB(n/mm ²)	DND (n/mm ²)
0	24,28 ± 1,25a	21,89 ± 1,30b	104 ± 10,88a	74 ± 5,87a
0,1	22,32 ± 2,02a	22,42 ± 1,66b	89 ± 8,42a	69 ± 4,98a
0,3	23,72 ± 1,72a	21,24 ± 1,72b	105 ± 14,86a	74 ± 6,98a
0,6	23,15 ± 1,71a	21,09 ± 1,73b	98 ± 13,60a	61 ± 8,45b
1,2	22,11 ± 1,35a	24,51 ± 1,76a	89 ± 8,55a	72 ± 5,86b
<i>Cv(%)</i>	14,19	15,18	21,62	19,41

* Letras distintas referentes à mesma coluna indicam diferença significativa entre as médias nas concentrações de ETR testadas na solução (kg ha⁻¹), pelo teste de Scott-Knott (p<0,05). ±: Erro padrão da média.

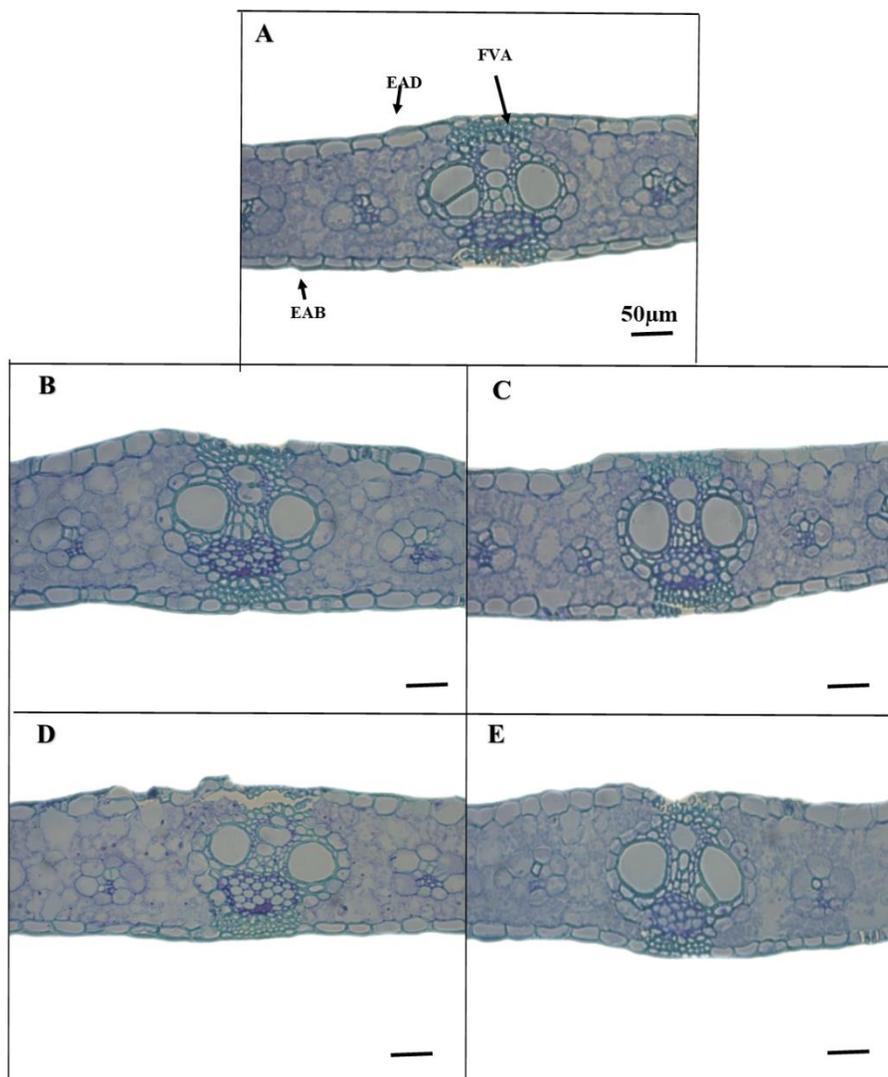


Figura 3- Secções transversais de folhas de *Zea mays* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. A=controle; B= 0,1 kg ha⁻¹; C= 0,3 kg ha⁻¹; D= 0,6 kg ha⁻¹; E= 1,2 kg ha⁻¹. Barras= 50μm. (EAD- Epiderme na face adaxial; EAB-Epiderme na face abaxial; FVA: Feixe vascular).

3.3 Efeito de ETR na anatomia foliar de plantas de trigo

A aplicação de ETR em folhas de trigo causou alterações significativas nos tecidos e índices foliares (TABELA 3). Foi observada redução da espessura da epiderme em ambas as faces. Além destes, semelhante ao que ocorreu em arroz, também apresentaram redução o mesofilo, diâmetro do metaxilema, área dos feixes, na área de células crivadas e na área das células buliformes (FIGURA 4).

Os diâmetros dos estômatos da face abaxial nas maiores concentrações de ETR apresentaram redução em comparação ao tratamento controle (TABELA 3). Houve aumento no índice estomático acompanhado pelo aumento da densidade estomática apenas na face abaxial com o incremento da concentração de ETR aplicada.

Tabela 3- Espessura dos tecidos foliares, índices estomáticos e densidades estomáticas de plantas de *Triticum aestivum* em diferentes concentrações de ETR. (EPD: Espessura da epiderme da face adaxial; MES: Espessura do mesofilo, EPB: Espessura da epiderme da face abaxial; DME: Diâmetro do metaxilema; AFE:Área do feixe vascular; ACC: Área das células crivadas; ACB: Área de células buliformes; IEB: Índice estomático na face abaxial; IED: Índice estomático na face adaxial; DNB: Densidade na face abaxial; DND: Densidade na face adaxial; DPB: Diâmetro polar na face abaxial; DEB: Diâmetro equatorial na face abaxial; DPD: Diâmetro polar na face adaxial; DED: Diâmetro equatorial na face adaxial).

FOLHA							
Tratamentos (kg ha ⁻¹)	EPD(μm)	MES(μm)	EPB(μm)	DME(μm)	AFE(mm ²)	ACC(mm ²)	ACB(mm ²)
0	15,84 ± 1,31a	151,67 ± 10,52a	16,79 ± 1,77a	28,89 ± 1,75a	12621,14 ± 561,13a	1458,47 ± 147,46a	3831,53 ± 527,413a
0,1	14,20 ± 1,43b	132,55 ± 6,18b	14,20 ± 1,32b	28,09 ± 2,63a	10755,92 ± 1152,00 1b	1595,43 ± 236,45a	3505,16 ± 370,24 a
0,3	12,00 ± 1,30b	127,03 ± 7,54b	14,06 ± 0,93b	27,53 ± 1,93b	10884,12 ± 1161,34b	1494,50 ± 170,35a	3585,13 ± 246,38a
0,6	12,82 ± 1,15b	107,16 ± 11,46c	13,00 ± 0,81c	24,72 ± 2,75b	9193,37 ± 1317,277c	1133,65 ± 266,32b	2344,47 ± 173,43b
1,2	12,81 ± 0,94b	115,92 ± 7,02c	12,63 ± 1,06c	25,20 ± 1,74b	8823,83 ± 1108,43c	1097,11 ± 195,11b	2572,96 ± 270,38b
2,4	12,35 ± 1,22b	120,03 ± 11,72c	15,17 ± 1,21c	25,35 ± 2,01b	10509,53 ± 1204,40c	1251,22 ± 175,11b	2797,33 ± 268,36b
4,8	13,06 ± 0,70b	117,39 ± 5,26c	14,55 ± 0,87c	26,36 ± 2,81b	9293,88 ± 1002,45c	1261,10 ± 191,38b	2337,67 ± 237,10b
Cv (%)	17,89	14,41	16,32	16,61	22,26	30,24	25,08

continua

Tratamentos (kg ha⁻¹)	IEB (%)	IED(%)	DNB (n/mm²)	DND (n/mm²)
0	19,79 ± 2,37b	23,10 ± 1,76a	40 ± 0,01b	50 ± 0,05a
0,1	21,14 ± 1,40b	24,73 ± 1,62a	40 ± 0,05b	60 ± 0,10a
0,3	23,64 ± 1,30b	24,48 ± 1,47a	40 ± 0,08b	60 ± 0,08a
0,6	21,50 ± 1,54b	23,85 ± 1,71a	50 ± 0,02a	50 ± 0,04a
1,2	23,13 ± 1,53b	30,56 ± 2,74a	50 ± 0,02a	60 ± 0,02a
2,4	25,73 ± 1,76a	24,77 ± 1,84a	50 ± 0,06a	50 ± 0,07a
4,8	26,11 ± 2,05a	27,08 ± 2,16a	50 ± 0,03a	60 ± 0,09a
<i>Cv(%)</i>	15,27	27,01	22,87	22,01

Tratamentos (kg ha⁻¹)	DPB (µm)	DEB (µm)	DPD (µm)	DED(µm)
0	44,36 ± 4,40a	28,31 ± 2,32a	47,94 ± 4,80a	25,14 ± 2,16a
0,1	46,85 ± 2,47a	24,88 ± 2,07b	46,20 ± 2,50a	25,75 ± 2,24a
0,3	42,57 ± 2,21b	23,20 ± 1,94b	49,73 ± 2,60a	24,24 ± 1,16a
0,6	45,34 ± 2,15b	25,97 ± 1,93b	45,64 ± 3,07b	25,96 ± 2,11a
1,2	43,10 ± 2,26c	25,59 ± 2,10b	45,80 ± 2,54b	24,46 ± 2,15a
2,4	43,24 ± 2,60c	24,81 ± 1,77b	44,51 ± 2,30b	25,53 ± 2,04a
4,8	41,21 ± 3,26d	26,06 ± 2,23b	44,12 ± 3,00b	24,61 ± 2,11a
<i>Cv(%)</i>	13,19	16,65	13,14	16,75

* Letras distintas referentes à mesma coluna indicam diferença significativa entre as médias nas concentrações de ETR testadas na solução (kg ha⁻¹), pelo teste de Scott-Knott (p<0,05). ±: Erro padrão da média.

