



**FABIOLA DE OLIVEIRA KRÜGER**

**QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE SOJA, MILHO E  
TOMATE EXPOSTAS A CÉRIO E CÉRIO COMBINADO COM  
FÓSFORO**

**LAVRAS – MG**

**2017**

**FABIOLA DE OLIVEIRA KRÜGER**

**QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE SOJA, MILHO E TOMATE EXPOSTAS  
A CÉRIO E CÉRIO COMBINADO COM FÓSFORO**

Tese apresentada a Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, área de concentração em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

Orientador

Luiz Roberto Guimarães Guilherme, PhD. – UFLA

Coorientador

Allan Bruce Downie, PhD. – UK

**LAVRAS – MG**

**2017**

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

Krüger, Fabiola de Oliveira.

Qualidade fisiológica de sementes de soja, milho e tomate expostas a  
cério e cério combinado com Fósforo / Fabiola de Oliveira Krüger. –  
Lavras : UFLA, 2017.

47 p.

Orientador(a): Luiz Roberto Guimarães Guilherme.

Coorientador(a): Allan Bruce Downie.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. *Glycine max*. 2. *Zea mays*. 3. *Solanum Lycopersicum*. 4. Germinação.  
5. Vigor. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

**FABIOLA DE OLIVEIRA KRÜGER**

**QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE SOJA, MILHO E TOMATE EXPOSTAS A  
CÉRIO E CÉRIO COMBINADO COM FÓSFORO**

**PHYSIOLOGICAL QUALITY OF SOYBEAN, CORN AND TOMATO SEEDS EXPOSED TO A  
CERIUM AND CERIUM COMBINED WITH PHOSPHORUS**

Tese apresentada a Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, área de concentração em Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 13 de setembro de 2017.

Dr. Vânia Aparecida Silva EPAMIG

Dr. Cynthia de Oliveira UFLA

Dr. Valdemar Faquin UFLA

Dr. Renato Mendes Guimarães UFLA

Prof. Luiz Roberto Guimarães Guilherme, PhD. - UFLA

Orientador

**LAVRAS-MG**

**2017**

*Dedico a Deus, meus pais  
Luiz Krüger e Jeni Krüger, meu esposo Bruno Vieira.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir essa conquista e por estar ao meu lado em todos os momentos de minha vida.

Aos meus pais Luiz Krüger e Jeni Krüger, pela educação, dedicação, paciência, ensinamentos e pela preocupação em proporcionar um futuro digno. Apesar das grandes dificuldades encontradas no dia a dia, nunca desistiram e sempre me ensinaram o caminho do bem, amo vocês.

A minha avó Ely pelo carinho e apoio recebido durante esta caminhada, te amo.

Ao meu esposo Bruno Vieira, que desde o início desta caminhada esteve ao meu lado, muito obrigada pelo companheirismo, ajuda, dedicação, apoio, incentivo, amizade, paciência e colaboração para realização deste trabalho. Muito obrigada por tudo, te amo.

Ao meu irmão Douglas Krüger pelas palavras de esperança, otimismo e companheirismo, te amo.

Aos meus sobrinhos Miguel Vieira, Alice Krüger, João Vitor Krüger, Augusto Krüger, Matheus Krüger e Isabela Vieira pela presença maravilhosa, graça, paz e alegria que trouxeram para minha vida.

Aos meus familiares Jandira de Oliveira, Gerson de Oliveira, Tânia de Oliveira, Gilmar de Oliveira, Paola de Oliveira, Sonia Torres, Eduardo Vieira, Paulo Vieira, Mariana Licursi, Wilton Maciel, Poliana Licursi, Maria Luiza Licursi, Ivan Vieira, Rosana Facirolli e Sueli Mello pelas orações, carinho, palavras de motivação e por sempre acreditarem em mim.

Aos meus “coorientadores” Allan Bruce Downie e Lynnette Dirk, pela orientação, recepção, ajuda, colaboração, incentivo, amizade, carinho, dedicação, ensinamentos e apoio durante os 12 meses que estive no laboratório da UK, muito obrigada por tudo.

Aos meus amigos Daniel Franco e Caroline Costa, pela amizade e ajuda constante em minha vida, pelo estímulo, pela força, meus sinceros agradecimentos e muito obrigada por fazerem parte de minha vida.

A Cynthia Oliveira, por toda ajuda desde o início até o fim da confecção deste trabalho. Por sempre estar disponível para ajudar, pelas palavras de estímulo, pela linda amizade que tem com todos.

Às “filhas do Bruce” Ana Paula Corguinha, Geila Carvalho, Marcele Cannata pela atenção, ajuda, carinho e amizade.

Aos meus grandes amigos Marcio Gonçalves, Chaiane Vaz, Paula Rodrigues, Andrea de Oliveira, Dani Costa, Edenilse Gopinger, Elisane Tessmann pela amizade, fidelidade, respeito, ajuda no trabalho e agradável convivência muito obrigada por tudo.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal por disponibilizarem a estrutura física e o corpo docente, possibilitando a realização desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, para a realização desta Tese.

Ao meu orientador, Professor Luiz Roberto Guimarães Guilherme, por me aceitar em seu grupo de pesquisa, pela orientação, confiança e respeito ao longo dessa etapa, muito obrigada.

A todos os professores dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal de Lavras pelos ensinamentos.

Aos funcionários do programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal e do Laboratório de Sementes da UFLA, pela ajuda e colaboração durante este período.

Às secretárias Salete Pereira de Jesus e Daniella, pela boa vontade, dedicação, convívio alegre e excelência nas suas atividades.

Aos membros da banca pelas valiosas contribuições e orientações seguras.

Por fim, agradeço a todos, que de uma maneira ou outra me ajudaram a concretizar este estudo.

*“Se não houver frutos, valeu a beleza das flores; se não houver flores, valeu a sombra das folhas; se não houver folhas, valeu a intenção da semente.”*

*Henrique de Sousa Filho (Henfil)*

## RESUMO GERAL

Os elementos terras raras (ETR) são um grupo de 17 elementos químicos, sendo 15 pertencentes ao grupo dos lantanídeos, somados a escândio e ítrio. O cério é o mais abundante dos ETR e está tão presente na crosta terrestre quanto os micronutrientes cobre e zinco. Há anos os ETR vêm despertando interesse, devido à sua utilização em diversos segmentos da indústria e da agricultura. Na agricultura, o uso de ETR tem ocorrido desde 1970, na China, país que foi o primeiro a recomendar o uso de fertilizantes contendo ETR. No Brasil, a utilização de ETR é feita de forma indireta por meio dos fertilizantes fosfatados e condicionadores, como o fosfogesso. Estes fertilizantes, aplicados a curto e longo prazo, são grandes fornecedores de ETR ao solo. Essa aplicação contínua dos mesmos pode aumentar significativamente as concentrações de ETR nos solos. Por isso, é necessário um estudo para verificar as respostas fisiológicas das sementes de soja, milho e tomate quando expostas a estes elementos, durante todo o processo germinativo, bem como, conferir quais concentrações apresentam eventuais efeitos positivos na qualidade fisiológica destas sementes, visto que estas três culturas são muito exigentes em adubação, principalmente com fósforo. Diante disso, objetivou-se avaliar a qualidade fisiológica de sementes de soja, milho e tomate expostas a diferentes concentrações de cério, isoladamente, ou, combinado com fósforo. Espera-se com isso, agregar informação adicional que possa contribuir para que seja desvendado o papel dos ETR no metabolismo de plantas, o qual é, ainda, pouco conhecido na literatura mundial. As sementes destas três espécies foram submetidas a quatro concentrações de nitrato de cério e duas concentrações de fósforo. Estas concentrações foram adicionadas no papel de germinação, na quantidade equivalente a 2,5 vezes a massa seca do papel. Pode-se concluir, com a realização desse trabalho, que a exposição de sementes de milho, soja e tomate às concentrações de 0,8; 3; 14 e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  e Ce combinado com 435 e 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P não resultou em aumento na germinação e no vigor.

**Palavras-chave:** *Glycine max.* *Zea mays.* *Solanum lycopersicum.* Germinação, Vigor.



## GENERAL ABSTRACT

The rare earth elements are a group of 17 chemical elements, with 15 of them belonging to the group of lanthanides, in addition to scandium and yttrium. Cerium is the most abundant of the REEs, being present in the earth's crust in concentrations as high as those of the micronutrients copper and zinc. For decades, REEs have been a subject of interest, due to their use in various segments of industry and agriculture. In agriculture, the use of REEs has been taking place since 1970 in countries like China, which was the first country to recommend the use of fertilizers containing REEs. In Brazil, the use of REEs is done indirectly through phosphate fertilizers and soil conditioners, such as phosphogypsum. The long-term use of fertilizers is a major source of REEs to the soil. Therefore, the continuous use and application of them can increase significantly the concentrations of REEs in soils. This scenario speaks for the need of studies to verify the physiological responses of soybeans, maize, and tomato seeds when exposed to these elements throughout the germination process, as well as to check which concentrations might have possible positive effects on the physiological quality of these seeds, since these three crops are very demanding in fertilization, mainly with phosphorus. The objective of this study was to evaluate the physiological quality of soybean, corn, and tomato seeds exposed to different concentrations of cerium, either alone or combined with phosphorus. With that, we hope to aggregate additional information that may contribute to unraveling the role of ETRs in plant metabolism, which is still not well known in the world literature. The seeds of these three species were submitted to four concentrations of cerium nitrate and two concentrations of phosphorus. These concentrations were added on the germinating paper in the amount equivalent to 2.5 times the dry mass of the paper and subsequently submitted to the tests for the physiological quality assessments. It can be concluded with this work that the exposure of corn, soybean, and tomato seeds to concentrations of 0.8; 3; 14 and 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  and Ce combined with 435 and 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P showed no increase in germination and vigor.

**Keywords:** *Glycine max.* *Zea mays.* *Solanum lycopersicum.* Germination, Vigor.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1	Elementos terras raras.....	12
2.2	Céριο.....	13
2.3	Utilização e aplicação dos ETR.....	13
2.4	ETR nos fertilizantes fosfatados e fosfogesso.....	15
2.5	Absorção e translocação dos ETR pelas plantas.....	16
2.6	Aplicação de ETR em sementes.....	17
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1	Local.....	18
3.2	Germinação e primeira contagem de germinação.....	19
3.3	Teste de frio sem solo.....	19
3.4	Envelhecimento acelerado.....	19
3.5	Comprimento parte aérea e raiz de plântulas.....	19
3.6	Comprimento total de plântulas.....	19
3.7	Massa seca parte aérea e raiz.....	20
3.8	Massa seca total de plântulas.....	20
3.9	Enzimas do metabolismo antioxidante.....	20
3.10	Peróxido de hidrogênio.....	21
3.11	Peroxidação lipídica.....	21
3.12	Análise da enzima alfa amilase.....	21
3.13	Análise da isocitrato liase.....	21
3.14	Análise de dados.....	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
5	CONCLUSÕES.....	40
	REFERÊNCIAS.....	41

## 1. INTRODUÇÃO

Os elementos terras raras (ETR) são identificados pela International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) como um grupo de 17 elementos químicos com características físico-químicas semelhantes. Este grupo é composto por 15 elementos químicos pertencentes ao grupo dos lantanídeos, somados a escândio e ítrio (IUPAC, 2005).

O cério (Ce) é o mais abundante dos ETR e está tão presente na crosta terrestre quanto os micronutrientes cobre e zinco (HEDRICK, 1995). Foi descoberto na Suécia pelos químicos Jöns Jacob Berzelius e Wilhelm von Hisinger, e, na Alemanha, por Martin Heinrich Klaproth, ambos em 1803. Recebeu o nome cério em homenagem ao asteroide Ceres, descoberto dois anos antes deste elemento (WEEKS, 1933).

Há anos os ETR vêm despertando interesse, devido à sua utilização em diversos segmentos da indústria e da agricultura (KULAKSIZ; BAU, 2007). Na agricultura, o uso de ETR tem ocorrido desde 1970, na China, país que foi o primeiro a recomendar o uso de fertilizantes contendo ETR (WANG et al., 2008). No Brasil, a utilização de ETR é feita de forma indireta por meio dos fertilizantes fosfatados e condicionadores de solo, como o fosfogesso (TURRA et al., 2011).

Os ETR são adicionados aos solos por processos naturais, como o intemperismo, fontes e ações antropogênicas que acrescentam estes elementos ao solo de forma direta ou indireta. Nos últimos anos, cada vez mais ETR entram no solo através da adubação com fertilizantes fosfatados (EL-RAMADY, 2008; RAMOS et al., 2016a).

Os fertilizantes fosfatados são produzidos a partir de rochas fosfatadas que podem conter concentrações elevadas de ETR. Em várias fontes de fósforo (P) utilizadas na agricultura, há ocorrência de diferentes concentrações de ETR (RAMOS et al., 2016a, 2016b).

Com o aumento da concentração de  $P_2O_5$  nos fertilizantes fosfatados, há um acréscimo nos teores de ETR nos mesmos. Contudo, o processo de fabricação dos fertilizantes também pode influenciar nesses teores (DINALI, 2014). Os teores de ETR em fertilizantes comercializados na América do Sul são muito variáveis, sendo influenciados por diversos fatores, como o material de origem, o teor de fósforo no fertilizante e o tipo de beneficiamento que este pode sofrer em seu processo de produção (RAMOS et al., 2016a).

Os fertilizantes fosfatados aplicados a curto e longo prazo são grandes fornecedores de ETR ao solo (REUTLINGEN, 2006) e algumas estimativas reportam que a aplicação contínua de fertilizantes fosfatados pode dobrar as concentrações de ETR no mesmo (LIJUN et al., 2004; RAMOS et al., 2016a, 2016b).

Na agricultura, o uso de ETR em fertilizantes tem chamado a atenção nos últimos anos devido ao aumento de sua aplicação no solo, assim como, à aplicação foliar. Os ETR que aparecem em maiores quantidades, nestes fertilizantes, são o cério (Ce) e o lantânio (La) e, conseqüentemente, são os mais estudados isoladamente (YIN et al., 2009).

Em estudos realizados com sementes de espinafre envelhecidas e posteriormente tratadas com Ce e La, foi observada alta porcentagem de germinação e vigor (CHAO, 2004). Plântulas provenientes de

sementes de arroz tratadas com nitrato de cério obtiveram aumento no comprimento radicular, parte aérea, número de raízes, massa fresca e seca (LIU et al., 2012). Sementes de milho tratadas com Ce apresentaram aumento de 5% de germinação (ESPÍNDOLA et al., 2013). Porém, sementes de alface tratadas com Ce e La não apresentaram aumento na porcentagem de germinação, assim como, não foram observadas diferenças significativas na primeira contagem de germinação (BARBIERI et al., 2013). Contudo, sementes de milho e feijão verde tratadas com Ce apresentaram resultados positivos sobre o crescimento de plântulas (DIATLOFF et al., 2008).