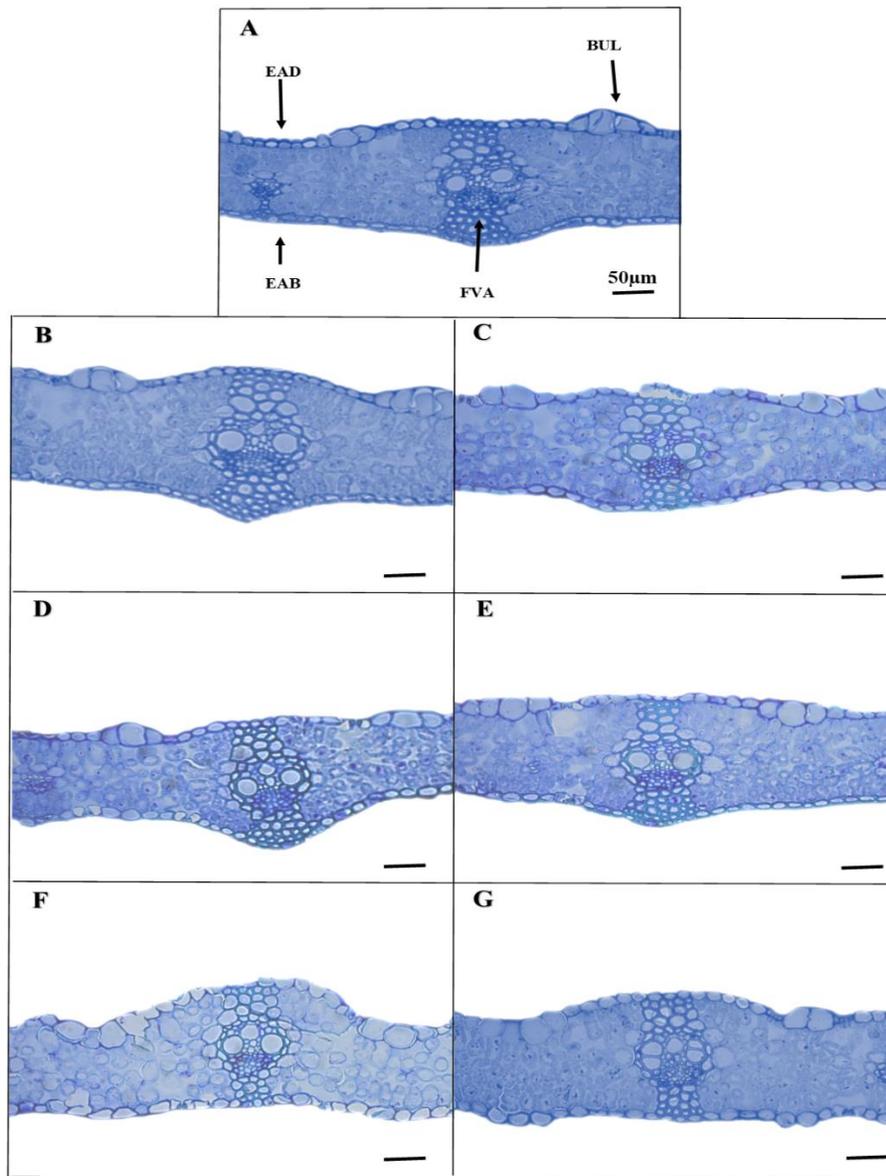


Figura 4- Secções transversais de folhas de *Triticum aestivum* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. A=controle; B= 0,1 kg ha⁻¹; C= 0,3 kg ha⁻¹; D= 0,6 kg ha⁻¹; E= 1,2 kg ha⁻¹; F= 2,4 kg ha⁻¹; G= 4,8 kg ha⁻¹. Barras= 50μm. (EAD- Epiderme na face adaxial; EAB-Epiderme na face abaxial; FVA: Feixe vascular; BUL: Células buliformes)

3 DISCUSSÃO

Atualmente, são escassos os trabalhos associando ETR em culturas agrícolas e, sobretudo envolvendo estudos anatômicos. Neste trabalho, foi possível observar diferentes respostas anatômicas à aplicação de ETR. De modo geral, as plantas respondem de maneira a minimizar possíveis efeitos negativos, alterando a espessura de tecidos e números de estruturas, principalmente nas maiores concentrações.

Foi possível observar que as plantas expostas a estes elementos podem sofrer alterações em sua anatomia e fisiologia, que caracterizam sua plasticidade sob estresse e permitem sua sobrevivência ou, ao contrário, afetam negativamente seu crescimento e desenvolvimento devido à toxicidade. O aumento da concentração de ETR causou alteração na formação da maioria dos tecidos foliares das culturas. No arroz e trigo, a redução dos tecidos foi associada ao interpretada como menor gasto energético com a parte estrutural, tal redução mostra que estas concentrações causaram efeitos de toxicidade na anatomia foliar destas culturas. Esse tamanho relativamente menor das células do mesofilo, como em arroz e trigo, pode ser decorrente do colapso das células do parênquima, uma vez que os elementos podem influenciar no processo de expansão celular (MARQUES et al., 2011). Além disso, favorece a difusão de CO₂ nas folhas pela redução do as rotas a serem executadas por este gás até os cloroplastos.

Por outro lado, o milho se mostrou mais resistente a aplicação de ETR, sendo uma espécie já conhecida pela plasticidade e adaptabilidade ambiental (PEREIRA et al., 2008). Seu espessamento de tecidos foliares pode ser interpretado como contribuição para o aumento da captação de CO₂, uma vez que a retenção de CO₂ é uma das funções básicas do parênquima esponjoso e do aerênquima e será lentamente utilizado no clorênquima, no processo fotossintético assim como proposto por Pereira et al. (2016). Tal espessamento

também pode ter contribuído para a maior resistência à toxicidade à aplicação de ETR, é que se diferencia das outras duas culturas pelo arranjo típico da anatomia de Kranz por ser uma espécie C4 geralmente resulta em um cilindro ampliado de células da bainha dos feixes (NELSON; LANGDALE, 1992).

Quando há o acúmulo dos elementos em paredes celulares, conseqüentemente nota-se o espessamento destas, juntamente com a retenção e imobilização de ETR. Isso evita que estes elementos cheguem até o xilema e sejam translocados para a parte aérea, como ocorreu em soja, onde a deposição de La principalmente no xilema, em paredes celulares e em cristais dispersos no córtex (OLIVEIRA et al., 2015). Assim, elevados teores de ETR, podem entrar na células e parte pode permanecer aderido as paredes, como forma de imobilização e evitação de danos. Deste modo, tais mudanças anatômicas na folha podem ajudar as plantas a manterem altos níveis de taxas fotossintéticas e transpiração eficiente (EVANS et al., 1994) sem mostrar sinais de toxicidade pela evitação dos danos.

A distribuição de estômatos e a conectividade dos espaços intercelulares afetam a difusão de CO₂. Na folha, estômatos menores apresentam resposta rápida ao estresse com o fechamento dos estômatos, o que limita a condutância dos gases nas folhas e, conseqüentemente, limita a fotossíntese e o rendimento (MUTAVA et al., 2011). No entanto, o número maior de estômatos pode favorecer a maior entrada de gás, o que diminui a resistência estomática. A absorção de ETR pela pulverização foliar está relacionada com o tamanho e distribuição dos estômatos nas folhas. Quando a via de exposição é a folhagem, os estômatos são menores, em comparação com a exposição à base da raiz, justificando a redução do tamanho dos estômatos pela forma de aplicação.

Uma maior funcionalidade estomática pode aumentar o uso de água e eficiência, pois este parâmetro está relacionado a uma área menor de abertura estomática (diâmetro polar e equatorial de estômatos). Sabe-se que sob condições

de estresse, nas quais a funcionalidade estomática tende a aumentar e o diâmetro estomático a diminuir (SOUZA et al., 2010), assim como os dados obtidos, uma vez que a diferenciação dos estômatos é determinada geneticamente e sofre a influência de fatores ambientais.

A densidade estomática é uma das mais características importantes da planta relacionadas à captura do CO₂, e em condições de estresse, pode aumentar seus valores nas plantas mais eficientes (GRISI et al. 2008), como ocorreu no trigo. Da mesma maneira, plantas de *E. crassipes* aumentaram não apenas densidade estomática, mas também o índice estomático na presença de chumbo (PEREIRA et al., 2014). Segundo Maksimović et al. (2014), as dimensões dos estômatos diminuíram significativamente enquanto sua densidade aumentou tanto na epiderme na face adaxial quanto na abaxial, assim como para os dados obtidos no presente estudo. O milho e trigo apresentam densidade estomática maior na superfície abaxial da folha, que pode ajudar a prevenir a perda de água uma vez que a superfície é menos exposta ao aquecimento, deste modo, alterações nos estômatos dessa face prejudicam demasiadamente a função destas estruturas.

A redução de teor de água, também pode explicar as mudanças que aconteceram concomitantemente na densidade e tamanho dos estômatos, bem como a alteração da área foliar assim como em Maksimović et al. (2014). Em geral, o aumento observado na densidade estomática em plantas cultivadas sob algum tipo de “contaminação” compensa o menor diâmetro das estruturas encontrados nestas condições, destinado a compensar a entrada de CO₂, essencial para o processo fotossintético. O que corrobora com os dados apresentados de *B. arrecta* cultivada sob contaminação de As (ARGENTA et al., 2013).

Uma vez que os tecidos internos são reduzidos, é menor a resistência à difusão dos gases e o processo da assimilação não é prejudicado. Por exemplo, maior espessura do parênquima/mesofilo e o número das células nas folhas são

mostrados como sendo correlacionado com a capacidade fotossintética (SYVERTSEN et al., 1995). No entanto, efeitos negativos e indicativos de toxicidade também foram relatados por Wang et al. (2014), onde o tratamento com 1224,5 e 2449,0 μM de LaCl_3 reduziram a taxa fotossintética, o rendimento quântico e a eficiência de carboxilação da rubisco no arroz. Alterações estruturais nos cloroplastos também interferem na taxa fotossintética, no peso seco e fresco das folhas, na área foliar e na taxa de crescimento relativo do arroz (HU et al., 2016; WANG et al, 2016).

Com o aumento da espessura dos tecidos de condução observados nas três culturas, mais fotossimilados chegam aos grãos possibilitando aumento de produtividade. Logo, um número maior ou maior diâmetro de vasos aumenta a probabilidade de a água atingir seu destino ou que ocorra um fluxo adequado (SOUZA et al., 2009). Além disso, o aumento no número de feixes vasculares indica que o transporte de assimilados, fito-hormônios e nutrientes nas folhas não foi prejudicado pelos ETR, permitindo a distribuição desses metabólitos ao longo do corpo da planta. O espessamento do floema, especificamente, foi observado na aplicação de Cd em *E. crassipes*. Como esse tecido está relacionado ao transporte de fotoassimilação, pode permitir melhor desenvolvimento do sistema radicular (PEREIRA et al., 2016).