O tratamento de sementes com ETR, segundo alguns autores, parece ser uma técnica eficaz para melhorar o potencial germinativo, além do crescimento e o desenvolvimento das plântulas e, posteriormente, o rendimento das culturas (CHAO, 2004). Entretanto, os estudos desenvolvidos até o momento com os ETR foram realizados como tratamento de sementes e não com exposição das sementes aos elementos juntamente com o fósforo, durante o período de embebição, seguido da ativação do metabolismo e chegando até a germinação completa. Tal abordagem é relevante, pois, no momento da sementeira, é realizada a aplicação do fertilizante fosfatado em sulco e, sendo assim, durante a ativação do metabolismo das sementes, ocorrerá a absorção do fósforo juntamente com Ce. Sabe-se que o Ce pode ser absorvido em dois estados oxidativos (nitrato de cério  $Ce^{3+}$  e sulfato de cério  $Ce^{4+}$ ), podendo estes circularem entre esses dois estados no organismo das sementes e plantas, ocorrendo a geração de espécies reativas de oxigênio.

Por isso, é necessário um estudo para verificar as respostas fisiológicas das sementes de soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays* L.) e tomate (*Solanum lycopersicum* L.) quando expostas a esses elementos, durante todo o processo germinativo, bem como, avaliar quais concentrações apresentam eventuais efeitos positivos na qualidade fisiológica destas sementes, visto que essas três culturas são muito exigentes em adubação, principalmente com fósforo.

Diante disso, objetivou-se avaliar a qualidade fisiológica de sementes de soja, milho e tomate expostas a diferentes concentrações de cério, isoladamente, ou, combinado com fósforo. Espera-se, com isso, agregar informação adicional que possa contribuir para que seja desvendado o papel dos ETR no metabolismo de plantas, o qual é, ainda, pouco conhecido na literatura mundial.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Elementos terras raras

Os ETR são elementos metálicos muito parecidos em sua química elementar, cuja denominação decorre do aspecto terroso de seus óxidos e da suposição de que seriam elementos pouco presentes na natureza (IUPAC, 2005). Pertencem ao grupo III B da tabela periódica, com números atômicos sucessivos, do 57 ao 71, sendo: lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), promécio (Pm), samário (Sm), európio (Eu), gadolínio (Gd), térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), érbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Yb), lutécio (Lu), aos quais se juntam os metais escândio (Sc, Z=21) e o ítrio (Y, Z=39). Os dois últimos são adicionados aos lantanídeos como ETR por apresentarem propriedades físico-químicas semelhantes aos

mesmos, com o raio atômico similar e preferência pelo estado de oxidação  $3^+$ , além da ocorrência nos mesmos minerais que os lantanídeos (LIMA, 2012).

Os ETR são divididos em ETR leves, do La ao Eu, com massa atômica menor, e pesados, do Gd ao Lu e Y, com massa atômica maior; entretanto, o Sc não é classificado nem como elemento terra rara leve ou pesado. O estado de oxidação característico desses elementos é  $3^+$ , embora o estado de oxidação divalente e tetravalente sejam conhecidos para o európio e o cério, respectivamente (CONNOLLY, 2005; PANG et al., 2002).

A origem do termo “Terra Rara” surgiu, em decorrência do isolamento desses elementos sob a forma de óxidos e também em razão de sua raridade propriamente dita (SERRA, 2011). Os ETR são raros, uma vez que não ocorrem naturalmente na forma metálica, mas apenas misturados e espalhados em minerais, em razão de suas propriedades físico-químicas muito semelhantes, difíceis de serem separados um do outro (MOLDOVEANU; PAPANGELAKIS, 2012). Estes não foram encaixados nem no grupo de elementos essenciais para plantas, animais (incluindo humanos) e meio ambiente, nem como elementos fortemente tóxicos (ŠMUC et al., 2012).

## 2.2 Cério

O cério é o mais abundante dos ETR e está tão presente na crosta terrestre quanto os micronutrientes cobre e zinco (HEDRICK, 1995). É um elemento químico metálico macio, de coloração cinzenta, com o símbolo Ce e número atômico 58. É o segundo elemento da série dos lantanídeos, com característica do estado de oxidação de  $3^+$ , também sendo encontrado no estado de oxidação  $4^+$ .

O Ce ocorre em diversos minerais, mas as fontes mais importantes são bastnasita e monazita, onde estão presentes os minerais que compõem aproximadamente a metade dos lantanídeos (HEDRICK, 1995).

Esse elemento tem ampla aplicação na indústria e na agricultura, sendo um dos principais componentes dos fertilizantes produzidos na China (WANG et al., 2012; XUE et al., 2012). Tem sido muito estudado nos últimos anos, devido ao fato de que as plantas demonstram acúmulo desse elemento, bem como, efeitos favoráveis relacionados à germinação e ao aumento de produtividade (KABATA-PENDIAS, 2011).

Em estudos realizados com diferentes concentrações de Ce, foi verificado aumento da produtividade das culturas e estímulos à germinação das sementes e crescimento de plântulas (HU et al., 2004, SHYAM; AERY 2012, LIU et al., 2012). Estudos com sementes de arroz tratadas com nitrato de cério apresentaram aumento no comprimento radicular e da parte aérea das plântulas (LIU et al., 2012).

## 2.3 Utilização e aplicação dos ETR

Os ETR possuem larga aplicação na indústria e apresentam propriedades químicas, magnéticas e luminescentes diferenciadas. São utilizados na fabricação de telas de cristal líquido para monitores e televisões, cabos de fibra ótica, que fornecem banda larga muito maior que os fios de cobre, vidros polidos,

lasers, espelhos, lentes de precisão, ímãs, componentes elétricos e eletrônicos de diversos aparelhos de áudio e vídeo, sistemas de comunicação militar, medicina, dentre outros.

Como um exemplo na medicina, podemos citar as nanopartículas de óxido de cério (CONPs), que são terapêuticas para o tratamento de câncer. As nanopartículas de Ce são tóxicas para as células cancerosas e atuam inibindo a invasão e sensibilizando as células cancerosas para a radioterapia e a quimioterapia. Exibem toxicidade mínima para tecidos normais e fornecem proteção contra várias formas de geração de espécies reativas de oxigênio (GAO et al., 2014).

Na indústria, os ETR são utilizados na fabricação de lâmpadas de rua de alta intensidade, microfones, turbinas de vento, dentre outros (DUTTA et al., 2016).

Na indústria automobilística, o cério é utilizado como catalisador de automóveis. Esse elemento é oxidante do monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos e, ainda, redutor de óxido nítrico (NO), diminuindo, com isso, a emissão de gases na atmosfera (MAESTRO; HUGUENIN, 1995).

Já na indústria do vidro, o que determina a coloração dos mesmos são as misturas que contêm cério, neodímio e érbio (MARTINS; ISOLANI, 2005). Outro bom exemplo é a substituição de Cd por La e Ce em curtumes e nas indústrias têxteis que utilizam o Cd para produzir pigmentos vermelhos e vermelho-alaranjado (HAXEL et al., 2002).

Muitos países exploram os ETR em diversos segmentos da indústria e da agricultura. A China se destaca na exploração e em pesquisas relacionadas aos ETR desde a década de 70, tendo sido o primeiro país a recomendar o uso de fertilizantes contendo ETR (WANG et al., 2008). Nesse período, os chineses já investiam em processos de extração e, em 1990, detinham aproximadamente metade da produção mundial (SERRA, 2011). A China possui as maiores reservas de ETR de todo o mundo (80%), sendo um grande produtor desses elementos para o mercado mundial (PANG et al., 2002).

No Brasil, a utilização de ETR na agricultura é realizada de forma indireta, por meio dos fertilizantes fosfatados e condicionadores, como o fosfogesso (TURRA et al., 2011).

O mercado de ETR cresce a cada ano e, em 2010, o consumo mundial alcançou a marca de 125 mil toneladas, sendo que a estimativa é a de que esse mercado cresça de 5% a 10% ao ano (SERRA, 2011). Os países mais tecnificados tendem a consumir mais ETR, uma vez que esses elementos são utilizados em vários setores da indústria, tais como os citados anteriormente. O Japão e os Estados Unidos são os maiores consumidores mundiais de ETR. Países como Estados Unidos, Índia, Austrália, Brasil e Malásia estão explorando esses elementos mais recentemente (LAPIDO-LOUREIRO, 2013).

No Brasil, existem reservas nos municípios de Araxá (MG), Catalão (MG), Itapirapuã Paulista (SP), Poços de Caldas (MG), São Francisco do Itabapoana (RJ) e no Vale do Sapucaí (MG) (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, DNPM, 2016). Os ETR desempenham papel fundamental na transição para um paradigma tecnológico e no plano de sustentabilidade (DIAMOND, 2005)

## 2.4 ETR nos fertilizantes fosfatados e fosfogesso

Em 1986, na China, foi registrado o primeiro fertilizante comercial com adição de ETR, chamado de “Changle”, o qual continha, em sua composição,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  e  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  com seus respectivos teores 25 a 28%, 49 a 51%, 5 a 6% e 15 a 17% (HU et al., 2004). Posteriormente, o uso desses fertilizantes estendeu-se para Coreia, Japão e Austrália (WANG et al., 2008). No Brasil, não há relatos de aplicação de fertilizantes enriquecidos com ETR na agricultura. Entretanto, os ETR são aplicados indiretamente ao solo por meio de fertilizantes fosfatados e corretivos, como o fosfogesso, uma vez que esses tipos de insumos são passíveis de apresentarem teores significativos desses elementos (DINALI, 2014; OLIVEIRA et al., 2012; RAMOS et al., 2016a; TODOROVSKY et al., 1997; TURRA et al., 2011).

A matéria-prima para o processo de fabricação de fertilizantes fosfatados e seus subprodutos, como o fosfogesso, é a rocha fosfática. Entre os países produtores de rocha fosfática, o Brasil é o sexto colocado, com produção de 6,3 milhões de toneladas (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS, 2013). A apatita [ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2$ ] é um dos principais minerais do grupo dos fosfatos, usada como fonte de fertilizantes fosfatados, com fórmula geral  $\text{C}_4\text{S}(\text{PO}_4)_3\text{X}$ . Ela apresenta teor médio de 0,1 a 0,8% de ETR (LI et al., 2006). As substituições isomórficas na estrutura dos minerais que contêm ETR estão relacionadas, principalmente, com os elementos  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Th}^{+4}$  e  $\text{U}^{+4}$ , devido à semelhança dos raios iônicos entre eles (KANAZAWA; KAMITANI, 2006). O cálcio pode ser substituído essencialmente por Na, Sr, Mn, e ETR, mas a substituição mais comum que ocorre é do P pelo Si, em conjunto com a substituição do Ca por íons de ETR trivalentes (RAMOS et al., 2016a, 2016b).

Amostras de rochas fosfáticas coletadas no Paquistão foram quantificadas e apresentaram teores significativos de La ( $50,2 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Ce ( $62,0 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Nd ( $44,8 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Sm ( $11,2 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Eu ( $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Tb ( $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Lu ( $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e Yb ( $4,5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (SABIHA-JAVIED et al., 2010). Em rochas fosfáticas amostradas na cidade de Catalão (GO), observaram-se os seguintes elementos: La, Sm, Nd, Ce, Tb, Eu, Lu e Tb e seus respectivos teores, 1655; 254; 1555; 4114; 10; 62; 0,5 e  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  (SANTOS et al., 2006; RAMOS et al., 2016a). Sendo assim, os fertilizantes fosfatados, bem como o fosfogesso derivado dessas rochas podem apresentar ETR em sua composição. Logo, o uso regular desses insumos em áreas agrícolas acarretará na introdução desses elementos no solo (TODOROVSKY et al., 1997), visto que 90% da extração mundial do fosfato de rocha são destinados à produção desses tipos de insumos agrícolas (SABIHA-JAVIED et al., 2010).

Amostras de fosfogesso coletadas em uma indústria de fertilizantes no Brasil tiveram os ETR analisados e apresentaram o valor total de  $4000 \text{ mg kg}^{-1}$  (OLIVEIRA et al., 2012). Em fertilizantes superfosfatos produzidos a partir de apatita da região de Koala, Rússia, foram encontrados cerca de  $2600 \text{ mg kg}^{-1}$  de ETR (TODOROVSKY et al., 1997).

Devido ao forte desempenho do agronegócio brasileiro, houve um recorde nas entregas de fertilizantes aos produtores agrícolas, saindo de 24,5 milhões de toneladas em 2010 para 29,5 milhões de toneladas em 2012, o que significou um aumento de 20%. Em se tratando de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , o consumo brasileiro de fertilizantes fosfatados em 2012 foi cerca de 4,5 milhões de toneladas, o que corresponde a um acréscimo de 27% em relação ao ano de 2010 (ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS, ANDA, 2013). Atualmente, o Brasil é o 4º maior consumidor de fertilizantes no mercado mundial (ANDA, 2016).

O fosfogesso (sulfato de cálcio) é um subproduto do beneficiamento industrial da rocha fosfática para a produção de ácido fosfórico e fertilizantes fosfatados. Para a produção de uma tonelada de ácido fosfórico, são gerados cerca de 5 toneladas de fosfogesso (PAPASTEFANOU et al., 2006). Como a produção de ácido fosfórico em 2012 no Brasil foi de 2,04 milhões de toneladas (ANDA, 2013), estima-se uma produção de 10,2 milhões de toneladas de fosfogesso no Brasil, somente nesse mesmo ano.

Este cenário de demanda crescente de fertilizantes fosfatados a cada ano, alta produção de fosfogesso e o uso desses insumos, principalmente em longo prazo, e a aplicação contínua de fertilizantes fosfatados pode dobrar as concentrações de ETR nos solos nos próximos anos (LIJUN et al., 2004).

## 2.5 Absorção e translocação dos ETR pelas plantas

Nas últimas décadas, a absorção e translocação dos ETR em plantas receberam grande atenção, devido à necessidade de verificar a importância desses elementos e os efeitos biológicos causados pelos mesmos, nas plantas.

A partir do momento em que esses elementos são absorvidos pelas plantas, sua distribuição entre os diferentes órgãos difere consideravelmente. Pesquisas têm mostrado que, nas raízes, as concentrações são maiores que nos outros órgãos. Raízes de milho (*Zea mays*) e de feijão-mungo (*Vigna radiata*) cultivadas em solução nutritiva acumularam 20-150 vezes mais La nas raízes do que na parte aérea (DIATLOFF et al., 1995).