Por outro lado, o efeito de metais na estrutura do xilema, como vaso menor tamanho, menor densidade de vasos pode ocasionar menor condutividade hidráulica (cavitação) interferindo nas relações planta-água, pois, vasos de xilema com diâmetro menor, fazem com que a coluna de água encoste mais facilmente nas paredes dos elementos de vaso e diminua espaços propícios à formação de bolhas de ar, que causam cavitação (HACKE & SPERRY, 2001). Em *Plantago major*, o chumbo reduziu densidade, bem como condutância estomática e tamanho do feixe vascular (KOSOBROUKHOV et al. 2004), bem como observado em trigo.

O desenvolvimento do aerênquima leva à formação de espaços intercelulares, conectados que facilitam a difusão de gases a distâncias maiores que 80 mm e resulta em melhor oxigenação das células ao longo do tecido (GUNAWARDENA, 2008), essencial para a manutenção do fluxo transpiratório e a distribuição de nutrientes pela planta. Portanto, o aumento de espaços preenchidos por aerênquima pode se relacionar com a diminuição da distância necessária para a água chegar ao cilindro vascular, o que melhoraria a condutividade hidráulica bem como auxiliar na sustentação e reduzir o peso suportado pelo pecíolo.

A função das células buliformes é controlar os movimentos das folhas, uma vez que está envolvida no enrolamento, que parece ser um mecanismo usado pela planta para evitar transpiração excessiva (ALVAREZ et al., 2008). Contudo, a relação célula buliforme/mesofilo alterou nas maiores concentrações de ETR aplicadas, o que implica que existe um limite de tamanho para estas células desempenharem sua função. Assim como mostrado por Argenta et al. (2013) em que a área dos conjuntos de células buliformes não diferiu do tratamento controle, devido a estas plantas não serem expostas a condições que exigem limites à transpiração excessiva.

4 CONCLUSÕES

Avaliações anatômicas forneceram importantes informações em termos dos efeitos sobre a planta e o potencial de utilização de ETR. Os resultados obtidos no presente mostram alterações nas estruturas anatômicas foliares do arroz, milho e trigo, em que a aplicação de maiores concentrações pode estar associada a efeitos tóxicos nas três culturas. As plantas de milho e trigo tiveram as espessuras de seus tecidos, em sua maioria, reduzidos, fato menos notável para o milho. Mais estudos são necessários para consolidar tais informações e, sugere-se que as pesquisas se concentrem em concentrações até $0,3 \text{ kg ha}^{-1}$ nestas culturas.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, J.M., ROCHA, J.F., MACHADO, S.R. Bulliform cells in *Loudetiopsis chrysothrix* (Nees) Conert and *Tristachya leiostachya* Nees (Poaceae): structure in relation to function. **Braz. Arch. Biol. Technol.**, v. 51, n.1, p.113–119, 2008.
- ARAUS, J.L.; SERRET, M.D.; EDMEADES, G.O. Phenotyping maize for adaptation to drought. *Frontiers in Physiology*, v.3, p.305, 2012. DOI: 10.3389/fphys.2012.00305. ARGENTA, J. A., OLIVEIRA, C. DE, CASTRO, E. M. DE, PIRES, M. F., PEREIRA, F. J., & PASQUAL, M. Anatomical and physiological characteristics of tanner grass exposed to arsenic. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, 56, 13–22, 2013. <http://doi.org/10.4322/rca.2013.075>
- CAI, J.; TYREE, M.T. The impact of vessel size on vulnerability curves: data and models for within-species variability in saplings of aspen, *Populus tremuloides* Michx. **Plant, Cell and Environment**, Medford, MA, v. 33, n.7, p. 1059–1069, 2010.
- CONAB, Companhia Nacional de abastecimento. **A cultura do trigo**. Organizadores: Aroldo Antônio de Oliveira Netto e Candice Mello Romero Santos. Brasília-Conab, 2107.
- EMBRAPA MILHO E SORGO. **Sistema de Produção**. 19. ed. Sete Lagoas, Nov., 2015.
- EVANS, J.R. et al. The relationship between CO₂ transfer conductance and leaf anatomy in transgenic tobacco with a reduced content of rubisco. **Aust. J. Plant Physiol.**, Melbourne, v.21, n.4, p. 475 - 495, 1994.
- FAOSTAT: **Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação**. «Preliminary 2014 Data Now Available». Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/?#data/QC>>. Acesso em: em 21 de novembro de 2017.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

- GRISI FA, ALVES JD, CASTRO EM, OLIVEIRA C, BIAGIOTTI G AND MELO LA. 2008. Leaf anatomical evaluations in 'Catuaí' and 'Siriema' coffee seedlings submitted to water stress. *Cienc Agrotec* 32: 1730-1736.
- GUNAWARDENA, A.H.L.A.N. Programmed cell death and tissue remodelling in plants. *Journal of Experimental Botany*, v.59, p.445-451, 2008
- HACKE, U.G.; SPERRY, J.S. Functional and ecological xylem anatomy. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Sistematics*, v.4, p.97-115, 2001.
- HU, H., et al. Combined effects of simulated acid rain and lanthanum chloride on chloroplast structure and functional elements in rice. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v.23, n.9, p. 8902–8916, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s11356-015-5962-9>>. Acesso em 27 de out. 2017.
- HU, Z. et al. Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: A Review. **J. Plant Nutr.**, Oxfordshire, v.27, n.1, p.183–220, 2004.
- IUPAC. **Nomenclature of inorganic chemistry**. IUPAC Recommendations 2005 (“the red book”). In: Connely, N., Damhus, T., Harshorn, R.M., (Eds.), RSC Publishing, Cambridge, UK, 2005.
- JOHANSEN, D.A. **Plant microtechnique**. 2nd. ed. New York: Mc-Graw-Hill, 1940. 523 p.
- KOSOBROUKHOV A, KNYAZEVA I AND MUDRIK V. 2004. Plantago major plants responses to increase content of lead in soil: Growth and photosynthesis. *Plant Growth Regul* 42: 145-151.
- KULCZYCKA, J. et al. Evaluation of the recovery of Rare Earth Elements (REE) from phosphogypsum waste - Case study of the WIZÓW Chemical Plant (Poland). **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v.113, p.345–354, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.039>>. Acesso em: 28 jun. 2016.
- LIU Q, LI Y, CHEN Y J. The effects of ionic RE on wheat growth and development. **J. Hunan Agric. Univ.** (in Chin.), Hunan, v.22, n.1, p. 17, 1996.
- LIU, D. et al. Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings. **Plant Soil Environ**.Prague, v. 59, p.196–200, 2012.

LIU, D., et al. The effects of cerium on the growth and some antioxidante metabolismo in rice sedlings. **Environ. Sci. Pollut. Res.** Berlin, v. 19, p,3282-3291, 2012.

MAHMOOD, Q., ZHENG, P., SIDDIQIM, R., ISLAM, E., AZIM, M.R., HAYAT, Y. Anatomical studies on water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) under the influence of textile wastewater. **J. Zhejiang University SCI** 6B, 991-998, 2005. DOI: 10.1007/BF02888490

MAKINO, A., et al. Distinctive responses of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase and carbonic anhydrase in wheat leaves to nitrogen nutrition and their Mesophyll anatomy for improving rice photosynthesis possible relationships to CO₂-transfer resistance. **Plant Physiology**, Rockville, MD, v.100, p. 1737–1743, 1992.

MAKSIMOVICI et al. Effect of yttrium onphotosynthesis andwater relations in young maize plants. **J. Rare Earths.**, Amsterdam, v. 32, p.371–8, 2014.

MARQUES, T. C. L. L. S. M.; SOARES, A. M.; GOMES, M. P.; MARTINS, G. Respostas fisiológicas e anatômicas de plantas jovens de Eucalipto expostas ao cádmio. *Revista Árvore*, v. 35, n. 5, p. 9971006, 2011.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000600005>

MASSARI S, RUBERTI M. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. **Resour. Policy**, Amsterdam, v.38, p.36–43, 2013.

MUTAVA, R.N., et al. Characterization of sorghum genotypes for traits related to drought tolerance. **Field Crop Res.** Amsterdam, v.123, p.10–18, 2011.

NELSON, T., LANGDALE, J.A. Developmental genetics of C4 photosynthesis. Annual **Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, Calif., v. 43, p. 25–47, 1992.

NIINEMETS, U.; SACK, L. Structural determinants of leaf light harvesting capacity and photosynthetic potentials. In: ESSER et al.(Eds). **Progress in Botany**, v. 67. Berlin: Springer-Verlag, 2006. p. 385–419.

NING, J.B.; XIAO, S.L. Effects of rare earth elements application on day lily. **Chinese Rare Earth** (in Chinese), Beijing, v. 10, n.5, p. 52–54, 1989.

O'BRIEN, T.P.; FEDER, N.; MCCULLY, M.E. Polychromatic staining of plant cell walls by Toluidine Blue. **Protoplasma**, Viena, v. 59, n. 2, p. 368-373, 1964.

OLIVEIRA, C. et al. Bioaccumulation and effects of lanthanum on growth and mitotic index in soybean plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v, 122, p.136–144, 2015. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.07.020>>. Acesso em: 12 maio 2016.

PANG, X. et al. Application of rare-earth elements in the agriculture of China and its environmental behavior in soil. **Environ. Sci. Pollut. Res. Int.**, Berlin, 9, n. 2, p. 143–8, 2002.

PEREIRA, F. J., DE CASTRO, E. M., PIRES, M. F., DE OLIVEIRA, C., & PASQUAL, M.. Anatomical and physiological modifications in water hyacinth under cadmium contamination. **Journal of Applied Botany and Food Quality**, 90, 10–17, 2017. <http://doi.org/10.5073/JABFQ.2017.090.003>

PIRES, M. F., CASTRO, E. M. DE, OLIVEIRA, C. DE, PEREIRA, F. J., & PASQUAL, M. Mechanisms of the internal structure and operation of *Panicum aquaticum* in response to arsenic. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, 56, 89–94, 2013. <http://doi.org/10.4322/rca.2013.086>

RAMOS, S. J. et al. Rare Earth Elements in the Soil Environment. **Current Pollution Reports**, Amsterdam, v.2, n.1, p.28–50, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s40726-016-0026-4>>._ Acesso em: 12 março 2017.

RICO, C.M. et al. Cerium oxide nanoparticles modify the antioxidative stress enzyme activities and macromolecule composition in rice seedlings. **Environmental Science & Technology**, Berkeley, CA, v. 47, p.14110–14118, 2013.

RIM, K.T. Effects of rare earth elements on the environment and human health: A literature review. **Toxicology and Environmental Health Sciences**, Berlin, v.8, n3, p.189–200, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s13530-016-0276-y>>. Acesso em: 30 mar. 2017.

SHENG, B.L.; ZHANG, L.J. Effects of La on content of endogenesis hormone in wheat seedling plant. **Plant Physiol. Commun.** (in Chinese), Beijing, v.30, n.5, p., 361–352, 1994.

SHTANGEEVA, I., AYRAULT, S., Effects of Eu and ca on yeild and mineral nutrition of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. **Environ. Exp. Bot.** Oxford, v. 59, p. 49-58, 2007.

SOUZA, T.C. et al. Leaf plasticity in successive selection cycles of ‘Saracura’ maize in response to periodic soil flooding. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília DF, v. 45, p.16–24, 2010.

SOUZA, T.C. Morpho-anatomical characterization of root in recurrent selection cycles for flood tolerance of maize (*Zea mays* L.). **Plant Soil Environ.**Prague, v. 55, n.11, p.504–510, 2009.

SUN, M., et al. On the production of Mg-Nd master alloy from NdFeB magnet scraps. **J. Mater. Process. Technol.**, Amsterdam, v. 218, p. 57-61, 2015.

SYVERTSEN, J.P., et al. On the relationship between leaf anatomy and CO₂ diffusion through the mesophyll of hypostomatous leaves. **Plant Cell & Environ**, Medford, MA, v. 18, n.2, p.149-157.

WAN, Q. Technologies and effect of REEs enriched La on rice. **Chinese Rare Earths** (in Chinese), Beijing, n. 16, n.5, p.67–76, 1995.

WANG, J. et al. Effects of lanthanum on abscisic acid regulation of root growth in Arabidopsis. **Journal of Rare Earths**, Amsterdam, v. 32, n. 1, p. 78-82, jan. 2014.

WANG, L. et al. Combined effects of lanthanum (III) chloride and acid rain on photosynthetic parameters in rice. **Chemosphere**, Oxford, v.112, p.355–61, 2014.

WANG, L. et al. Responses of plant calmodulin to endocytosis induced by rare earth elements. **Chemosphere**, Oxford, v. 154, p 408–415, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.106>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

WANG, L., et al. Rare earth elements activate endocytosis in plant cells. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, DC, v. 111, n. 35, p. 12936–1294, 2014. Disponível em: <<http://doi.org/10.1073/pnas.1413376111>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

WEN, B., et al. The influence of rare earth element fertilizer application on the distribution and bioaccumulation of rare earth elements in plants under field conditions. **Chemical Speciation & Bioavailability**, Abingdon, v. 12, n.2, p.

39–48, 2001. Disponível em:

<<http://doi.org/10.3184/095422901783726825>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

XIE, F., et al. A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. **Miner. Eng.**, Amsterdam, v. 56, p. 10-28, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.021>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

XU, Q.S. et al. Laboratory assessment of uptake and toxicity of lanthanum (La) in the leaves of *Hydrocharis dubia* (Bl.) Backer. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 19, n. 9, p.3950–3958, 2012.

XU, X. et al. Accumulation of rare earth elements in maize plants (*Zea mays L*) after application of mixtures of rare earth elements and lanthanum. **Plant and Soil**, Berlin, v. 252, n. 2, p. 267-277, 2003.

XU, Z. Z., ZHOU, G. S. Responses of leaf stomatal density to water status and its relationship with photosynthesis in a grass. **J. Exp. Bot.**, Oxford, v.59, n.12, p.3317, 2008.

ARTIGO 2
INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS TERRAS RARAS NA ANATOMIA
RADICULAR E FOLIAR DO FEIJOEIRO

RESUMO

Os elementos terras raras (ETR) são 17 elementos que formam um grupo extremamente homogêneo. Devido às suas propriedades físicas e químicas, esses elementos são utilizados na produção industrial de diversos dispositivos tecnológicos e, também, são encontrados em fertilizantes agrícolas. O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L) é amplamente cultivado no Brasil, sendo fonte de nutrientes, proteínas, vitaminas, carboidratos e fibras, além de participar da geração de emprego e renda. O fornecimento de fertilizantes fosfatados contribui significativamente para o aumento da produção e do valor nutricional dos grãos dessa cultura. No entanto, esses fertilizantes podem ser portadores de ETR e influenciar no crescimento dessa espécie, fato ainda não estudado no Brasil. O objetivo do presente estudo foi avaliar as alterações anatômicas radiculares e foliares do feijoeiro a partir da aplicação via solo de fertilizantes fosfatados. Foram utilizados quatro formulados com diferentes concentrações de ETR: sal puro de fosfato de amônio; superfosfato comercial, de Araxá e outro de Catalão. O segundo fator experimental foram doses de P (0, 40, 80 e 160 kg ha⁻¹). Para as avaliações anatômicas, o material foi coletado fixado em F.A.A.70%, posteriormente armazenado em etanol 70% e submetido à série de desidratação etanólica para posteriores preparos, confecção das lâminas e obtenção dos dados histométricos. Os resultados obtidos mostraram que a aplicação do sal puro apresentou valores semelhantes ao formulado comercial que contém quantidades bem baixas de ETR, mostrando que as maiores doses de ETR (formulado Catalão e de Araxá) tiveram respostas mais evidentes sobre o feijoeiro. Houve redução das epidermes e parênquimas foliares, espessamento de epiderme, córtex, endoderme, floema e diâmetro de vasos do metaxilema na raiz de feijão principalmente nas plantas que receberam as maiores doses de ETR e nas doses de 80 e 160 kg ha⁻¹ de fósforo.

Palavras-chave: Fertilizante. Fosfato. Formulados. *Phaseolus vulgaris*.

ABSTRACT

The rare earth elements (REE) are 17 elements that form an extremely homogeneous group due to their physical and chemical properties and they are used in the industrial production of several technological devices and are also found in agricultural fertilizers. The bean plant (*Phaseolus vulgaris* L) is widely cultivated in Brazil, as a source of nutrients, proteins, vitamins, carbohydrates and fibers, and also participates in the generation of employment and income. The phosphate fertilizers supply significantly contributes to the increase of the crop production and to the nutritional value of the grains. However, these fertilizers can be carriers of REE and influence the growth of this species, a fact not yet studied in Brazil. The aim of this study was to evaluate the root and leaf anatomical changes of the bean plant with the application via soil of phosphate fertilizers. Four phosphate formulations with different concentrations of REE were used: pure salt of ammonium phosphate; commercial superphosphate, from Araxá and another from Catalão. The second experimental factor were the doses of phosphorus (0, 40, 80 and 160 kg ha⁻¹). For the anatomical evaluations, the collected material was fixed in F.A.A.70%, stored in 70% ethanol and submitted to the series of ethanolic dehydration for subsequent slides preparation and to obtain histometric data. The results of the present study showed that the pure salt application presented similar values to the commercial formulation containing very low amounts of REE. This shows that the higher doses of REE (formulation from Catalão and Araxá) had more evident responses on the bean plant. There was reduction of the epidermis and foliar parenchyma; thickening of epidermis, cortex, endoderm, phloem and diameter of metaxylem vessels in bean root, especially in plants that received the highest REE levels and at 80 and 160 kg ha⁻¹ doses of phosphorus. Thus, it is suggested the application of the formulations rich in REE (Araxá and Catalão) since it already contains the element P essential to the crop production, without compromising the growth.

Keywords: Fertilizer. *Phaseolus vulgaris*. phosphate.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente os elementos terras raras (ETR) são indispensáveis em muitas atividades industriais e tecnologias que envolvem metalurgia, cerâmica, ímãs, petróleo, eletrônicos, imagens médicas, entre outros (TYLER, 2004). Os ETR são 17 elementos (lantanídeos, ítrio e escândio) que formam um grupo extremamente homogêneo, devido às suas propriedades físicas e químicas especiais, como ótimos condutores elétricos. Além da produção industrial, ETR são encontrados também em fertilizantes agrícolas (KOBAYASHI et al., 2007).

Na China os ETR têm sido utilizados na agricultura desde a década de 1970 com intuito de aumentar o rendimento e a qualidade das culturas, via fosfatos, nitratos, cloretos e óxidos de ETR (LIU et al., 2012; MASSARI; RUBERTI, 2013). Diferentemente da China, outros países não enriquecem os fertilizantes com ETR. Por outro lado, esses elementos estão associados às rochas fosfatadas ígneas destinadas a produção de fertilizantes (TYLER, 2004). Desta maneira, há relatos na literatura que os fertilizantes fosfatados e o gesso agrícola são carreadores indiretos de ETR para os sistemas agrícolas (RAMOS et al., 2016), destacando que o consumo de fertilizantes fosfatados é elevado, notadamente em regiões tropicais.

Atualmente, ETR são considerados minerais estratégicos, juntamente com o gálio e o manganês (ISHEE, ALPERN, DEMAS, 2013). No entanto, o crescimento no uso e exploração resultou em níveis crescentes de ETR no ambiente, sendo considerados poluentes emergentes (YANG et al., 2009). O solo é o destino principal da maioria dos produtos/subprodutos contendo ETR, no entanto pouco ainda se sabe sobre os efeitos destes no ambiente, incluindo efeitos sobre as plantas, animais e seres humanos. Como consequência do crescente uso em práticas industriais e agrícolas, há a possibilidade de aumento dos níveis de “poluição” e o papel biológico dos ETR ainda está em seus estágios iniciais (SKOVRAN; MARTINEZ-GOMEZ, 2015), que reforça a necessidade de

pesquisa para entender melhor os efeitos, fato associado também à falta de métodos de reciclagem rentáveis. Apesar do crescente interesse, ainda há lacunas e um número limitado de publicações com foco nos estudos relacionados ao transporte e ação desses elementos nos vegetais.

Embora alguns pesquisadores tenham relatado que em baixas concentrações os ETR são benéficos para o crescimento das plantas (d'AQUINO et al., 2009), quantidades excessivas podem ter efeito negativo significativo no crescimento das plantas e na saúde humana (KOBAYASHI et al., 2007). Sabe-se que ETR podem entrar nas organelas celulares, influenciando o crescimento das plantas e, principalmente, ser ligado às macromoléculas biológicas. Apesar de quase um século de pesquisa, algumas questões, tais como o modo, local e como os ETR atuam nas células vegetais, ainda são desconhecidos (THOMAS et al. 2014, WANG et al., 2014). Atualmente, ainda não há relatos na literatura mostrando como a anatomia vegetal poderia auxiliar neste sentido, visto que para outros elementos essa relação foi bem detalhada.

O Phaseolus vulgaris L. é fonte de nutrientes essenciais como proteínas, ferro, cálcio, vitaminas, carboidratos e fibras, além de participar da geração de emprego e renda. O fornecimento de fertilizantes, principalmente os fosfatados contribuem significativamente para o aumento da produção e do valor nutricional dos grãos (SOUZA et al., 2006). No entanto, não há relatos de ensaios de campo mostrando o crescimento e a produção do feijoeiro em função da aplicação fertilizantes portadores de ETR.