Vários estudos mostraram decréscimos na concentração de elementos terras raras no sentido raízes>folhas>caules>flores> frutos ou grãos (sementes), em várias culturas, tais como, milho, trigo, arroz e pimentão (LI et al., 1998; CAO et al., 2000; WEN et al., 2001; XU et al., 2002).

Resultados experimentais com cultivo de colza (*Brassica napus*) em solo e em solução, com a aplicação de neodímio (Nd), indicaram uma distribuição nos tecidos na ordem raiz>caule>folha (WEI et al., 1999; WEI et al., 2001). Quando ETR foram fornecidos às raízes de trigo, a distribuição do Nd nas plantas foi, na ordem, raiz>folha>caule>glumas>grão.

Em espécies arbóreas, como Citrus, as maiores concentrações também são usualmente observadas nas raízes. Em sete espécies de arbóreas tropicais, os elementos terras raras também se acumularam nas raízes, embora o cério tenha-se concentrado na casca (NAKANISHI et al., 1997). Este padrão de acumulação pode variar de acordo com a espécie e com o elemento, individualmente aplicado à cultura (FAS-HUI et al., 1999).

A concentração do Nd nas folhas foi maior do que nas raízes quando os elementos foram aplicados via foliar. Com o fornecimento dos elementos via radicular, mais de 90% foram distribuídos nas raízes, quando absorvidos da solução, 51,4% de Ce e 32,5% de Nd foram distribuídos nas raízes, quando os elementos foram absorvidos do solo. Por outro lado, a maioria dos ETR pulverizados nas folhas de trigo ficaram distribuídas nas folhas>flores>frutos>grãos (sementes). A quantidade distribuída em outros órgãos foi de 2%, e somente 0,2% foram para órgãos de reprodução em plantas de trigo (HU et al., 2004).



## 2.6 Aplicação de ETR em sementes

O tratamento de sementes com ETR, segundo alguns autores, parece ser uma técnica eficaz para melhorar o potencial germinativo, além do crescimento e o desenvolvimento das plântulas e, posteriormente, o rendimento das culturas (CHAO, 2004).

O tratamento de sementes de trigo com ítrio resultou em incrementos de biomassa da raiz, ramos e folhas (FENG et al., 2013). Em sementes envelhecidas de espinafre, foi observado que, após o tratamento com La e Ce, a porcentagem de germinação e vigor das sementes foram incrementados (CHAO, 2004). Sementes de milho e feijão-verde tratadas com Ce apresentaram resultados positivos sobre o crescimento das plântulas provenientes destas sementes (DIATLOFF et al., 2008).

Observou-se aumento no comprimento radicular e da parte aérea, bem como, crescimento no número de raízes e massa fresca e seca em plântulas provenientes de sementes de arroz tratadas com nitrato de cério (LIU et al., 2012).

Em sementes de trigo de inverno tratadas com a mistura de 60-120 mg kg<sup>-1</sup> de ETR na forma de nitrato, as plantas obtidas destas sementes apresentaram aumento no rendimento em 9-17% comparado com as plantas provenientes de sementes não tratadas com Ce (HU et al., 2004). A aplicação de sulfato de cério (Ce<sup>4+</sup>), até 100 mg kg<sup>-1</sup> de sementes, aumentou o crescimento da parte aérea e das raízes de *Phaseolus radiatus* e *Brassica pekinensis* (couve-chinesa) (VELASCO et al., 1979).

A aplicação de ETR nas sementes é uma técnica comum e de rotina na produção de soja na China. O uso da imersão das sementes em solução contendo 0,01 a 0,1% de ETR elevou a germinação de 74 para 94% (ZHU; WU, 1982). O La é o elemento mais utilizado em pesquisas envolvendo ETR, promovendo aumento no vigor, na taxa e índice de germinação em sementes de arroz (FASHUI et al., 2003; LIU et al., 2013), maior crescimento de mudas de trigo (D'AQUINO et al., 2009), melhora na germinação e crescimento em pepino (SHI et al., 2005) e maiores taxas de desenvolvimento de *Isatis indigotica* e *Festuca arundinacea* (plantas cultivadas tipicamente na Ásia) (YAJIA et al., 2008).

A mistura de 1,0 a 2,3 g de ETR com 1,0 kg de sementes de soja aumentou a quantidade de raízes em 10,9 a 34,6% em relação ao tratamento sem ETR; a nodulação das raízes até o estágio de florescimento foi superior em 14,3 a 59,8%, além de aumentar a massa dos nódulos das raízes, por planta, em 24,1 a 50% (CHEN, 1991; HU et al., 2004).

O tratamento de sementes de milho com Ce resultou em crescimento mais acentuado de raízes das plântulas, bem como melhora em seu potencial fisiológico (ESPINDOLA et al., 2013). Contudo, sementes de alface tratadas com Ce e La não apresentaram aumento na germinação, embora o Ce tenha estimulado o crescimento das plântulas (BARBIERI et al., 2013).

Entretanto, os estudos desenvolvidos até o momento com os ETR foram realizados como tratamento de sementes e não com exposição das sementes aos elementos juntamente com o fósforo, durante o período de embebição, seguido da ativação do metabolismo e chegando até a germinação completa. Tal abordagem é relevante, pois, no momento da semeadura, é realizada a aplicação do fertilizante fosfatado em sulco e, sendo assim, durante a ativação do metabolismo das sementes, ocorrerá a absorção do fósforo juntamente com Ce.

Sabe-se que o Ce pode ser absorvido em dois estados oxidativos (nitrato de cério  $Ce^{3+}$  e sulfato de cério  $Ce^{4+}$ ), podendo estes circularem entre esses dois estados no organismo das sementes e plantas, ocorrendo a geração de espécies reativas de oxigênio.

Por isso, é necessário um estudo para verificar as respostas fisiológicas das sementes de soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays* L.) e tomate (*Solanum lycopersicum* L.) quando expostas a esses elementos, durante todo o processo germinativo, bem como, avaliar quais concentrações apresentam eventuais efeitos positivos na qualidade fisiológica dessas sementes. Visto que essas três culturas são muito exigentes em adubação, principalmente com fósforo.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Local

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Crescimento e Desenvolvimento do Departamento de Biologia, no Laboratório Central de Análise de Sementes do Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras e no Laboratório de Biologia Vegetal da Universidade do Kentucky, junto ao Departamento de Horticultura.

Foram utilizadas sementes híbridas de milho (*Zea mays* L.), sementes de linhagens de soja (*Glycine max*) e híbridas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) submetidas a quatro concentrações de nitrato de cério ( $Ce^{3+}$ ) e duas concentrações de fósforo (P), isoladamente e combinadas (Tabela 1). Essas concentrações foram adicionadas no papel de germinação, na quantidade equivalente a 2,5 vezes a massa seca do papel (Tabela 1).

Após o período de exposição das sementes nas diferentes concentrações de cério e cério combinado com fósforo, estas foram submetidas aos testes para as avaliações da qualidade fisiológica.

Tabela 1. Concentrações de cério e fósforo.

Numero do Tratamento	Concentrações
T1	Controle (água destilada)
T2	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
T3	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
T4	0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}Ce^{3+}$
T5	0,8 $\mu\text{mol L}^{-1} Ce^{3+}$ 435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
T6	0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}Ce^{3+}$ 2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
T7	3 $\mu\text{mol L}^{-1}Ce^{3+}$
T8	3 $\mu\text{mol L}^{-1} Ce^{3+}$ 435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
T9	3 $\mu\text{mol L}^{-1}Ce^{3+}$ 2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
T10	14 $\mu\text{mol L}^{-1}Ce^{3+}$
T11	14 $\mu\text{mol L}^{-1}Ce^{3+}$ 435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
T12	14 $\mu\text{mol L}^{-1} Ce^{3+}$ 2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
T13	57 $\mu\text{mol L}^{-1} Ce^{3+}$
T14	57 $\mu\text{mol L}^{-1}Ce^{3+}$ 435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
T15	57 $\mu\text{mol L}^{-1} Ce^{3+}$ 2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P

### **3.2 Germinação (G) e primeira contagem de germinação (PCG)**

Foram avaliadas em oito repetições de 50 sementes para milho e soja e quatro repetições de 100 sementes para o tomate, semeadas em rolos de papel específico para germinação, umedecido com a quantidade equivalente a 2,5 vezes a massa seca do papel com as soluções de estudo e mantidas em germinador a 25 °C. As avaliações foram realizadas aos quatro e sete dias para o milho, cinco e oito dias para soja e cinco e 14 dias para o tomate, após a semeadura conforme as Regras para Análise de Sementes, sendo os resultados expressos em porcentagem de plântulas normais (BRASIL, 2009).

### **3.3 Teste de frio sem solo (TF)**

Foram semeadas oito repetições de 50 sementes para milho e soja e quatro repetições de 100 sementes para o tomate, em rolos de papel para germinação, umedecidos com as concentrações de estudo. Os rolos foram colocados em sacos plásticos e levados para câmara do tipo BOD, a 10 °C, por cinco dias para soja e sete dias para milho e tomate (VIEIRA et al., 2010; TORRES et al., 1999). Após esse período, os rolos foram retirados dos sacos plásticos e transferidos para um germinador a 25 °C, onde permaneceram por cinco dias para soja e tomate e quatro dias para milho. Posteriormente, foi contabilizado o número de plântulas normais (CÍCERO; VIEIRA, 1994; BRASIL, 2009; VIEIRA et al., 2010).

### **3.4 Envelhecimento acelerado (EA)**

Foram utilizados 40 g de sementes de milho e 42 g de sementes de soja, distribuídas em uma camada única sob uma tela metálica acoplada a uma caixa gerbox. No fundo da caixa (11x11x3,5 cm), foram colocados 40 mL de água destilada. As caixas foram mantidas em câmara de germinação (BOD), a 45 °C, por 72 h para sementes de milho e 41 °C, por 72 h, para sementes de soja. Após esse período, as sementes foram submetidas ao teste de germinação e as avaliações foram realizadas ao quarto dia após a semeadura (MARCOS FILHO, 2005; HAMPTON; TEKRONY, 1995; BRASIL, 2009).

### **3.5 Comprimento da parte aérea (CPA) e raiz (CR) de plântulas**

Foram determinadas concomitantemente com o teste de germinação, no sétimo dia. Os comprimentos médios da parte aérea e das raízes das plântulas de milho e soja foram obtidos dividindo-se a soma das medidas tomadas das subamostras pelo número de plântulas mensuradas, sendo os resultados expressos em cm plântula<sup>-1</sup> (NAKAGAWA, 1999).

### **3.6 Comprimento total de plântulas (CTP)**

Foi determinado concomitantemente com o teste de germinação, no décimo quarto dia. Os comprimentos médios das plântulas de tomate foram obtidos dividindo-se a soma das medidas tomadas das subamostras pelo número de plântulas mensuradas, sendo os resultados expressos em cm plântula<sup>-1</sup> (NAKAGAWA, 1999).

### **3.7 Massa seca parte aérea (MSPA) e raiz (MSR)**

Foram obtidas a partir das plântulas de milho e soja provenientes da segunda contagem do teste de germinação. Cada amostra foi acondicionada em sacos de papel e mantida em estufa de circulação de ar forçado, a 70 °C, até atingir massa constante. A massa seca das plântulas foi determinada em balança de precisão de  $\pm 0,001$  g e os resultados, expressos em mg plântula<sup>-1</sup> (NAKAGAWA, 1999).

### **3.8 Massa seca total de plântulas (MSTP)**

Foi obtida a partir das plântulas de tomate provenientes da segunda contagem do teste de germinação. Cada amostra foi acondicionada em sacos de papel e mantida em estufa de circulação de ar forçado, a 70 °C, até atingir massa constante. A massa seca total das plântulas foi determinada em balança de precisão de  $\pm 0,001$  g e os resultados, expressos em mg plântula<sup>-1</sup> (NAKAGAWA, 1999).

### **3.9 Enzimas do metabolismo antioxidante**

O extrato enzimático foi obtido através de 100 mg de sementes maceradas em nitrogênio líquido adicionado 1,5 mL do tampão de extração (25 mM fosfato de potássio [pH 7,5]) . O extrato foi centrifugado a 14.000 rpm por 10 minutos, a 4 °C, e o sobrenadante coletado foi armazenado a -80 °C até o período das análises (BIEMELT et al., 1998). A concentração de proteína foi estimada pelo método de Bradford (1976), utilizando o reagente Bio-Rad com BSA (Sigma) como padrão.

#### **3.9.1 Atividade da peroxidase (POX)**

Foi determinada com 10 µL de sobrenadante monitorado por 10 minutos a  $A_{490}$ , com um espectrofotômetro UV-2101PC (Shimadzu, Kyoto), utilizando 8 mM de Guaiacol, 0,5 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em 50 mM de acetato de potássio (pH 5,5), a 25 °C (GILLIKIN; GRAHAM, 1991).

#### **3.9.2 Atividade da catalase (CAT)**

Foi medido o consumo de peróxido de hidrogênio (coeficiente de extinção 39,4 M<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>), a 240 nm, em um cubeta de quartzo com capacidade para 2 mL, durante 2 minutos, à temperatura ambiente. Uma alíquota de sobrenadante foi adicionado 12,5 mmol L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em 50 mL de 10 mmol L<sup>-1</sup> de NaHPO<sub>4</sub> (pH 6,0). Uma unidade é definida como a quantidade de enzima que catalisa a decomposição de 1 µmol L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por minuto (KRAUS et al., 1995; WEYDERT; CULLEN, 2010).

#### **3.9.3 Atividade da dismutase superóxido (SOD)**

Foi medida de acordo com o Kit Superoxide Dismutase Assay, da Chayman Chemical Company. Este kit utiliza um sal de tetrazólio para a detecção de radicais de superóxido gerados pela xantina oxidase e hipoxantina. Uma unidade de SOD é definida como a quantidade de enzima necessária para exibir 50% de dismutação de radical superóxido.

### 3.10 Peróxido de hidrogênio

Foram utilizados 100 mg de sementes maceradas em nitrogênio líquido, homogeneizados em 1,5 mL de ácido tricloroacético (TCA) e centrifugados, a 12.000 rpm, por 15 minutos, a 4 °C. O conteúdo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foi determinado medindo-se a absorbância a 390 nm em um meio de reação contendo tampão fosfato de potássio 10 mmol L<sup>-1</sup> (pH 7,0), 125 µL do extrato de iodeto de potássio 1 M (VELIKOVA et al., 2000).