Diante disso, o objetivo do presente estudo foi avaliar os efeitos da aplicação via solo de quatro fertilizantes fosfatados em plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*), levando em consideração as respostas, tanto na anatomia foliar quanto radicular.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) no município de Lambari-MG. A análise química do solo encontra-se no anexo 1. As adubações de base plantio e de cobertura, assim como o controle de plantas invasoras e pragas foram realizadas de acordo com recomendações da 5ª aproximação do Manual de adubação e calagem de Minas Gerais e ainda balizados em publicações referentes à cultura do feijão da Empresa Brasileira de Pesquisa em Agropecuária – EMBRAPA.

O experimento foi realizado em esquema fatorial 4 x 4, com quatro repetições, sendo quatro fertilizantes tendo com diferentes concentrações de ETR: sal puro de fosfato de amônio (sem ETR); superfosfato com origem desconhecida (comercial-baixo teor de ETR); superfosfato de Araxá e outro de Catalão (conteúdo de ETR intermediário e alto respectivamente). Os teores de ETR presentes em cada formulado encontra-se no anexo 2. O segundo fator experimental (nível P_2O_5), consistiu de quatro doses (0, 40, 80, e 160 kg ha⁻¹). As parcelas experimentais consistiram em quatro linhas (com comprimento de 5m), cada uma contendo 0,5 m de plantas igualmente espaçadas.

A aplicação dos fertilizantes ocorreu no plantio, sendo adicionados também nas parcelas experimentais 100 kg ha⁻¹ de N e K₂O, aplicado sob a forma de ureia e cloreto de potássio, respectivamente. Para os tratamentos que receberam o sal de fosfato de amônio puro, o N presente neste fertilizante foi deduzido da fertilização nitrogenada visando igualar a sua taxa de N à utilizada nos outros tratamentos. O experimento foi conduzido até a produção de grãos.

2.1 Análises anatômicas

Para as avaliações anatômicas, o material foi coletado no estágio fenológico de enchimento dos grãos, as amostras foliares (0,5 cm x 0,5 cm) de

foram retiradas da região mediana da folha e nas raízes, na região da zona pilífera, 2 cm de distância do ápice radicular. Os fragmentos foram fixados em F.A.A.^{70%} (formaldeído, ácido acético e etanol 70% na proporção de 1:1:18), posteriormente armazenado em etanol 70% (JOHANSEN, 1940). Para a confecção do laminário, as amostras de raiz e folha já fixadas foram submetidas à série de desidratação etanólica (70%, 90% e 100%), permanecendo por duas horas em cada uma das soluções. Após essa etapa, as amostras foram infiltradas e incluídas em Kit Historesina de hidroxietilmetacrilato (Leica®, Heidelberg, Alemanha), seguindo as instruções propostas pelo fabricante. As secções transversais foram realizadas com auxílio de micrótopo semiautomático rotativo (KD-3368, Ciencor Scientific, São Paulo, Brasil), com a espessura ajustada para 8 µm. Esse material foi corado com azul de toluidina 1% e as secções montadas em lâmina e lamínula com bálsamo do Canadá (O'BRIEN, FEDES, MCCULLY 1964).

As lâminas foram observadas em microscópio trinocular (CX31, Olympus Tokyo, Japan) com sistema de captura acoplado, sendo digitalizadas e analisadas em software de análise de imagem UTHSCSA-Imagetool. As avaliações anatômicas quantitativas foram realizadas em 4 repetições para cada tratamento, sendo confeccionada uma lâmina por repetição, fotografadas cinco secções por lâmina e mensurados quatro campos por imagem.

Foram avaliados os seguintes tecidos/estruturas foliares: espessuras das epidermes, espessura do parênquima paliçádico, espessura do parênquima esponjoso, número de vasos de metaxilema, área do xilema da nervura central, área do floema da nervura central, área total da nervura central; e radiculares: espessura da epiderme, espessura do córtex, espessura da endoderme, diâmetro do metaxilema, espessura do floema. Além destes foram calculados proporção de cilindro vascular na área total da raiz ($P = \text{área do cilindro} / \text{área da raiz}$).

3 RESULTADOS

A aplicação via solo de fertilizantes fosfatados contendo ETR causou modificações significativas tanto na anatomia foliar quanto radicular em plantas de feijão. De maneira geral, houve interação significativa entre as doses de P_2O_5 e os formulados com diferentes doses de ETR. Quando se comparou o efeito das diferentes doses de ETR (formulados) na estrutura foliar, houve redução na epiderme do feijoeiro, fato observado para os fertilizantes que continham ETR. Do mesmo modo, o parênquima paliçádico e esponjoso reduziu as espessuras no tratamento com formulado de maior concentração de ETR, fato verificado para as doses de 80 e 160 $kg\ ha^{-1}\ P_2O_5$. Já a epiderme da face abaxial não apresentou modificações decorrentes da aplicação dos diferentes formulados. O número de feixes aumentou na aplicação do formulado de Catalão nas doses de 80 e 160 $kg\ ha^{-1}\ P_2O_5$ (TABELA 1) e essas mesmas doses e produto promoveram redução na epiderme adaxial.

O parênquima paliçádico teve redução significativa na concentração de 160 $kg\ ha^{-1}\ P_2O_5$ somente no formulado de Catalão, já o parênquima esponjoso reduziu nas três concentrações de fósforo, quando aplicado esse mesmo produto. A epiderme abaxial também reduziu na dose de 80 $kg\ ha^{-1}\ P_2O_5$ no formulado de Catalão e na concentração de 160 $kg\ ha^{-1}\ P_2O_5$ nos formulados de Araxá e Catalão. Por outro lado, o número de feixes aumentou em todas as concentrações de fósforo e nas três concentrações de ETR (TABELA 1 e FIGURA 1),

Tabela 1- Espessura dos tecidos foliares de plantas de *Phaseolus vulgaris* em diferentes concentrações de ETR e P₂O₅.

Epiderme adaxial				
Tratamentos (kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	15,02 ± 1,66 aA	12,83 ± 1,50 aB	12,37 ± 0,76 aA	14,09 ± 1,30 aA
40	12,64 ± 1,17 aA	11,38 ± 1,11 aB	13,21 ± 1,57 aA	14,89 ± 1,78 aA
80	13,39 ± 2,03 aB	15,14 ± 1,43 aA	13,49 ± 1,12 aA	10,87 ± 1,22 bB
160	15,06 ± 2,18 aA	13,13 ± 1,31 aB	13,69 ± 1,23 aA	12,73 ± 1,10bB
CV%	21,58	21,58	21,58	21,58
Parênquima paliçádico				
Tratamentos (kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	78,07 ± 5,98 aA	80,45 ± 10,01 aA	73,49 ± 5,91 aA	82,91 ± 10,66 aA
40	83,66 ± 6,40 aA	81,21 ± 9,60 aA	83,54 ± 7,78 aA	88,46 ± 8,68 aA
80	71,29 ± 6,23 aA	86,25 ± 11,76 aA	81,41 ± 7,75 aA	75,45 ± 8,01 aB
160	81,02 ± 6,75 aA	75,82 ± 4,56 aA	83,89 ± 10,30 aA	66,62 ± 8,46 bB
CV%	20,94	20,94	20,94	20,94
Parênquima esponjoso				
Tratamentos (kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	80,09 ± 9,30 aA	79,88 ± 7,50 aA	86,89 ± 9,28 aA	88,34 ± 6,03 aA
40	84,03 ± 7,80 aA	78,82 ± 6,37 aA	77,06 ± 10,40 aA	91,49 ± 3,95 aA
80	76,38 ± 4,75 aA	90,92 ± 9,24 aA	83,50 ± 4,30 aA	62,94 ± 8,01 bB
160	82,04 ± 4,32 aA	83,44 ± 7,02 aA	84,56 ± 7,02 aA	71,66 ± 7,97bB
CV%	21,43	21,43	21,43	21,43
Epiderme abaxial				
Tratamentos (kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	12,92 ± 0,82aA	12,14 ± 1,65 aA	12,38 ± 0,80 aA	12,76 ± 0,82 aA
40	11,11 ± 1,36 aA	11,05 ± 1,48 aA	11,97 ± 1,02 aA	12,36 ± 1,30 aA
80	12,79 ± 1,53 aA	11,42 ± 1,31 aA	11,35 ± 1,10 aA	10,07 ± 0,84 bA
160	13,23 ± 1,23 aA	12,44 ± 1,20 aA	11,35 ± 1,41 bA	11,75 ± 1,83bA
CV%	20,92	20,92	20,92	20,92
Número de feixes				
Tratamentos(kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	27 ± 0,83 aA	20 ± 0,12 aA	17 ± 0,54 aA	15 ± 0,44 aB
40	21 ± 0,34 aA	20 ± 0,33 aA	13 ± 0,93 aA	16 ± 0,56 aB
80	26 ± 0,24 aA	20 ± 0,65 bA	15 ± 0, 34 bA	20 ± 0,75 bA
160	22 ± 0,34 aA	16 ± 0,65 bA	15 ± 0,87 bA	20 ± 0,45 bA
CV%	26,67	26,67	26,67	26,67

Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna e letras minúsculas diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre as médias nas concentrações testadas na solução (kg ha⁻¹), pelo teste Scott-Knott. ±: Erro padrão da média.