### 3.11 Peroxidação lipídica

Foram utilizados 100 mg de sementes maceradas em nitrogênio líquido, homogeneizados em ácido tricloroacético (TCA) 0,1%. O homogeneizado foi centrifugado a 12.000 rpm, por 10 minutos. Alíquotas de 250 µL do sobrenadante foram adicionadas ao meio de reação (0,5% de ácido tiobarbitúrico (TBA) e 10% de TCA), incubando-se, em seguida, a 95 °C, por 30 minutos. A paralisação da reação aconteceu por resfriamento rápido em gelo e as leituras foram determinadas em espectrofotômetro, a 535 nm e 600 nm (BUEGE; AUST, 1978).

### 3.12 Análise da enzima alfa amilase

As sementes foram maceradas em nitrogênio líquido, e posteriormente, armazenadas a -86 °C. A extração foi completada usando Tris-HCl 0,2 mmol L<sup>-1</sup> (pH 8,0) tampão + 0,1% Mercaptoetanol, utilizando uma proporção de 250 µL de tampão para 100 mg de sementes. O material foi homogeneizado e armazenado em refrigerador, por 8 h, posteriormente centrifugado a 14.000 rpm, por 30 minutos, a 4 °C e visualizado seguindo o método de Alfenas (2006). As sementes foram expostas às concentrações de estudos por 24 horas antes do processo de extração.

### 3.13 Análise da isocitrato liase

As sementes foram maceradas em nitrogênio líquido, e, posteriormente, armazenadas a -86 °C. A extração foi completada usando Tris-HCl 0,2 mmol L<sup>-1</sup> (pH 8,0) + 0,1% β-Mercaptoetanol + 0,1% Fenilhidrazina, na proporção de 300 µL por 100 mg de sementes. O material foi homogeneizado em vortex e mantido por 2 horas, em refrigerador, seguido de centrifugação, a 14.000 rpm, por 60 minutos, a 4 °C, e os géis foram revelados segundo metodologia proposta por Santos (2013).

### 3.14 Análise de dados

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial (5X3X8), sendo 5 concentrações de Ce, 3 concentrações de P e 8 concentrações de Ce combinado com P. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade, utilizando o programa estatístico Assistat versão 7.7.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Germinação, primeira contagem de germinação, teste de frio e envelhecimento acelerado de sementes de milho, soja e tomate submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P.**

Diversos elementos químicos estão disponíveis nos solos, entre esses, os elementos terras raras, os quais são absorvidos pelas sementes através da solução do solo. Os ETR são adicionados aos solos por processos naturais, como o intemperismo, fontes e ações antropogênicas, que acrescentam esses elementos de forma direta ou indireta. Nos últimos anos, cada vez mais ETR têm sido adicionados ao solo através da adubação com fertilizantes fosfatados e condicionadores, como o fosfogesso (OLIVEIRA et al., 2015; TURRA et al., 2011). O milho, soja e o tomate são culturas que recebem muitos fertilizantes fosfatados, os quais apresentam diferentes concentrações de ETR em sua composição. Por isso, a necessidade de avaliar a qualidade fisiológica das sementes dessas três espécies quando expostas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P.

Os resultados da análise da porcentagem de germinação (G%) das sementes de milho, soja e tomate submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P são apresentadas nas tabelas 1, 2 e 3, respectivamente. A exposição das sementes de milho na concentração de  $3 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$  combinado com  $2608 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$  apresentou redução de 9 pontos percentuais na germinação. Contudo, as sementes submetidas às demais concentrações apresentaram germinação acima de 95 % (Tabela 1).

Tabela 1. Germinação, primeira contagem de germinação, teste de frio e envelhecimento acelerado em sementes de milho submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P.

Concentrações de Ce	Germinação (%)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	98 aA	99 aA	100 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	97 bB	99 aA	99 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	100 aA	95 bB	91 bC
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	97 bB	99 aA	99 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	99 aA	99 aA	98 aA
CV(%)	1,56		
Concentrações de Ce	Primeira contagem de germinação (%)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	98 aA	99 aA	100 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	97 bB	99 aA	99 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	100 aA	95 bB	91 bC
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	97 bB	99 aA	99 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	99 aA	99 aA	98 aA
CV(%)	1,56		
Concentrações de Ce	Teste de frio (%)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	99 aA	95 bB	99 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	100 aA	100 aA	100 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	100 aA	100 aA	100 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	100 aA	99 aA	99 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	100 aA	99 aA	100 aA
CV(%)	1,61		
Concentrações de Ce	Envelhecimento acelerado (%)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	93 aA	97 aA	96 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	95 aA	92 aA	92 bA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	92 aA	94 aA	91 bA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	90 aA	92 aA	89 bA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	89 aA	86 bA	90 bA
CV(%)	3,86		

\*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha pertencem ao mesmo agrupamento, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

As sementes de soja submetidas nas concentrações de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup>, 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup>, 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, resultaram em redução de 11, 10, 11, 15 e 15 pontos percentuais na germinação, respectivamente, comparativamente ao controle (Tabela 2).

Tabela 2. Germinação, primeira contagem de germinação, teste de frio e envelhecimento acelerado em sementes de soja submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P.

Concentrações de Ce	Germinação (%)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	98 aA	87 bB	96 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	97 aA	96 aA	98 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	94 aA	93 aA	95 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	88 bA	91 aA	94 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	87 bA	83 bA	83 bA
CV(%)	4,59		
Concentrações de Ce	Primeira contagem de germinação (%)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	98 aA	87 bB	96 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	97 aA	96 aA	98 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	94 aA	93 aA	95 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	88 bA	91 aA	94 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	87 bA	83 bA	83 bA
CV(%)	4,59		
Concentrações de Ce	Teste de frio (%)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	98 aA	97 aA	98 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	98 aA	99 aA	98 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	98 aA	97 aA	97 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	97 aA	97 aA	98 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	97 aA	96 aA	98 aA
CV(%)	2,33		
Concentrações de Ce	Envelhecimento acelerado (%)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	89 aA	86 aA	87 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	85 aA	85 aA	87 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	86 aA	87 aA	86 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	90 aA	89 aA	85 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	87 aA	83 aA	84 aA
CV(%)	4,63		

\*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha pertencem ao mesmo agrupamento, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A porcentagem de germinação das sementes de tomate, para as diferentes concentrações de Ce dentro de cada concentração de P, não diferiu estatisticamente. Contudo, as mesmas concentrações de Ce dentro das diferentes concentrações de P resultaram em redução de 10 pontos percentuais da germinação, para as sementes submetidas à concentração de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, e seis pontos percentuais, para as sementes submetidas à concentração de 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, com valores de 89 e 93%, respectivamente (Tabela 3).

O teste de germinação é utilizado para verificação da qualidade fisiológica de sementes comercializadas (SILVA et al., 2008). No presente estudo, verificamos que, independentemente da concentração utilizada, todas as sementes apresentaram germinação acima do percentual mínimo exigido para produção e comercialização de sementes de milho, soja e tomate (80%) (BRASIL, 2005).

Estudos realizados com sementes de milho tratadas com Ce apresentaram aumento de aproximadamente 5% da porcentagem de germinação em relação à testemunha (ESPINDOLA et al., 2013).



Porém, o tratamento de sementes de alface com Ce e La não resultou em aumento na porcentagem de germinação (BARBIERI et al., 2013).

A primeira contagem do teste de germinação é um indicativo do vigor das sementes, possibilitando uma estimativa do desempenho das sementes sob condições adversas de campo (FRANCO e PETRINI, 2002). Para sementes de milho e soja, o resultado foi o mesmo obtido no teste de germinação. Contudo, as sementes de tomate do tratamento controle apresentou baixa porcentagem de germinação, de 67% (Tabela 3), demonstrando que as sementes submetidas às diferentes concentrações de Ce, P e Ce combinado com P apresentaram maior vigor, comparativamente ao controle (Tabela 3). Isso pode ser explicado pelo fato de que esses elementos ativam enzimas envolvidas no processo de germinação, aumentando, então, a velocidade desse processo. Sementes de milho tratadas com Ce não apresentaram diferenças significativas na primeira contagem de germinação (ESPINDOLA et al., 2013). Assim como, em estudos realizados com sementes de alface tratadas com Ce e La, não observaram-se diferenças significativas na primeira contagem de germinação (BARBIERI et al., 2013).

O teste de frio visa à avaliação dos efeitos da combinação de baixa temperatura e alta umidade do substrato, identificando diferenças na qualidade fisiológica das sementes (CASEIRO; MARCOS FILHO, 2000 e 2002). Nesse estudo, verificou-se que a exposição das sementes de milho na concentração de  $435 \mu\text{mol L}^{-1}$  P resultou em menor vigor (95%) (Tabela 1). Para sementes de soja, os resultados observados nesse teste demonstram que não houve diferença significativa nas sementes submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P (Tabela 2). A exposição das sementes de tomate na concentração de  $14 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P resultou em baixo vigor (85%) quando comparadas às sementes do tratamento controle (Tabela 3). Isso demonstra que as sementes utilizadas apresentavam alto vigor, uma vez que, sementes de alta qualidade fisiológica devem apresentar, no mínimo, 70 a 85% de plântulas normais no teste de frio (GRABE, 1976). Os dados obtidos corroboram com esta afirmação, já que, nesse trabalho, todas as concentrações de estudo resultaram em médias superiores a 85% de plântulas normais no teste de frio (Tabela 1, 2 e 3).

Tabela 3. Germinação, primeira contagem de germinação e teste de frio em sementes de tomate submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P.

Concentrações de Ce	Germinação (%)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	99 aA	89 aB	93 aB
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	97 aA	93 aA	97 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	94 aA	96 aA	97 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	93 aA	94 aA	98 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	98 aA	92 aA	93 aA
CV(%)	4,36		
Concentrações de Ce	Primeira contagem de germinação (%)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	67 cB	83 aA	88 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	78 bA	82 aA	86 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	89 aA	91 aA	91 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	86 aA	85 aA	90 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	86 aA	83 aA	79 bA
CV(%)	6,58		
Concentrações de Ce	Teste de frio (%)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	92 aA	88 aA	93 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	88 aA	88 aA	93 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	89 aA	91 aA	86 bA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	94 aA	88 aB	85 bB
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	90 aA	91 aA	92 aA
CV(%)	4,61		

\*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha pertencem ao mesmo agrupamento, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O teste de envelhecimento acelerado é, dentre os disponíveis, um dos mais sensíveis e eficientes para a avaliação do vigor de sementes de diversas espécies (MARCOS FILHO, 2005). Esse teste consiste em avaliar a resposta das sementes, por meio do teste de germinação, após estas terem sido submetidas à temperatura elevada e umidade relativa do ar próximo a 100%, por determinado período de exposição (ROSSETO; MARCOS FILHO, 1995). Baseia-se no fato de que a taxa de deterioração aumenta consideravelmente quando as sementes são expostas a tais condições (HAMPTON; TEKRONY, 1995). Assim sendo, verifica-se que, em sementes com baixo vigor, há maior queda na sua viabilidade depois de expostas à situação de estresse pelo envelhecimento (MARCOS FILHO, 1999). No presente trabalho, foi verificado que as sementes de milho submetidas às concentrações de 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P resultaram em redução de 4, 4 e 7 pontos percentuais na viabilidade, após o período de envelhecimento acelerado, comparativamente às sementes provenientes do controle (93%), com 89, 89 e 86% de germinação, respectivamente (Tabela 1). A exposição das sementes de soja em diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P, não apresentou diferenças significativas nos testes de envelhecimento acelerado, porém, as médias de viabilidade foram superiores a 80%, comprovando o alto vigor dessas sementes (Tabela 2).

#### 4.2 Avaliação da atividade das enzimas alfa amilase e isocitrato liase

A enzima alfa amilase promove a hidrólise do amido, disponibilizando os carboidratos necessários ao desenvolvimento do embrião, possibilitando, assim, o processo germinativo (FRANCO et al., 2002). Pelo perfil de expressão da enzima alfa-amilase em sementes de milho submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P, foram observadas isoformas da enzima alfa amilase em todas as concentrações de estudo. Os elementos terras raras, como o Ce, podem contribuir para a atividade das enzimas envolvidas no processo germinativo, como alfa-amilase, responsável pela digestão do amido em sementes endospermáticas como o milho, o arroz e o trigo (LIU; LIU, 1985).

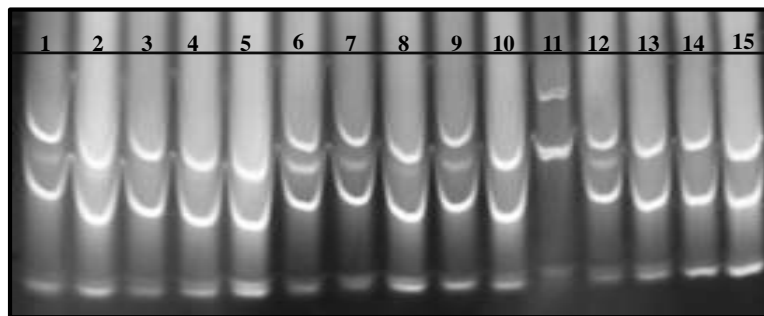


Figura 1 Atividade da enzima alfa amilase em sementes de milho submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P: 1 controle, 2 ( $435 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 3 ( $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 4 ( $0,8 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 5 ( $0,8 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $435 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 6 ( $0,8 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 7 ( $3 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 8 ( $3 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $435 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 9 ( $3 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 10 ( $14 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 11 ( $14 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $435 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 12 ( $14 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 13 ( $57 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 14 ( $57 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $435 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 15 ( $57 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P).

A isocitrato liase está envolvida na degradação de lipídios e influencia os níveis de dormência e, conseqüentemente, na germinação e no estabelecimento de plântulas. Durante cada estágio da germinação, o ciclo do glioxalato inicia uma função de mobilização dos triglicerídeos, onde enzimas como a isocitrato liase têm sua expressão aumentada devido ao metabolismo de lipídeos (GNIAZDOWSKA; BOGATEK, 2005). Essa enzima tem papel importante na transformação de lipídios em sacarose, que vai ser usada durante o processo germinativo. No presente estudo, foram observadas isoformas da enzima isocitrato liase, em todas as sementes submetidas às concentrações de Ce e Ce combinado com  $435$  e  $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P.



Figura 2 Atividade da enzima isocitrato liase em sementes de soja submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P: 1 controle, 2 ( $435 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 3 ( $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 4 ( $0,8 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 5 ( $0,8 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $435 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 6 ( $0,8 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 7 ( $3 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 8 ( $3 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $435 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 9 ( $3 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 10 ( $14 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 11 ( $14 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $435 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 12 ( $14 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 13 ( $57 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 14 ( $57 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $435 \mu\text{mol L}^{-1}$  P), 15 ( $57 \mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  P).

#### 4.3 Avaliações de comprimento e massa seca de plântulas

A determinação do comprimento médio das plântulas normais considera que as amostras que expressam os maiores valores são mais vigorosas (NAKAGAWA, 1999). Isso ocorre devido ao fato das

sementes mais vigorosas originarem plântulas com maior taxa de crescimento, em função da maior translocação das reservas dos tecidos de armazenamento para o crescimento do eixo embrionário (DAN et al., 1987).

Nesse estudo, as plântulas provenientes de sementes de milho submetidas às concentrações controle,  $0,8 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$  e  $0,8 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+} 435 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$  resultaram nos maiores comprimentos da parte aérea, com os respectivos valores de 12,58; 12,48 e 12,56 cm plântula<sup>-1</sup> (Tabela 4). Contudo, as plântulas de soja que resultaram nos maiores comprimentos de parte aérea foram provenientes de sementes submetidas nas concentrações de  $14 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ,  $14 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+} 435 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$  e  $14 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+} 2608 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ , com os valores de 16,19; 16,41 e 16,15 cm plântula<sup>-1</sup> (Tabela 5).

Para as plântulas de tomate, foi avaliado o comprimento total de plântulas e essas apresentaram os maiores valores nas plântulas provenientes de sementes de tomate oriundas das concentrações de 0;  $0,8 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ;  $3 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ;  $14 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ;  $57 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$  e  $57 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+} 2608 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ . Essas plântulas apresentaram as seguintes medias: 11,11; 11,52; 12,02, 12,12, 13,87 e 15,72 cm plântula<sup>-1</sup> (Tabela 6). Plântulas de milho provenientes de sementes tratadas com Ce apresentaram aumento no comprimento da parte aérea, conforme a elevação das concentrações de Ce (ESPÍNDOLA et al., 2013). Da mesma forma, em estudos com sementes de milho e feijão-verde tratadas com Ce, observaram-se resultados positivos sobre o crescimento das plântulas (DIATLOFF et al., 2008). Para a variável comprimento radicular, as maiores médias foram observadas nas raízes de plântulas provenientes de sementes de milho submetidas às concentrações de 0;  $2608 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ ;  $0,8 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ;  $0,8 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+} 435 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ ;  $0,8 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+} 2608 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ ;  $14 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+} 2608 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ ;  $57 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ;  $57 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+} 435 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$  e  $57 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+} 2608 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ , com valores de 19,26; 17,43; 19,14; 22,44; 20,76; 18,81; 17,59; 20,41 e 17,75 cm plântula<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4. Comprimento da parte aérea, raiz, massa seca da parte aérea e raiz de plântulas provenientes de sementes de milho submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P.

Concentrações de Ce	Comprimento parte aérea (cm)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	12,58 aA	6,57 cB	6,43 bB
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	12,48 aA	12,56 aA	8,39 aB
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	3,74 cB	7,46 cA	6,38 bA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	4,59 cB	4,45 dB	8,16 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	7,74 bB	9,11 bA	7,13 bB
CV(%)	13,32		
Concentrações de Ce	Comprimento raiz (cm)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	19,26 aA	16,81 bA	17,43 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	19,14 aA	22,44 aA	20,76 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	8,11 bB	14,80 bA	14,56 bA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	7,66 bC	10,50 cB	18,81 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	17,59 aA	20,41 aA	17,75 aA
CV(%)	11,69		
Concentrações de Ce	Massa seca parte aérea (mg)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	448,00 aA	145,85 cB	129,60 bB
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	474,25 aA	412,50 aB	309,75 aC
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	319,25 bA	290,75 bA	276,50 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	245,50 cA	285,75 bA	295,25 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	285,50 bA	318,00 bA	274,00 aA
CV(%)	12,78		
Concentrações de Ce	Massa seca raiz (mg)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	700,00 bA	299,60 cB	288,92 cB
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	867,25 aB	825,00 aB	990,50 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	816,00 aA	823,50 aA	652,00 bB
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	662,00 bA	628,25 bA	657,50 bA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	682,85 bA	655,25 bA	673,25 bA
CV(%)	10,46		

\*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha pertencem ao mesmo agrupamento, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O comprimento radicular de soja foi maior nas plântulas provenientes de sementes submetidas nas concentrações de 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> e 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P (Tabela 5).

Tabela 5. Comprimento da parte aérea, comprimento da raiz, massa seca da parte aérea e massa seca da raiz de plântulas provenientes de sementes de soja submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P.

Concentrações de Ce	Comprimento parte aérea (cm)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	11,02 cA	10,08 dB	11,68 cA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	11,37 cA	12,10 cA	11,49 cA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	11,79 cA	12,57 cA	12,05 cA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	16,19 aA	16,41 aA	16,15 aA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	14,22 bA	14,69 bA	14,33 bA
CV(%)	5,77		
Concentrações de Ce	Comprimento raiz (cm)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	19,09 bA	15,42 bB	16,05 bB
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	19,00 bA	20,14 aA	19,75 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	20,80 aA	18,39 aB	20,71 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	15,47 cA	16,18 bA	16,53 bA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	15,44 cA	17,44 bA	16,76 bA
CV(%)	6,84		
Concentrações de Ce	Massa seca parte aérea (mg)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	1099,50 aA	1050,55 bA	984,95 bA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	1076,57 aA	1130,07 aA	1114,20 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	1049,07 aA	1104,77 aA	1077,80 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	1118,00 aA	1048,50 bA	1009,50 bA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	1007,50 aA	994,75 bA	1033,75 bA
CV(%)	6,01		
Concentrações de Ce	Massa seca raiz (mg)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	167,57 aA	137,85 aA	160,50 aA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	159,25 aA	162,40 aA	157,85 aA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	171,87 aA	180,02 aA	183,70 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	120,25 bA	100,25 bA	112,00 bA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ Ce <sup>3+</sup>	84,00 bA	105,25 bA	100,25 bA
CV(%)	17,99		

\*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha pertencem ao mesmo agrupamento, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Quanto ao comprimento radicular, observou-se que baixos níveis de Ce provocam aumento no crescimento de raízes e parte aérea de plântulas de *Vigna unguiculata*, enquanto altos níveis de Ce diminuem o comprimento das plântulas (SHYAM; AERY, 2012). De forma semelhante, plântulas de arroz provenientes de sementes tratadas com nitrato de cério apresentaram maiores comprimentos de raiz nas baixas concentrações (0,05 mM e 0,1 mM Ce<sup>3+</sup>) (LIU et al., 2012). Entretanto, verificamos que baixas e altas concentrações de Ce isoladas bem como combinadas com baixas e altas concentrações de P proporcionaram crescimento da parte aérea, assim como da raiz de plântulas de milho provenientes de sementes submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce+P.

A determinação da massa seca das plântulas permite estimar a taxa de transferência de reservas das sementes para o embrião, sendo um indicativo do vigor (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000). Para as

variáveis massa seca da parte aérea e raiz das plântulas e raízes de sementes de milho, as maiores médias para a massa seca da parte aérea foram observadas nas plântulas provenientes de sementes submetidas às concentrações de 0; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ; 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P (Tabela 4). Para a massa seca da raiz das plântulas, as maiores médias foram observadas para as raízes provenientes de sementes submetidas às concentrações de 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  e 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, cujos valores foram de 990,50; 816,00 e 823,50  $\text{cm plântula}^{-1}$ , respectivamente (Tabela 4).

Os valores de massa seca da parte aérea e raiz das plântulas obtidas no teste de germinação de sementes de soja foram maiores nas plântulas oriundas de sementes submetidas às baixas concentrações de Ce e baixa concentração de Ce combinado com baixa e alta concentração de P (controle; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ; 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P) (Tabela 5).

Os resultados de massa seca total de plântulas de tomate, provenientes de sementes submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P, foi maior na concentração baixa de P (435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), com média de 62,95  $\text{mg plântula}^{-1}$  (Tabela 6). Em estudos com sementes de alface tratadas com Ce, observaram-se as maiores médias de massa seca das plântulas nas concentrações de 0,5; 10 e 15  $\text{mg L}^{-1}$  de Ce (BARBIERI et al., 2013).

Tabela 6. Comprimento total de plântulas e massa seca total de plântulas provenientes de sementes de tomate submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P.

Concentrações de Ce	Comprimento total de plântula (cm)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	11,11 aA	10,47 bA	11,06 bA
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ $\text{Ce}^{3+}$	11,52 aA	12,11 bA	8,92 bB
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ $\text{Ce}^{3+}$	12,02 aA	13,01 bA	9,74 bB
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ $\text{Ce}^{3+}$	12,12 aA	11,82 bA	9,20 bB
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ $\text{Ce}^{3+}$	13,87 aA	15,35 aA	15,72 aA
CV(%)	11,99		
Concentrações de Ce	Massa seca total de plântulas (mg)		
	Controle	435 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P	2608 $\mu\text{mol L}^{-1}$ P
Controle	17,00 aC	62,95 aA	39,80 aB
0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ $\text{Ce}^{3+}$	16,00 aA	22,00 bA	14,75 bA
3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ $\text{Ce}^{3+}$	16,50 aA	30,50 bA	31,25 aA
14 $\mu\text{mol L}^{-1}$ $\text{Ce}^{3+}$	15,75 aA	9,50 bA	6,75 bA
57 $\mu\text{mol L}^{-1}$ $\text{Ce}^{3+}$	16,75 aA	18,25 bA	14,50 bA
CV(%)	46,71		

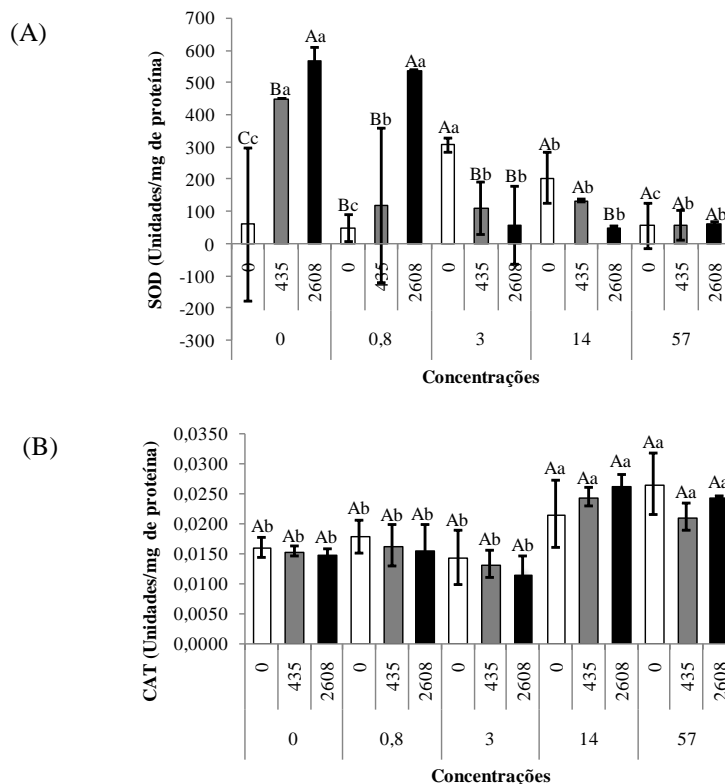
\*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha pertencem ao mesmo agrupamento, pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

#### 4.4 Atividade do sistema antioxidante

A ativação do mecanismo de defesa antioxidante das sementes de milho, soja e tomate submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P foi quantificada através da atividade das enzimas SOD, CAT e POD. Entre as enzimas envolvidas na remoção das espécies reativas de oxigênio (EROs)

formadas em situações de estresse, a SOD é a primeira na linha de defesa contra o estresse oxidativo (POMPEU et al., 2008; PEREIRA et al., 2012). Nesse estudo, foi verificada maior atividade da enzima SOD nas sementes de milho submetidas às concentrações de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  (Figura 3A). Para as sementes de soja, a maior atividade da SOD foi verificada nas sementes submetidas às concentrações de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 26008  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  (Figura 4A). Da mesma forma, as sementes de tomate expostas às concentrações de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P apresentaram as maiores atividades da SOD, comparativamente à concentração controle (Figura 5A).

A atividade da CAT foi maior nas sementes de milho provenientes das concentrações de 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P (Figura 3B). As sementes de soja submetidas às concentrações de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P resultaram as maiores atividades da CAT (Figura 4B). Para as sementes de tomate, foi verificada maior atividade da CAT nas sementes submetidas às concentrações de 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 14 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  (Figura 5B).





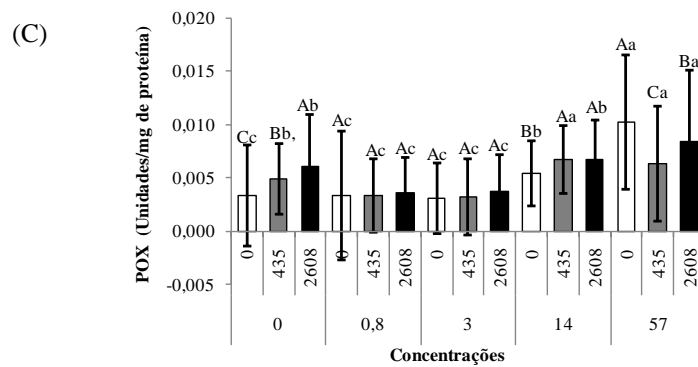
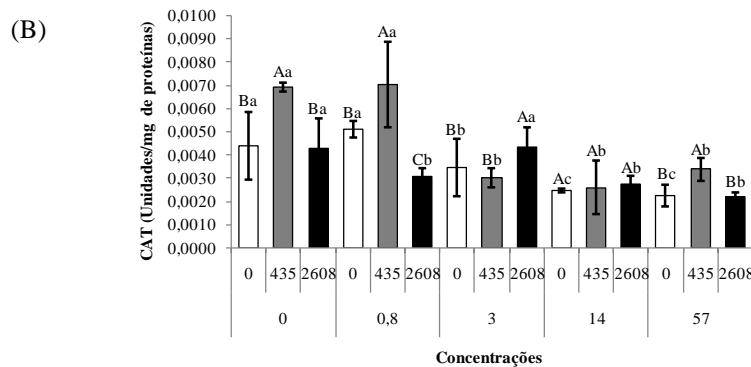
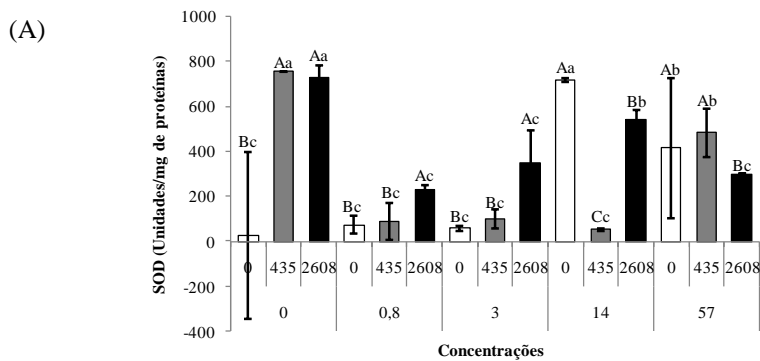


Figura 3 Atividade das enzimas dismutase do superóxido (A), catalase (B) e peroxidase (C) em sementes de milho submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P: 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ . As letras maiúsculas comparam as mesmas concentrações de Ce dentro das diferentes concentrações de P, enquanto as letras minúsculas comparam as diferentes concentrações de Ce dentro de cada nível de P, de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

Quanto à POX, a atividade dessa enzima foi mais elevada nas sementes de milho provenientes das concentrações de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, comparativamente ao tratamento controle (Figura 3C). Para as sementes de soja, as maiores atividades da POX foram verificadas nas sementes submetidas às concentrações de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, em relação às sementes do tratamento controle (Figura 4C).