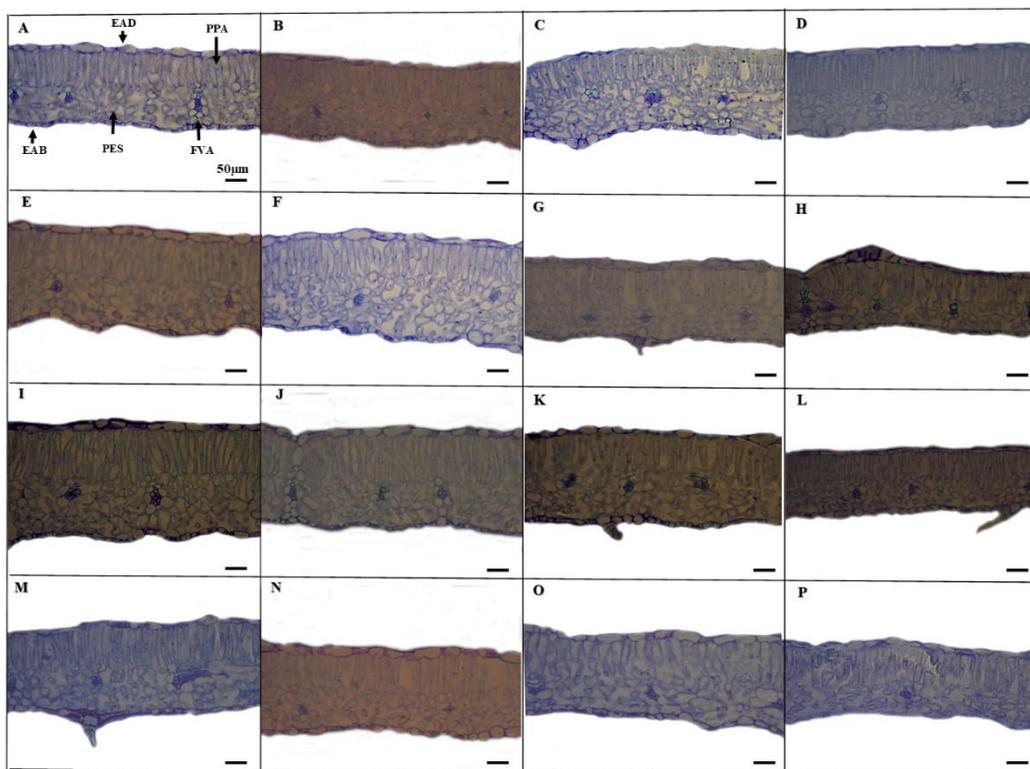


Figura 1- Secções transversais de folhas de *Phaseolus vulgaris* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. Sal puro: A, B, C e D; Formulado comercial: E, F, G e H; Formulado de Araxá: I, J, K e L; Formulado de Catalão: M, N, O e P. 0 kg ha⁻¹ P₂O₅: A, E, I e M; 40 kg ha⁻¹ P₂O₅: B, F, J e N; 80 kg ha⁻¹ P₂O₅: C, G, K e O; 160 kg ha⁻¹ P₂O₅: D, H, L e P. Barras= 50µm. EAD- Epiderme na face adaxial; EAB- Epiderme na face abaxial; FVA: Feixe vascular; PAP- Parênquima paliçádico; PES- Parênquima esponjoso).

A aplicação dos fertilizantes fosfatados contendo diferentes teores de ETR influenciou na área do xilema da nervura central, a qual foi espessada pelo formulado comercial na dose de 80 kg ha⁻¹ P₂O₅, e para os produtos de Araxá e Catalão na dose de 160 kg ha⁻¹ P₂O₅. Da mesma forma, a área do floema aumentou com a aplicação do formulado comercial (80 e 160 kg ha⁻¹ P₂O₅) e produtos de Araxá e Catalão (160 kg ha⁻¹ P₂O₅). A área total da nervura apresentou redução

na aplicação do formulado comercial (160 kg ha⁻¹ P₂O₅), Araxá (40 e 80 kg ha⁻¹ P₂O₅) e de Catalão em 160 kg ha⁻¹ P₂O₅. Com relação as doses de fósforo, todas essas aumentaram a área do xilema quando associado ao formulado comercial, bem como a área do floema em 40 e 80 kg ha⁻¹ P₂O₅(TABELA 2 e FIGURA 2).

Tabela 2- Espessura dos tecidos na nervura central das folhas de *Phaseolus vulgaris* em diferentes concentrações de ETR.

Área do xilema				
Tratamentos(kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	23707,26 ± 127,40 aA	22978,97 ± 212,11 aB	212171,12 ± 225,32 aB	19390,75 ± 491,22 aB
40	18212,71 ± 111,12bA	23440,67 ± 391,22 aB	16502,94 ± 554,16 bB	17607,21 ± 402,65 bB
80	17417,04 ± 773,27 bA	34741,71 ± 723,11 aA	20484,26 ± 547,21 bB	15947,78 ± 272,39 bB
160	22947,62 ± 791,17 bA	19388,24 ± 783,04 bB	27106,59 ± 243,49 aA	22807,30 ± 494,16 bA
CV%	17,55	17,55	17,55	17,55
Área do floema				
Tratamentos(kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	27302,89 ± 229,04aA	26805,96 ± 921,43 aB	24382,73 ± 216,43 aB	21540,35 ± 532,54 aB
40	21943,25 ± 255,20bA	27643,46 ± 407,48 aB	19341,72 ± 281,43 aB	21792,26 ± 711,42 bB
80	21753,80 ± 526,34bA	34468,44 ± 294,54 aA	23387,02 ± 270,98 bB	19186,72 ± 566,44bB
160	23391,97 ± 313,43aA	30962,89 ± 351,23 ab	27941,73 ± 365,10 aA	24104,71 ± 618,93aA
CV%	26,85	26,85	26,85	26,85
Área total da nervura				
Tratamentos(kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	793,86 ± 20,04 aA	844,26 ± 12,49 aA	804,27 ± 37,60 aA	774,70 ± 15,28 aA
40	766,92 ± 36,23 aA	777,43 ± 42,12 aA	797,78 ± 44,12 aB	797,08 ± 15,62 aA
80	720,66 ± 45,15 aA	736,88 ± 36,23 aA	711,65 ± 17,54 bB	740,16 ± 17,35 aA
160	737,68 ± 31,22 aA	724,89 ± 4932 aB	725,88 ± 26,36 aA	720,78 ± 47,13 aB
CV%	11,62	11,62	11,62	11,62

Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna e letras minúsculas diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre as médias nas concentrações testadas na solução (kg ha⁻¹), pelo teste Scott-Knott. ±: Erro padrão da média.

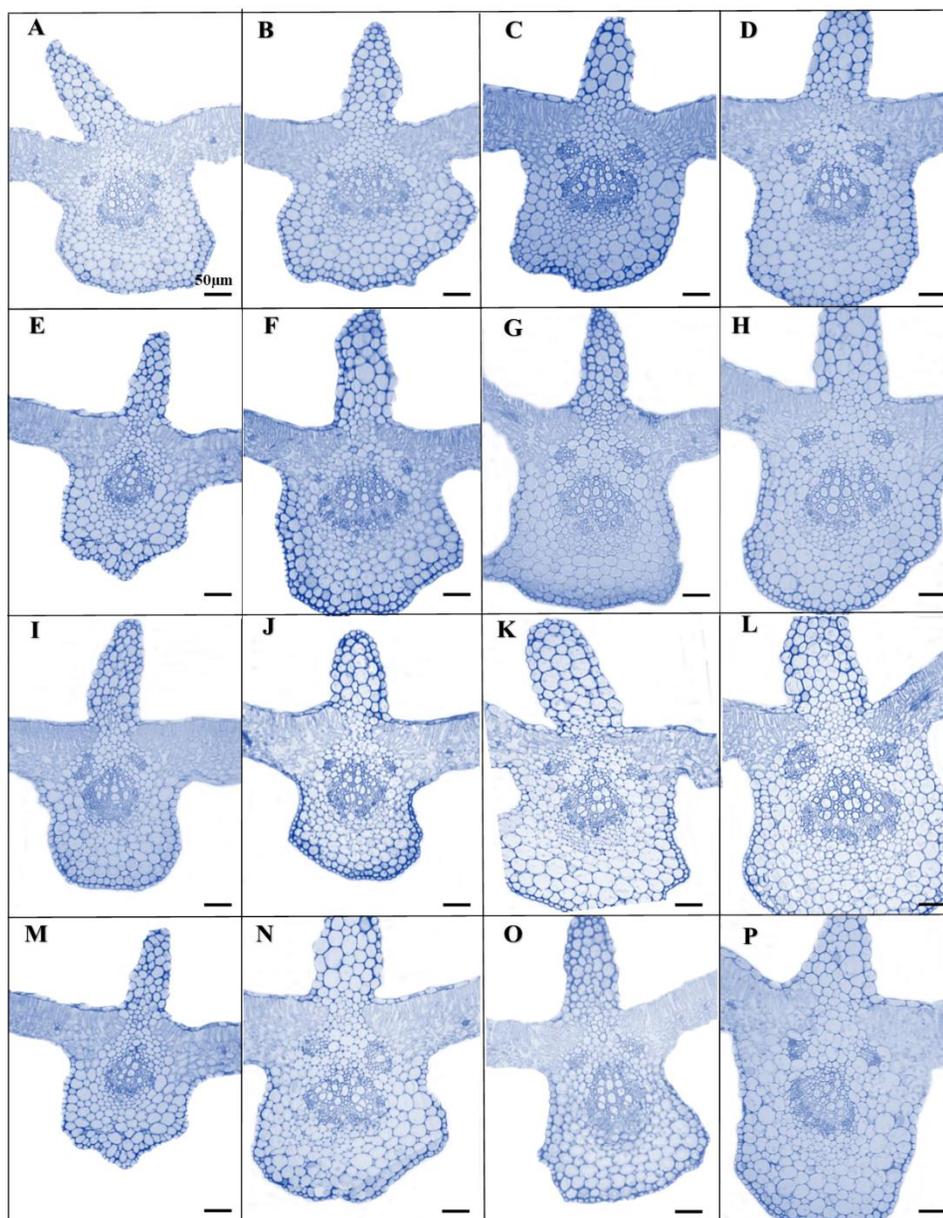


Figura 2- Secções transversais de nervuras de *Phaseolus vulgaris* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. Sal puro: A, B, C e D; Formulado comercial: E, F, G e H; Formulado de Araxá: I, J, K e L; Formulado de Catalão: M, N, O e P. 0 kg ha⁻¹ P₂O₅: A, E, I e M; 40 kg ha⁻¹ P₂O₅: B, F, J e N; 80 kg ha⁻¹ P₂O₅: C, G, K e O; 160 kg ha⁻¹ P₂O₅: D, H, L e P. Barras= 50μm.

O córtex, apresentou aumento significativo apenas na aplicação do formulado comercial nas doses de 80 e 160 kg ha⁻¹ P₂O₅. Já a espessura da endoderme, não diferiu significativamente. O diâmetro do metaxilema da raiz foi maior nos três formulados, sendo o Catalão apenas para a maior dose de P. Por outro lado, a espessura do floema aumentou apenas na aplicação do formulado de Araxá. A proporção da área total e cilindro vascular foi maior no formulado de Araxá (80 kg ha⁻¹ P₂O₅) e de Catalão (40 e 160 kg ha⁻¹ P₂O₅).

Avaliando as diferentes doses de P, nota-se que a epiderme foi mais espessa nos tratamentos de 40 e 80 kg ha⁻¹ P₂O₅ (formulado comercial e Araxá) e 160 kg ha⁻¹ P₂O₅ para todas as concentrações de ETR. A endoderme, apresentou espessamento em todas as concentrações de P e formulados, mesmo com diferentes teores de ETR. O diâmetro de vasos no metaxilema foi maior apenas na dose de 160 kg ha⁻¹ P₂O₅ na aplicação dos formulados comercial e de Catalão. Por sua vez, a proporção do cilindro vascular foi menor em 40 (formulado comercial e Araxá) e reduziu em todos os formulados em 80 e 160 kg ha⁻¹ P₂O₅ (TABELA 3 e FIGURA 3).