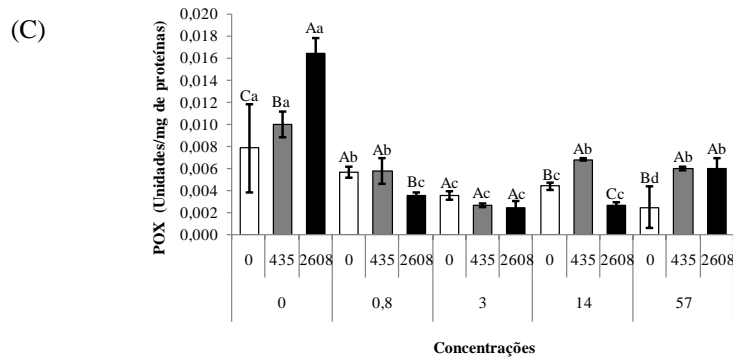
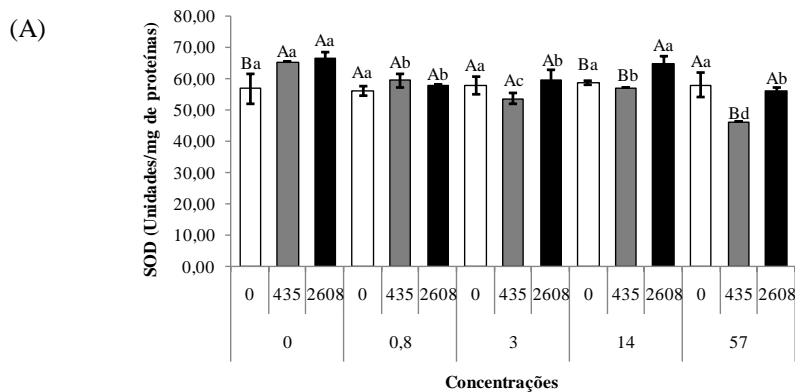


Figura 4 Atividade das enzimas dismutase do superóxido (A), catalase (B) e peroxidase (C) em sementes de soja submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P: 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ . As letras maiúsculas comparam as mesmas concentrações de Ce dentro das diferentes concentrações de P, enquanto as letras minúsculas comparam as diferentes concentrações de Ce dentro de cada nível de P, de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

Assim sendo, o incremento da atividade antioxidante da enzima dismutase do superóxido ocorreu, provavelmente, em resposta à elevação da quantidade de radicais superóxido ( $\text{O}_2^{\bullet-}$ ) produzidos pelo bloqueio da cadeia de transporte de elétrons, conjuntamente à geração de elétrons livres ou pela reação de transferência de elétrons do NAPH para o oxigênio molecular. A conversão do radical  $\text{O}_2^{\bullet-}$ , mediada pela enzima SOD, proporcionou a formação de peróxido de hidrogênio (SINHA; SAXENA, 2006), composto que pode ocasionar estresse oxidativo. Frente à elevação dos níveis de peróxido de hidrogênio, a enzima catalase foi induzida e, ao atuar em conjunto com a peroxidase, possivelmente degradou, até certo ponto, o peróxido de hidrogênio em água, oriundo da reação catalisada pela SOD (BARREIROS et al., 2006).



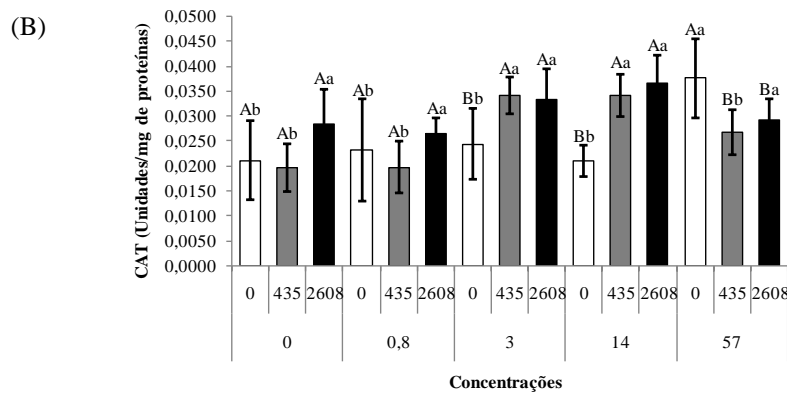


Figura 5 Atividade das enzimas dismutase do superóxido (A) e catalase (B) em sementes de tomate submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P: 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ . As letras maiúsculas comparam as mesmas concentrações de Ce dentro das diferentes concentrações de P, enquanto as letras minúsculas comparam as diferentes concentrações de Ce dentro de cada nível de P, de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

Na figura 6, estão apresentados os padrões das enzimas peroxidase (Figura 6A) e dismutase do superóxido (Figura 6B), respectivamente, em sementes de milho, submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P. Verificou-se a presença de isoformas dessas enzimas em todas as sementes submetidas às concentrações de Ce e Ce combinado com 435 e 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P.

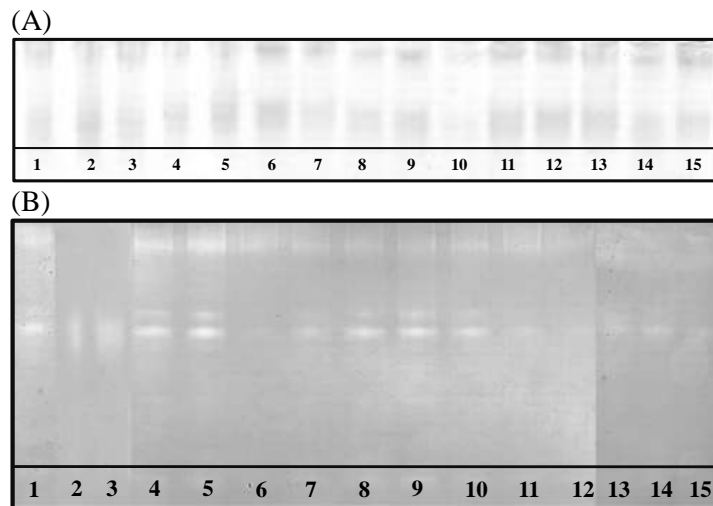


Figura 6 Atividade da enzima peroxidase (A) e dismutase do superóxido (B) em sementes de milho submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P: 1 controle, 2 (435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 3 (2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 4 (0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 5 (0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 6 (0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 7 (3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 8 (3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 9 (3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 10 (14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 11 (14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 12 (14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 13 (57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 14 (57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 15 (57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P).

O padrão de expressão da enzima Peroxidase (Figura 7A) e dismutase do superóxido (Figura 7B), por meio da técnica de eletroforese, nas sementes de soja submetidas às diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P, apresentou isoformas em todas as concentrações de estudo (Figura 7).

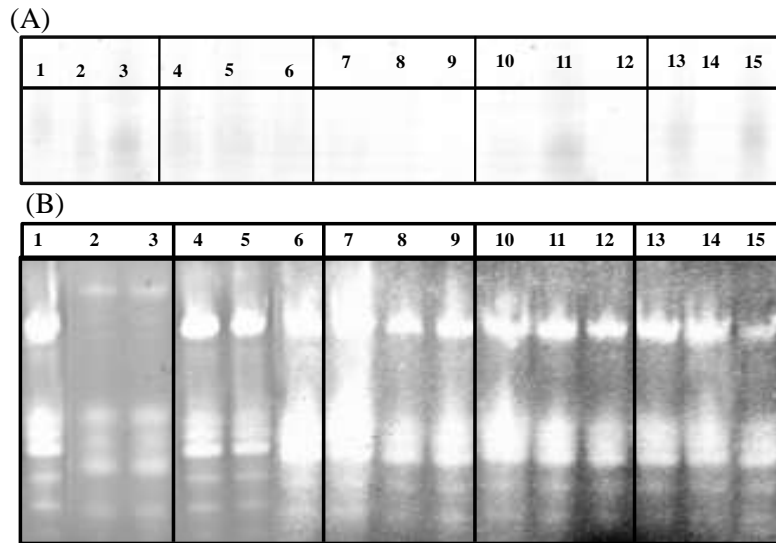


Figura 7 Atividade da enzima peroxidase (A) e dismutase do superóxido (B) em sementes de soja submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P: 1 controle, 2 (435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 3 (2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 4 (0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 5 (0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 6 (0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 7 (3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 8 (3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 9 (3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 10 (14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 11 (14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 12 (14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 13 (57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 14 (57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 15 (57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P).

O padrão de expressão das enzimas CAT (Figura 8A) e SOD (Figura 8B) nas sementes de tomate submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P apresentou isoformas em todas as concentrações de estudo (Figura 8).

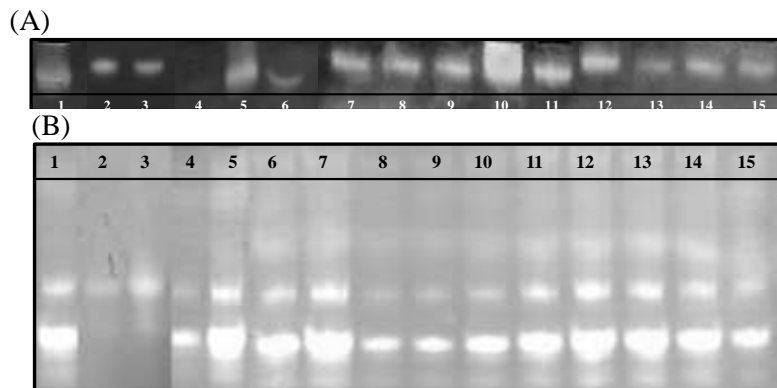


Figura 8 Atividade da enzima catalase (A) e dismutase do superóxido (B) em sementes de tomate submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P: 1 controle, 2 (435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 3 (2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 4 (0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 5 (0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 6 (0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 7 (3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 8 (3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 9 (3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 10 (14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 11 (14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 12 (14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 13 (57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ), 14 (57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P), 15 (57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P).

#### 4.5 Quantificação de $\text{H}_2\text{O}_2$ e Peroxidação Lipídica

A concentração de peróxido de hidrogênio nas sementes de milho foi maior nas sementes oriundas da concentração de 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P. Assim como, quando comparadas às diferentes concentrações de Ce dentro de cada nível de P, as concentrações de 0; 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P resultaram em maior conteúdo de peróxido de hidrogênio (Figura 9A). Os resultados apresentados mostram que as sementes de milho submetidas às cinco concentrações de Ce e Ce combinado com 435 e 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P resultaram em

baixos teores de peróxido de hidrogênio, demonstrando a eficiência das enzimas envolvidas no processo de remoção dessa espécie reativa de oxigênio.

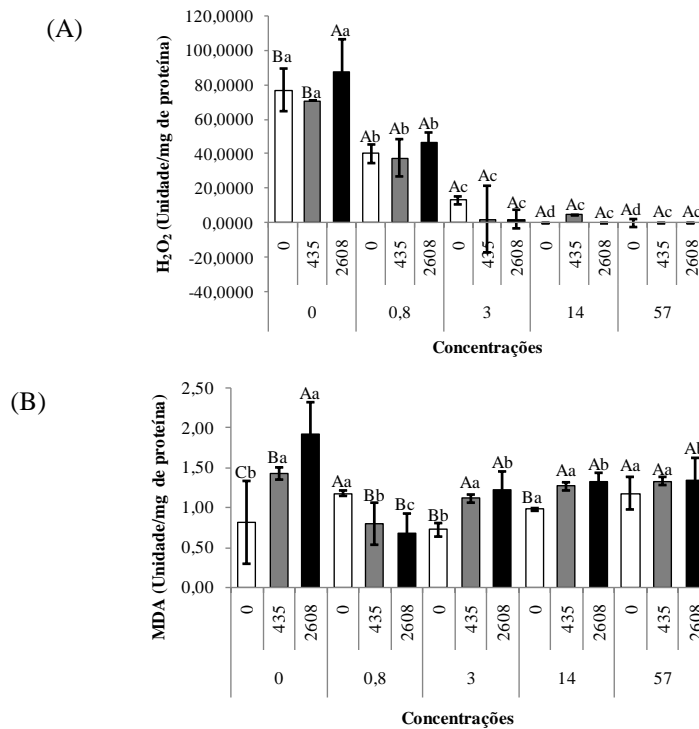
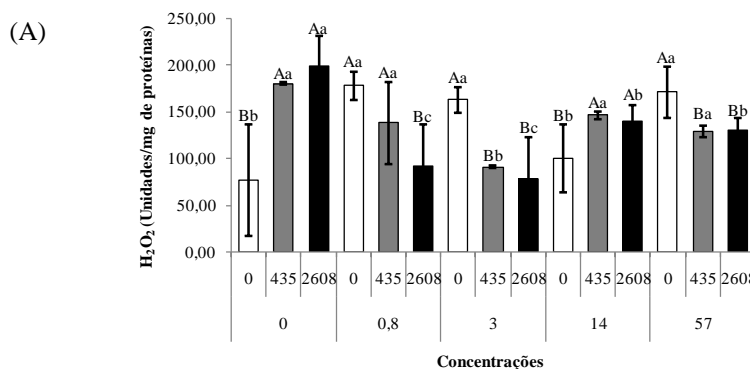


Figura 9 Concentração de peróxido de hidrogênio (A) e peroxidação lipídica (B) em sementes de milho submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P: 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup>, 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup>, 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup>, 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup>. As letras maiúsculas comparam as mesmas concentrações de Ce dentro das diferentes concentrações de P, enquanto as letras minúsculas comparam as diferentes concentrações de Ce dentro de cada nível de P, de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

Para as sementes de soja, a concentração de peróxido de hidrogênio foi maior nas sementes submetidas às concentrações de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup>; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup>; 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup>; 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$  Ce<sup>3+</sup> 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P (Figura 10A).