Tabela 3- Espessura dos tecidos radiculares de *Phaseolus vulgaris* em diferentes concentrações de ETR.

Epiderme				
Tratamentos(kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	19,36 ± 2,32 aA	16,82 ± 1,63 aB	15,53 ± 2,41 aB	17,11 ± 2,14 aB
40	14,82 ± 5,51 bA	20,23 ± 1,93 aA	18,41 ± 2,05 aA	16,18 ± 1,63 bA
80	16,24 ± 1,75 bA	22,81 ± 2,09 aA	17,07 ± 1,64 bA	18,91 ± 2,14 bA
160	15,56 ± 1,32 bA	22,68 ± 2,23 aA	18,70 ± 1,93 bA	21,69 ± 2,62 aA
CV%	22,95	22,95	22,95	22,95
Córtex				
Tratamentos(kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	210,42 ± 13,94 aA	178,76 ± 20,83 aC	184,56 ± 12,63 bA	209,30 ± 8,74 aA
40	158,02 ± 16,73 bA	180,15 ± 12,20 aC	189,78 ± 20,15 aA	147,27 ± 19,57 bA
80	198,79 ± 8,46 bA	225,75 ± 8,22 aB	149,26 ± 13,03 cA	192,68 ± 13,52 bA
160	147,75 ± 5,70 dA	283,40 ± 7,03 aA	180,73 ± 17,41 cA	212,15 ± 13,37bA
CV%	17,31	17,31	17,31	17,31
Endoderme				
Tratamentos(kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	14,79 ± 1,28 aA	14,08 ± 1,54 aA	14,30 ± 1,94 aA	18,64 ± 1,93 aA
40	11,55 ± 1,91 bA	16,22 ± 1,81 aA	16,09 ± 2,01 aA	14,20 ± 2,03 aA
80	14,72 ± 1,57 bA	16,07 ± 1,60 aA	15,65 ± 1,71 aA	14,25 ± 2,15 aA
160	13,17 ± 1,48 bA	16,60 ± 1,80 aA	15,21 ± 1,59aA	17,13 ± 1,51 aA
CV%	23,85A	23,85	23,85	23,85
Diâmetro do metaxilema				
Tratamentos(kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	50,46 ± 4,80 aA	44,47 ± 3,41 bB	45,25 ± 2,71 bB	55,07 ± 3,72 aB
40	56,26 ± 4,32 aA	62,98 ± 2,67 aA	59,56 ± 4,39 aA	56,76 ± 4,27 aB
80	60,92 ± 5,01 aA	56,25 ± 4,35 aA	50,86 ± 5,72 aB	56,72 ± 3,21 aB
160	53,74 ± 6,05 bA	65,69 ± 3,44 aA	45,28 ± 4,18 bB	66,44 ± 3,20 aA
CV%	25,41	25,41	25,41	25,41
Floema				
Tratamentos(kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	58,31 ± 3,81 aA	69,47 ± 5,82 aA	56,12 ± 2,51 aB	63,83 ± 1,51 aA
40	60,54 ± 5,22 bA	82,44 ± 5,94 aA	73,76 ± 2,10 aA	70,75 ± 4,40 aA
80	65,14 ± 4,41 bA	77,28 ± 5,78 aA	66,18 ± 1,57 bA	73,54 ± 4,19 aA
160	51,85 ± 5,30 bA	82,44 ± 5,43 aA	58,03 ± 2,33 bA	77,63 ± 5,29 aA
CV%	22,27	22,27	22,27	22,27
Proporção do cilindro				
Tratamentos (kg ha ⁻¹)	Sal Puro	Comercial	Araxá	Catalão
0	19,91 ± 3,34 aA	23,37 ± 2,71 aA	17,02 ± 1,46 aB	15,42 ± 0,94 aB
40	22,36 ± 1,70 aA	17,44 ± 0,94 aA	19,99 ± 2,52 bB	18,33 ± 1,42 aA
80	30,06 ± 1,91 aA	26,30 ± 1,71 bA	25,33 ± 4,35 bA	17,73 ± 3,82 bB
160	26,17 ± 0,93 aA	25,43 ± 2,69 bA	17,73 ± 2,71 bB	24,90 ± 2,13 aA
CV%	21,35	21,35	21,35	21,35

Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna e letras minúsculas diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre as médias nas concentrações testadas na solução (kg ha⁻¹), pelo teste Scott-Knott. ±: Erro padrão da média.

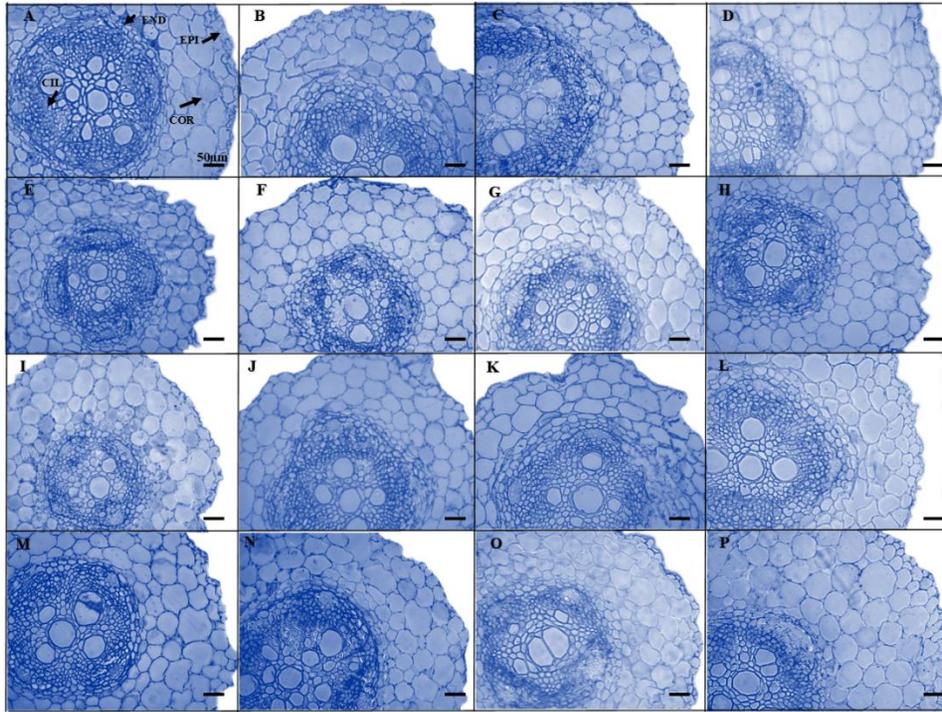


Figura 3- Seções transversais de raízes de *Phaseolus vulgaris* submetidas a diferentes concentrações de MIX de ETR. Sal puro: A, B, C e D; Formulado comercial: E, F, G e H; Formulado de Araxá: I, J, K e L; Formulado de Catalão: M, N, O e P. $0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$: A, E, I e M; $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$: B, F, J e N; $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$: C, G, K e O; $160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$: D, H, L e P. Barras= $50 \mu\text{m}$. EPI- Epiderme; COR: Córte; END: Endoderme; CIL: Cilindro vascular.

Também, observou-se que o sal puro de fosfato de amônio (que não portava ETR) promoveu valores semelhantes ao tratamento com baixo teor de ETR (formulado comercial), tanto para as variáveis foliares quando para as radiculares. Isso mostra que as maiores concentrações de ETR tiveram respostas no sentido de reduzir as espessuras dos tecidos foliares, podendo minimizar a resistência à difusão de gases no interior da folha; e aumentar a área radicular e manter, assim, o desenvolvimento das plantas, mesmo nas maiores doses aplicadas e mitigando possíveis efeitos negativos.

DISCUSSÃO

Muitos estudos foram realizados sobre os efeitos fisiológicos relacionados com a aplicação de ETR em plantas, porém, são escassos os trabalhos de campo associando esses elementos em culturas agrícolas e estudos anatômicos. Neste trabalho, foi possível reafirmar que, dependendo do produto fosfatado e do teor de ETR, a espécie estudada pode apresentar comportamento distinto. De modo geral, as plantas de feijoeiro respondem de maneira a minimizar possíveis efeitos negativos, alterando a espessura de tecidos e números de estruturas, principalmente nas maiores concentrações de ETR.

De maneira geral, as plantas expostas a elementos tóxicos, podem sofrer alterações em sua anatomia e fisiologia, que caracterizam sua plasticidade sob estresse e permitem sua sobrevivência na presença destes ou, ao contrário, afetam negativamente seu crescimento e desenvolvimento devido à toxicidade (ARGENTA et al., 2013). As mudanças anatômicas da folha são usadas como indicadores de sintomas de estresse (NIINEMETS; SACK 2006). Notadamente, mudanças no sistema anatômico que permitem às plantas resistirem aos efeitos destes elementos, são principalmente orientadas para manter a eficiência do uso da água e equilibrar o ganho de carbono na tolerância do estresse no meio. Nas plantas que crescem em solos “poluídos”, o parênquima fotossintético é menos desenvolvido (ou seja, a folha é menos espessa assim como os dados obtidos), é constituída de um número de célula inferior e pouco organizado. Assim, modificações anatômicas nas espessuras destes tecidos são de fundamental importância, uma vez que terão relação direta com a fotossíntese.

Uma importante função da epiderme foliar é a troca gasosa (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009), assim, mudanças na espessura deste tecido podem afetar a transpiração, bem como a resistência à difusão de CO₂. Assim como a

redução observada nos tecidos foliares de feijão, isso poderia favorecer a difusão de CO₂ nas folhas pela redução das rotas a serem executadas até os cloroplastos.

O conhecimento ainda é limitado sobre a acumulação de ETR em culturas agrícolas, uma vez que tais elementos podem entrar nas raízes em formas iônicas do solo, através das células epidérmicas, corticais ou endodérmicas e, em seguida, movendo-se através do continuum citoplasmático para o tecido vascular das raízes (NAGAHASHI et al., 1974), sendo translocados através de fluxo de água da transpiração. O papel das raízes é muito importante, agindo como local de deposição e inativação do metal. A literatura relata o acúmulo de La na raiz em forma de cristais, tornando os ETR metabolicamente inativos, protegendo e mantendo processos metabólicos. Em estudo realizado por Hu et al. (2002) a deposição foi homogênea em todos os tecidos radiculares, incluindo epiderme, parênquima cortical, endoderme, periciclo, xilema e floema a 160 µM de La. Tal deposição pode contribuir com o espessamento justificando o espessamento dos tecidos radiculares do feijão.