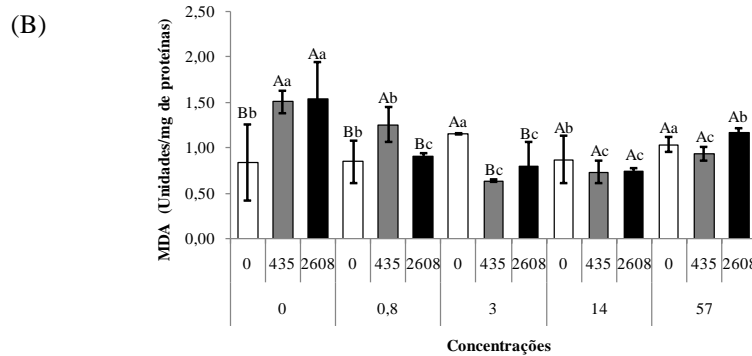


Figura 10 Concentração de peróxido de hidrogênio (A) e peroxidação lipídica (B) em sementes de soja submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P: 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ , 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ . As letras maiúsculas comparam as mesmas concentrações de Ce dentro das diferentes concentrações de P, enquanto as letras minúsculas comparam as diferentes concentrações de Ce dentro de cada nível de P, de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

Nas diferentes concentrações de Ce dentro das mesmas concentrações de P, o peróxido de hidrogênio foi maior nas sementes de tomate submetidas as concentrações de 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ; 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ; 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ; 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P. Quando avaliadas as mesmas concentrações de Ce nas diferentes concentrações de P, as maiores concentrações de peróxido de hidrogênio foram observadas nas sementes provenientes das concentrações de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ; 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ; 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P (Figura 11A).

O aumento da concentração de peróxido de hidrogênio no meio extracelular pode induzir o acréscimo na permeabilidade dos canais de cálcio e, conseqüentemente, elevar a concentração de cálcio livre no citosol (MORI; SCHROEDER, 2004) e alterar diferentes processos fisiológicos. A elevação dos níveis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  em tecidos vegetais estimula a elevação da atividade de enzimas antioxidantes e seu acúmulo pode conduzir ao estresse oxidativo (OMEZZINE et al., 2014).

A peroxidação lipídica é o processo pelo qual as EROs atacam os ácidos graxos polinsaturados dos fosfolípidos das membranas das células, desintegrando-as e permitindo, desta forma, a entrada dessas espécies nas estruturas intracelulares, resultando em alterações nos processos fisiológicos (HALLIWELL; GUTTERIDGE, 1989).

As maiores concentrações de peroxidação lipídica foram observadas nas sementes de milho submetidas às concentrações de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ; 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 3  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 14  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ; 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P (Figura 9B). Para as sementes de soja, as maiores concentrações de peroxidação lipídica foi nas sementes submetidas às concentrações de 435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ; 0,8  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  435  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P; 3

$\mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ;  $14 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$   $435 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ ;  $14 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ ;  $57 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ;  $57 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$  (Figura 10B).

Nas sementes de tomate, a peroxidação lipídica foi menor nas sementes submetidas às concentrações de  $0,8 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ;  $0,8 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$   $435 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ ;  $0,8 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ ;  $3 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ;  $3 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$   $435 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ ;  $3 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$   $2608 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Figura 11B). Esses resultados demonstram que, nessas concentrações, a peroxidação lipídica afetou menos a integridade do sistema de membranas celulares, quando comparadas com as demais concentrações.

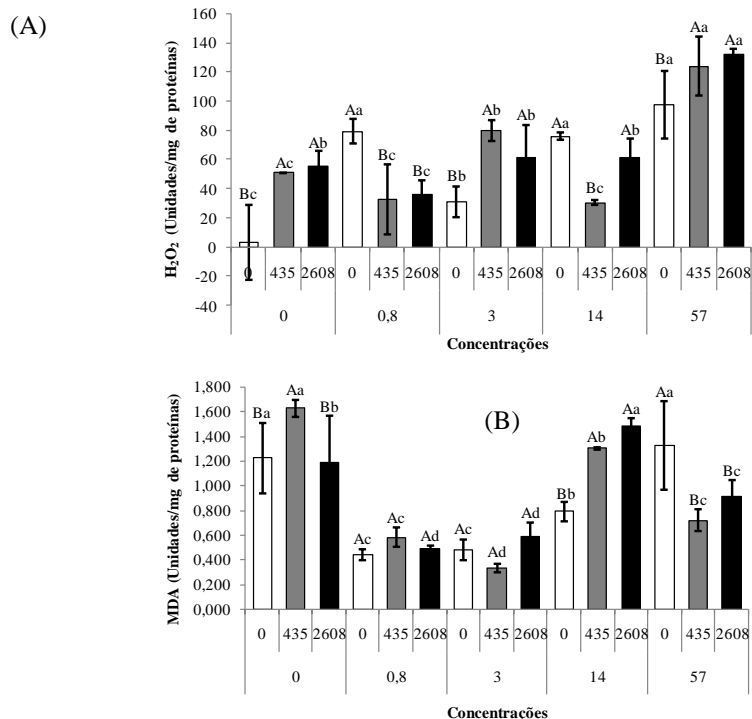


Figura 11 Concentração de peróxido de hidrogênio (A) e peroxidação lipídica (B) em sementes de tomate submetidas a diferentes concentrações de Ce e Ce combinado com P:  $435 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ ,  $2608 \mu\text{mol L}^{-1} \text{P}$ ,  $0,8 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ,  $3 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ,  $14 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ ,  $57 \mu\text{mol L}^{-1} \text{Ce}^{3+}$ . As letras maiúsculas comparam as mesmas concentrações de Ce dentro das diferentes concentrações de P, enquanto as letras minúsculas comparam as diferentes concentrações de Ce dentro de cada nível de P, de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p \leq 0,05$ ).

A peroxidação de lipídeos de membrana é um dos eventos mais significativos do estresse oxidativo porque causa a diminuição da fluidez, modificações de permeabilidade iônica e de outras funções associadas às membranas (QUEIROZ et al., 1998). Os eventos bioquímicos resultantes da diminuição da fluidez das membranas incluem a interferência nas funções das proteínas, a redução do suprimento de energia, a perda de compartimentalização, a liberação acentuada de íons e outros eventos que rompem o metabolismo normal e levam ao desbalanço e perda das funções essenciais (AZIZ; LARHER, 1998).

## 5. CONCLUSÕES

Pode-se concluir, com a realização desse trabalho, que a exposição de sementes de milho, soja e tomate às concentrações de 0,8; 3; 14 e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$  e Ce combinado com 435 e 2608  $\mu\text{mol L}^{-1}$  P, não resultou em aumento na germinação e no vigor.

O comprimento da parte aérea e raízes, assim como massa seca da parte aérea e das raízes de plântulas foi mais pronunciado nas plântulas provenientes de sementes de soja submetidas a baixas concentrações de Ce e Ce combinado com P. A exposição de sementes de tomate nas concentrações de estudo de Ce e Ce combinado com P atenuou o vigor, estimado pela primeira contagem de germinação.

Não houve expressão diferencial da enzima alfa amilase e isocitrato liase nas sementes de milho e soja, respectivamente. As sementes de milho submetidas às altas concentrações de Ce (14 e 57  $\mu\text{mol L}^{-1}$   $\text{Ce}^{3+}$ ) apresentou elevada atividade das enzimas CAT e POX, porém, isso não afetou a qualidade fisiológica das sementes.



## REFERÊNCIAS

- ALFENAS, A.C. Eletroforese e marcadores bioquímicos em plantas e microrganismos. **UFV**, Viçosa, 2006. 627p.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - 2013. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. Disponível em: <[http://www.anda.org.br/estatistica/Principais\\_Indicadores\\_2013.pdf](http://www.anda.org.br/estatistica/Principais_Indicadores_2013.pdf)>. Acesso em: 23 jan. 2017.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA, 2016. **In: Atuante Atualizada. Agrícola. A granja**. Disponível em: <<http://anda.org.br/multimedia/806anda.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2017.
- AZIZ, A.; LARHER, F. Osmotic stress induced changes in lipid composition and peroxidation in leaf discs of Brassica napus L. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v.153, n.5/6, p.754- 762, 1998.
- BARBIERI, A.P.P.; ESPÍNDOLA, M.C.G.; MENEZES, N.L.; HENRIQUE, D.F.S. Tratamento de sementes de alface com soluções aquosas de Cério e Lantânio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.43, n.1, p.104-109, 2013.
- BARREIROS, A.L.B.S.; DAVID, J.M.; DAVID, J.P. Estresse oxidativo: relação entre geração de espécies reativas e defesas do organismo. **Química Nova**, São Paulo, v.29, n.1, p.113-123, 2006.
- BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**, v.116, n.2, p.651-658, 1998.
- BUEGE, J.A.; AUST, S.D. Microsomal lipids peroxidation. **Methods in Enzymology**, v.52, n.1, p.302-310, 1978.
- BRADFORD, M.M. A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding. **Analytical Biochemistry**, v.72, n.7, p.248-254, 1976.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 25, de 16 de dezembro de 2005. Anexo XII: Padrões para produção e comercialização de sementes de alface. 2005. Disponível em: <<http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/PDF/padros.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2017.
- BRASIL. 2009. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA/SDA/ACS, 399p.
- CASEIRO, R.F.; MARCOS FILHO, J. Métodos alternativos do teste de frio para avaliação do vigor de sementes de milho. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.57, n.3, p.459-466, 2000.
- CASEIRO, R.F.; MARCOS FILHO, J. Procedimentos para condução do teste de frio em sementes de milho: pré resfriamento e distribuição do substrato no interior da câmara fria. **Revista Brasileira de Sementes**. v.24, n.2, p.6-11, 2002.
- CAO, X.; CHEN, Y.; GU, Z.; WANG, X. Determination of trace rare earth elements in plant and soil samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, Inglaterra e País de Gales, v.76, n.4, p.295-309, 2000.
- CARVALHO, N.M.; Nakagawa, J. Sementes: ciência, tecnologia e produção. 4. ed. Jaboticabal, FUNEP. 2000, 588p.

- CÍCERO, S.M.; VIEIRA, R.D. Teste de frio. In: Vieira, R.D.; Carvalho, N.M. **Testes de vigor em sementes**. Jaboticabal: FUNEP, p.151-164, 1994.
- CHAO, L. Effects of rare earth elements on vigor enhancement of aged spinach seeds. **Journal of Rare Earth**, Beijing, v.22, n.4, p.547-551, 2004.
- CHEN, NAI-FU. Financial investment opportunities and the macroeconomy, **Journal of Finance**, Hoboken, New Jersey, v.46, n.2, p.529-554, 1991.
- CONNOLLY, S.R. Process-based models of species distributions and the Mid-Domain effect. **The American Naturalist**, Chicago, v.166, n.1, p.1-11, 2005.
- DAN, E.L.; MELLO, V.D.C.; WETZEL, C.T.; POPINIGIS, F.; ZONTA, E.P. Transferência de matéria seca como modo de avaliação do vigor de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v.9, n.3, p.45-55, 1987.
- D'AQUINO, A.L.; MORGANA, B.M.; CARBONI, B.M.A.; STAIANO, C.M.; ANTISARI, D.M.V.; RE, E.M.; LORITO, F.M.; VINALE, F.F.; ABADI, F.K.M.; WOO, F.S.L. Effect of some rare earth elements on the growth and lanthanide accumulation in different *Trichoderma* strains. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.41, n.12, p.2406-2413, 2009.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. DNPM. **Sumário Mineral 2015**. Brasília: DNPM, v.35, n.3, p.1-146, 2016.
- DIAMOND, J. Collapse: How Societies Choose to Fail or Survive. **Environmental History**, Oxford, v.10, n.3, p.538-540, 2005.
- DIATLOFF, E.; SMITH, F.W.; ASHER, C.J. Effects of lanthanum and cerium on the growth and mineral nutrition of corn and mungbean. **Annals of Botany**, Oxford, v.101, n.7, p.971-982, 2008.
- DIATLOFF, E.; SMITH, F. W.; ASHER, C. J. Rare earth elements and plant growth: II. Responses of corn and mung bean to low concentrations of lanthanum in dilute, continuously flowing nutrient solutions. **Journal of Plant Nutrition**, Inglaterra, v.18, n.10, p.1977-1989, 1995.
- DINALI, G. S. **Elementos terras raras em materiais derivados da indústria de fosfatos**. 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- DUTTA, T.; KIM, K.H.; Uchimiya, M.; KWON, E.E.; JEON, B.H.; DEEP, A.; YUN, S.T. Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. **Environmental Research**, New York, v.150, n.1, p.182-190, 2016.
- EL-RAMADY, H.R.H. **A contribution on the bio-actions of rare earth elements in the soil/plant environment**. 2008. 278f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Vida da Técnica) - Universidade Técnica Carolo Wilhelmina, Braunschweig.
- ESPINDOLA, M.C.G.; MENEZES, N.L.; BARBIERI, A.P.P. Efeito do cério na qualidade fisiológica de sementes de milho e no desempenho agrônômico das plantas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.29, n.1, p.1501-1507, 2013.
- FASHUI, H.; WANG, L.; LIU, C. Study of lanthanum on seed germination and growth of rice. **Biological Trace Element Research**, Springer, v.94, n.3, p.273-286, 2003.
- FA-SHUI, H.; ZHENG-GUI, W.; YE, T.; SHOU-KANG, W.; YUE-TAO, Y.; XIN-DE, CAO.; GUI-WEN, Z. Distribution of rare earth elements and structure characterization of chlorophyll-lanthanum in a natural plant fern. **Acta Botanica**, Belo Horizonte, v.41, n.8, p.851-854, 1999.