Normalmente, ETR são retidos primeiramente nas barreiras radiculares que são as principais vias para a retenção e alocação, contribuindo para redução na baixa translocação desses elementos, a fim de evitar interferências em tecidos fotossintéticos. Há relatos que em raízes de milho, La poderiam se ligar, e (ou) deslocaram Ca a partir de locais de membrana normalmente ocupados por Ca e Nagahashi et al. (1974) atribuíram a faixa de Caspary a barreira à difusão de La no apoplasto do córtex. Neste sentido, o espessamento das barreiras apoplástica nas raízes de feijão podem ter evitado que ETR fossem translocados. Sendo endoderme é a principal limitante do fluxo da parte externa das raízes para o cilindro vascular, contribui para o acúmulo das substâncias no córtex desta forma, o aumento no córtex e na própria endoderme, assim como observado em *Echinodorus grandiflorus* (RIBEIRO et al., 2015).

A via de transporte apoplástico, que deve ser estreitamente relacionada com a espessura da parede celular/tecidos, tem sido sugerida como a maior via de transporte de água para fora do xilema. Além disso, o movimento apoplasmático para o xilema, ainda pode ser restringido pelo desenvolvimento da exoderme, endoderme e outras barreiras extracelulares que no caso deste trabalho podem dificultar a entrada de ETR no corpo da planta como mencionado. As modificações no xilema radicular interferem na capacidade de condução de água e nutrientes. O aumento observado no número de feixes vasculares presentes no mesofilo pode indicar que o transporte de assimilados, fito-hormônios e nutrientes nas folhas não foi prejudicado por ETR, permitindo a distribuição desses metabólitos ao longo do corpo da planta. O floema é um dos principais tecidos para a manutenção do crescimento radicular pois transporta fotoassimilados para as regiões meristemáticas da raiz permitindo a proliferação celular e o crescimento das raízes. Assim, o aumento observado no floema das raízes do feijoeiro pode favorecer o fluxo do fotoassimilado, levando a um maior crescimento radicular.

CONCLUSÕES

As avaliações anatômicas podem fornecer importantes informações em termos dos efeitos de ETR sobre as plantas de feijão e o potencial de utilização desses elementos na agricultura. No feijão, a aplicação do sal puro apresentou valores semelhantes ao formulado comercial, mostrando que as maiores concentrações de ETR nos formulados de Catalão e Araxá tiveram respostas mais evidentes na redução de tecidos foliares e espessamento de tecidos radiculares.

REFERÊNCIAS

CASTRO, E. M.; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia vegetal: estrutura e função de órgãos vegetativos**. Lavras: UFLA, 2009. 234 p.

D'AQUINO, L. et al. Effect of some rare earth elements on the growth and lanthanide accumulation in different *Trichoderma strains*. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 12, p. 2406-2413, dec. 2009.

FABRICIO J. PEREIRA, et al. Lead tolerance of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* Mart. - Pontederiaceae) as defined by anatomical and physiological traits. **Anais Da Academia Brasileira de Ciências**, 86(3), 1423–1433, 2014. <http://doi.org/10.1590/0001-3765201420140079>

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

HACKE, U.G.; SPERRY, J.S. Functional and ecological xylem anatomy. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, v.4, p.97-115, 2001.

HU, Z. et al. Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: A Review. **J. Plant Nutr.**, Oxfordshire, v.27, n.1, p.183–220, 2004.

ISHEE, J., ALPERN, E., DEMAS, A. **Going critical**: being strategic with our mineral resources. Reston, VA: U.S. Geol. Surv. Sci., 2013. Disponível em: <https://www2.usgs.gov/blogs/features/science_feature/minerals/>. Acesso em: 22 ago. 2017.

JOHANSEN, D.A. **Plant microtechnique**. 2nd. ed. New York: Mc-Graw-Hill, 1940. 523 p.

KOBAYASHI, Y., et al. Characterisation of lanthanum toxicity for root growth of *Arabidopsis thaliana* from the aspect of natural genetic variation. **Funct. Plant Biol.** Collingwood, VIC, v. 34, p. 984-994, 2007.

LIU, D. et al. Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings. **Plant Soil Environ.**, Prague, v. 59, n. 5, p. 196–200, 2012.

MAHMOOD, Q., et al. Anatomical studies on water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) under the influence of textile wastewater. **J. Zhejiang University SCI 6B**, 991-998,2005. DOI: 10.1007/BF02888490

MARQUES, T. C. L. L. S. M.; SOARES, A. M.; GOMES, M. P.; MARTINS, G. Respostas fisiológicas e anatômicas de plantas jovens de Eucalipto expostas ao cádmio. **Revista Árvore**, v. 35, n. 5, p. 9971006, 2011.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000600005>

MASSARI S, RUBERTI M. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. **Resour. Policy**, Amsterdam, v.38, p.36–43, 2013.

MIYAZAWA, S. I.; TERASHIMA, I. Slow development of leaf photosynthesis in an evergreen broad-leaved tree, *Castanopsis sieboldii*: relationships between leaf anatomical characteristics and photosynthetic rate. **Plant, Cell & Environment**, v. 24, p. 279-291, 2001. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00682.x>

NAGAHASHI, G., THOMSONW, W., LEONARD, R. T. The Casparian strip as a barrier to the movement of lanthanum in corn roots. **Science**, Washington DC v. 183, n. 4125, p. 670–671, 1974.

O'BRIEN, T.P.; FEDER, N.; MCCULLY, M.E. Polychromatic staining of plant cell walls by Toluidine Blue. **Protoplasma**, Viena, v. 59, n. 2, p. 368-373, 1964.

RAMOS, S. J. et al. Rare Earth Elements in the Soil Environment. **Current Pollution Reports**, Amsterdam, v.2, n.1, p.28–50, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s40726-016-0026-4>>. Acesso em: 12 março 2017.

PIRES, M. F., et al. Mechanisms of the internal structure and operation of *Panicum aquaticum* in response to arsenic. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, 56, 89–94, 2013. <http://doi.org/10.4322/rca.2013.086>

RIBEIRO, E. S. et al. Relações da anatomia radicular na absorção, no acúmulo e na tolerância ao chumbo em *Echinodorus grandiflorus*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental**, 19(6), 605–612, 2015.
<http://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p605-612>

RIM, K.-T. Effects of rare earth elements on the environment and human health: A literature review. **Toxicology and Environmental Health Sciences**, v. 8, n.3, p. 189–200, 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1007/s13530-016-0276-y>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

SHYAM, R., AERY, N., Effect of cerium on growth, dry matter production, biochemical constituents and enzymatic activities of cowpea plants (*Vigna unguiculata* L.) Walp.). **J. Soil Sci. Plant Nutr.** Weinheim, v. 12, n.1, p. 1-14, 2012.

SKOVRAN, E., MARTINEZ-GOMEZ, N. C. Just add lanthanides. **Science**, Washington DC, v. 348, p. 862–863, 2015.

SOUZA, R. F. de. et al. Nutrição fosfatada e rendimento do feijoeiro sob influência da calagem e adubação orgânica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.30, n. 4, p. 656-664, 2006.

SOUZA, T.C. de; CASTRO, E.M. de; PEREIRA, F.J. ; PARENTONI, S.N. ; MAGALHÃES, P.C. Morpho-anatomical characterization of root in recurrent selection cycles for flood tolerance of maize (*Zea mays* L.). *Plant, Soil and Environment*, v.55, p.504-510, 2009

THOMAS, P.J., et al. Rare Earth elements (REE): effects on germination and growth os selected crop and native plant species. **Chemosphere**, Oxford, v.96, p.57-66, 2014.

TYLER, G. Rare earth elements in soil and plant systems: a review. **Plant Soil**, Berlin, v.267, n.1 e 2, p.191–206, 2004.

WANG, L. et al. Combined effects of lanthanum (III) chloride and acid rain on photosynthetic parameters in rice. **Chemosphere**, Oxford, v.112, p.355–61, 2014.

WANG, X. et al. Cerium toxicity, uptake and translocation in *Arabidopsis thaliana* seedlings. **J. Rare Earths The Chinese Society of Rare Earths**, Beijing, V. 30, p, 579–85, 2012.

WEN, B., et al. The influence of rare earth element fertilizer application on the distribution and bioaccumulation of rare earth elements in plants under field conditions. **Chemical Speciation & Bioavailability**, Abingdon, v. 12, n.2, p. 39–48, 2001. Disponível em: <<http://doi.org/10.3184/095422901783726825>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

YANG, Q. et al. Effect of Lanthanum (III) on the production of ethylene and reactive oxygen species in soybean seedlings exposed to the enhanced ultra-violet-B radiation. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* Amsterdam, v. 154, p. 152-159, 2014.

ZENG, Q. et al. Phytotoxicity of lanthanum in rice in haplic acrisols and cambisols. *Ecotoxicol. Environ Saf.* Amsterdam, v. 64, p. 226-3, 2006.

ZHU, J., BROWN, K.M., LYNCH, J.P. Root cortical aerenchyma improves the drought tolerance of maize (*Zea mays* L.). *Plant Cell Environ*, Oxford, UK, v. 33, n.5, p. 740-749, 2010.

ANEXO 1- Propriedades químicas das áreas de estudo.

Propriedades	Lambari-MG
pH (H ₂ O)	5,2
Matéria Orgânica (dag kg ⁻¹)	5,26
P (mg dm ⁻³)	16
K(mg dm ⁻³)	50
Ca (cmol dm ⁻³)	0,91
Mg (cmol dm ⁻³)	0,42
Al (cmol dm ⁻³)	1,1
H+Al(cmol dm ⁻³)	8,8
CEC (cmol dm ⁻³)	10,2
CEC efetivo (cmol dm ⁻³)	2,53
Saturação de bases (%)	14
Saturação Al (%)	43
P remanescente (mmg L ⁻¹)	4
Zn (mg dm ⁻³)	1,44
Fe (mg dm ⁻³)	20,2
Mn (mg dm ⁻³)	5,5
Cu(mg dm ⁻³)	1,4
B(mg dm ⁻³)	0,1
S (mg dm ⁻³)	19,4

ANEXO 2- Conteúdo de ETR nos fertilizantes estudados

ETR	Comercial	Araxá	Catalão
Σ ETR	562 ± 6	$4,681 \pm 171$	$8,365 \pm 160$
La	130 ± 1	895 ± 68	$1,926 \pm 83$
Ce	256 ± 2	$1,866 \pm 138$	$3,934 \pm 65$
Pr	28 ± 1	235 ± 19	447 ± 66
Nd	106 ± 5	899 ± 51	$1,529 \pm 98$
Sm	19 ± 1	149 ± 7	184 ± 20
Eu	4 ± 1	43 ± 3	42 ± 4
Gd	18 ± 1	123 ± 2	112 ± 4