- FENG, X.; ZHU, G.; LI, Y. Toxicological effects of rare earth yttrium on wheat seedlings (*Triticum aestivum*). **Journal of Rare Earths**, Beijing, v.31, n.12, p.1214-1220, 2013.
- FRANCO, D.F.; PETRINI, J.A. Testes de vigor em sementes de arroz. Pelotas, **Embrapa Clima Temperado**. (Comunicado Técnico, 68). 2002. 2p.
- GAO, Q.F.; FEI, C.F.; DONG, J.Y.; GU, L.L.; Wang, Y.F. Arabidopsis CNGC18 Is a Ca<sup>2+</sup>-Permeable Channel. **Molecular Plant**, Oxford, v.7, n.4, p.739-743, 2014.
- GILLIKIN, J.W.; GRAHAM, J.S. Purificação e análise de desenvolvimento do major peroxidase aniônica do tegumento de Glycinemax. **Plant Physiology**, v.96, n.1, p.214-220, 1991.
- GNIASZDOWSKA, A. BOGATEK, R. Allelopathic interactions between plants. Multi site action of allelochemicals. **Acta Physiologia e Plantarum**. v.27, n.3B, p.395-407, 2005.
- GRABE, D.F. Measurement of seed vigor. Journal of Seed Technology, **Springfield**, V.1, N.2, P.18-31, 1976.
- HALLIWELL B, GUTTERIDGE J.M.C. Free radicals in biology and medicine. **2nd ed. Oxford: Clarendon Press**. v.6, n.2, p.121-230, 1989.
- HAMPTON, J.G.; TEKRONY, D.M. Handbook of vigour test methods. Zurich, **International Seed Testing Association**. 3 ed. 1995. 117p.
- HAXEL, G. B.; HEDRICK, J. B.; ORRIS, G. J. **Rare earth elements: critical resources for high technology**. Reston: United States Geological Survey, 2002. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/>>. Acesso em: 22 mai. 2017.
- HEDRICK, J. B. The global rare-earth cycle. **Journal of Alloys and Compounds**, Beijing, v.225, n.1-2, p.609-618, 1995.
- HU, Z.; RICHTER, H.; SPAROVEK, G.; SCHNUG, E. Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: a review. **Journal of Plant Nutrition**, Oxon, v.27, n.1, p.183-220, 2004.
- IUPAC. Nomenclature of inorganic chemistry-IUPAC **Recommendations**, Cambridge, 2005. 366p.
- KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4 ed. New York: CRC, 2011. 520p.
- KANAZAWA, Y.; KAMITANI, M. Rare earth minerals and resources in the world. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v.408/412, n.9, p.1339-1343, 2006.
- KULAKSIZ, S.; BAU, M. Contrasting behavior of anthropogenic gadolinium and natural rare earth elements in estuaries and the gadolinium input into the North Sea. **Earth and Planetary Science Letters**, Oxford, v.260, n.1-2, p.361-371, 2007.
- KRAUSS, R.M.; DUSHAY, R.A.; CHEN, Y.; RAUSHER, F. The communicative value of conversational hand gestures. **Journal of Experimental Social Psychology**, v.31, n.1, p.533-552, 1995.
- LAPIDO-LOUREIRO, F.E. **O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. 216p.

- LI, F.; SHAN, X.; ZHANG, T.; ZHANG, S. Evaluation of plant availability of rare earth elements in soils by chemical fractionation and multiple regression analysis. **Environmental Pollution**, Berlim, v.102, n.2-3, p.269-277, 1998.
- LI, H.; GUO, F.; ZHANG, Z.; LI, D.; WANG, Z. A new hydrometallurgical process for extracting rare earths from apatite using solvent extraction with P350. **Journal of Alloys and Compounds**, Lausanne, v.408/412, n.9, p.995-998, 2006.
- LIU, H.Y.; LIU, J.L. Effect of REEs on  $\alpha$ -amylase induced by GA3 in the aleurone layer of wheat seed and their interaction. **Rare Metals**, Springer, v.5, n.1, p.61-66, 1985.
- LIJUN, W.; TAO, L.; SHEN, Z.; SHIMING, D.; XIULI, W.; XIN, Y. Biogeochemical Cycle and Residue of Extraneous Rare Earth Elements in Agricultural Ecosystem. **Journal of Rare Earths**, Beijing, v.22, n.1, p.701-706, 2004.
- LIMA, P.C.R. **Terras-Raras: Elementos Estratégicos para o Brasil**. Consultor Legislativo Anexo III, Brasília, 2012, 226p.
- LIU, D.; WANG, X.; LIN, Y.; CHEN, Z.; XU, H.; WANG, L. The effects of cerium on the growth and some antioxidant metabolisms in rice seedlings. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlim, v.19, n. 8, p.3282-3291, 2012.
- LIU, D.; WANG, X.; ZHANG, X.; GAO, Z. Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings. **Plant, Soil and Environment**, Berlim, v.59, n.5, p.196-200, 2013.
- MAESTRO, P.; HUGUENIN, D. Industrial applications of rare earths: which way for the end of the century. **Journal of Alloys and Compounds**, Beijing, v.225, n.1/2, p.520-528, 1995.
- MARCOS FILHO, J. Teste de envelhecimento acelerado. In: KRZYZANOWSKI, F.C. et al. **Vigor de sementes**. Conceitos e testes. Londrina: ABRATES, 1999. p.1.1-1.21.
- MARCOS, F.J. Fisiologia de sementes de plantas cultivadas. Piracicaba: Fealq, 2005. 495p.
- MARTINS, T. S.; ISOLANI, P. C. Rare earths: industrial and biological applications. **Química Nova**, São Paulo, v.28, n.1, p.111-117, 2005.
- MOLDOVEANU, G.A.; PAPANGELAKIS, V.G. Recovery of rare earth elements adsorbed on clay minerals: I. desorption mechanism. **Hydrometallurgy**, Amsterdam, v.117-118, n.4, p.71-78, 2012.
- MORI, I.C.; SCHROEDER, J.I. Reactive oxygen species activation of plant Ca<sup>2+</sup> channels. A signaling mechanism in polar growth, hormone transduction, stress signaling, and hypothetically mechanotransduction. **Plant Physiology**, v.135, v.2, p.702-8, 2004.
- NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: Krzyzanoski, F.C.; Vieira, R.D.; França Neto, J.B. (Ed.). **Vigor de sementes: Conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. p.2.1-2.24.
- NAKANISHI, T. M.; TAKAHASHI, J.; YAGI, H. Rare earth element, Al, and Sc partition between soil and caatinger wood grown in north-east Brazil by instrumental neutron activation analysis. **Biological Trace Elements Residual**, Berlim, v.60, n.3, p.163-174, 1997.
- QUEIROZ, C.G.S.; ALONSO, A.; MARESGUIA, M.; MAGALHÃES, A.C. Chilling induced changes in membrane fluidity and antioxidant enzyme activities in Coffea arabica L. roots. **Biology Plantarum**, Prague, v.41, n.3, p.403- 413, 1998.

- OLIVEIRA, K.A.P.; MENEZES, M.A.B.C.; VON SPERLING, E.; JACOMINO, V.M.F. Transfer factor of rare earth elements from phosphor gypsum amended Brazilian tropical soils to lettuce, corn and soybean. **The Journal of Solid Waste Technology and Management**, Philadelphia, v.38, n.3, p.202-210, 2012.
- OLIVEIRA, C.; RAMOS, S.J.; SIQUEIRA, J.O.; FAQUIN, V.; CASTRO, E.M.; AMARAL, D.C.; TECHIO, V.H.; COELHO, L.C.; SILVA, P.H.P.; SCHNUG, E.; GUILHERME, L.R.G. Bioaccumulation and effects of lanthanum on growth and mitotic index in soybean plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v.122, n.1, p.136-144, 2015.
- OMEZZINE, F.; DAAMI-REMADI, M.; LADHARI, A.; HAOUALA, R. Variation in phytochemical content and antifungal activity of *Trigonella foenum-graecum* L. with plant developmental stage and ploidy level. **South African Journal of Botany**. v.92, n.5, p.120-125, 2014.
- PANG, X.; LI, D.; PENG, A. Application of rare-earth elements in the agriculture of China and its environmental behavior in soil. **Environmental science and pollution research international**, Berlim, v.9, n.2, p.143-8, 2002.
- PAPASTEFANOU, C.; STOULOS, S.; IOANNIDOU, A.; MANOLOPOULOU, M. The application of phosphor gypsum in agriculture and the radiological impact. **Journal of Environmental Radioactivity**, Oxford, v.89, n.2, p.188–198, 2006.
- PEREIRA, M.D.; MARTINS FILHO, S. Suitability of electrical conductivity test for *Solanum sessiliflorum* seeds. **Revista Agrarian**, v.5, n.16, p.93-98, 2012.
- POMPEU, R.C.F.F.; CÂNDIDO, M.J.D.; NEIVA, J.M.N. Componentes da biomassa pré-pastejo e pós-pastejo de capim-tanzânia sob lotação rotativa com quatro níveis de suplementação concentrada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.37, n.3, p.383-393, 2008.
- RAMOS, S. J. et al. 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, 2016a.
- RAMOS, S. J. et al. Rare earth elements in the soil environment. **Current Pollution Reports**, New York, v. 2, n. 1, p. 28-50, 2016b.
- REUTLINGEN, K. R. DE. **Rare Earth Elements in agriculture with emphasis on animal husbandry**. 2006. 360f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia e Nutrição Animal) - Universidade de Munique, Munique.
- ROSSETTO, C.A.V.; MARCOS FILHO, J. Comparação entre os métodos de envelhecimento acelerado e de deterioração controlada para avaliação da qualidade fisiológica de sementes de soja. **Scientia Agricola**, v.52, n.2, p.123-131, 1995.
- SABIHA-JAVIED, M.; TUFALL, M.; ASGHAR, M. Hazard of NORM from phosphorite of Pakistan. **Journal Hazard Mater**, Amsterdã, v.136, n.1-3, p.426-433, 2010.
- SANTOS, A.J.G. ; MAZZILLI, B.P.; FÁVARO, D.I.; SILVA, P.S.C. Partitioning of radionuclides and trace elements in phosphor gypsum and its source materials based on sequential extraction methods. **Journal of Environmental Radioactivity**, Oxford, v.87, n.1, p.52-61, 2006.
- SANTOS, H.O. Qualidade fisiológica e expressão de genes durante o desenvolvimento de sementes de pimenta habanero (*Capsicum chinense* J.). 2013. 70p. **Tese (Doutorado)** - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- SERRA, O.A. Rare earths: Brazil x China. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v.22, n.5, p.811-812, 2011.

SILVA, J.I.; GARCIA, S.M.; SILVA, V.N.; NOBRE, F.L.L.; ZAMBIASI, C.A.; LUCCA FILHO, O.A. Avaliação da qualidade fisiológica de sementes de tomate. XVII Congresso de Iniciação Científica. Conhecimento sem fronteiras. Pelotas, novembro de 2008.

SINHA, S.; SAXENA, R. Effect of iron on lipid peroxidation, and enzymatic and nonenzymatic antioxidants and bacoside-a content in medicinal plant bacopa monnieri l. **Chemosphere**, Oxford, v.629, n.8, p.1340-1350, 2006.

SHI, P.; CHEN, G.C.; HUANG, Z.W. Effects of La<sup>3+</sup> on the active oxygen-scavenging enzyme activities in cucumber seedling leaves. **Russian Journal of Plant Physiology**, Moscou, v.52, n. 5, p.294-297, 2005.

SHYAM, R.; AERY, N. C. Effect of cerium on growth, dry matter production, biochemical constituents and enzymatic activities of cowpea plants *Vigna unguiculata* (L.) Walp. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.12, n.1, p.1-14, 2012.

ŠMUC, N.R.; DOLENEC, T.; SERAFIMOVSKI, T.; DOLENEC, M.; VRHOVNIK, P. Geochemical characteristics of rare earth elements (REEs) in the paddy soil and rice (*Oryza sativa* L.) system of Kočani Field Republic of Macedonia. **Geoderma**, Amsterdam, v.183-184, n.8, p.1-11, 2012.

TODOROVSKY, D. S.; MINKOVA, N. L.; BAKALOVA, D. P. Effect of the application of superphosphate on rare earths' content in the soil. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.203, n.1, p.13-16, 1997.

TURRA, C.; FERNANDES, E. A.; BACCHI, M. A. Evaluation on rare earth elements of Brazilian agricultural supplies. **Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, Oxford, v.3, n.4, p.86-92, 2011.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity**. Washington: USGS, 2013.

VELASCO, J. R.; DOMINGO, L.E.; LANSANGAN, A.S.; SIERRA, Z.N. Cultural studies on coconut-cadang: reaction of plants to the rare earths, thallium and certain soil samples. **The Philippine journal of coconut studies**, Filipinas, v.4, n.1, p.1-13, 1979.

VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A. Oxidative Stress and Some Antioxidant Systems in Acid Rain Treated Bean Plants: **Protective Role of Exogenous Polyamines**. *Plant Science*, v.151, n.1, p.59-66, 2000.

VIEIRA, B.G.T.L.; VIEIRA, R.D.; KRZYANOWSKI, F.C.; NETO, J.B.F. Alternative procedure for the cold test for soybean seeds. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.67, n.5, p.540-545, 2010.

WANG, Z.; ZHANG, X.; MU, Y. Effects of rare-earth fertilizers on the emission of nitrous oxide from agricultural soils in China. **Atmospheric Environment**, Oxford, v.42, n.16, p.3882-2887, 2008.

WANG, X.; LIN, Y.; LIU, D.; XU, H.; LIU, T.; ZHAO, F. Cerium toxicity, uptake and translocation in *Arabidopsis thaliana* seedlings. **Journal of Rare Earths**, Washington, v.30, n.6, p.579-585, 2012.

WEEKS, M.E. The discovery of the elements. Chronology. **Journal Chemical**. Amsterdã, v.10, n.4, p.223, 1933.

WEI, Y. Z.; ZHOU, X. B.; MOHAMED, O. M. Mechanism of application of Nd to increase yield of rapeseed. **Journal of Plant Nutrition and Fertility**, Inglaterra e País de Gales, v.5, n.2, p.186-188, 1999.

WEI, Z.; YIN, M.; ZHANG, X.; HONG, F.; LI, B.; TAO, Y.; ZHAO, G.; YAN, C. Rare earth elements in naturally grown fern *Dicranopteris linearis* in relation to their variation in soils in south-Jiangxi region (southern China). **Environmental Pollution**, Amsterdã, v.114, n.3, p.345-355, 2001.

WEN, B.; YUAN, D.; SHAN, X.; LI, F.; ZHANG, S. The influence of rare earth element fertilizer application on the distribution and bioaccumulation of rare earth elements in plants under field conditions. **Chemical Special and Bioavailability**, Inglaterra e País de Gales, v.13, n.2, p.39-48, 2001.

XU, X.; ZHU, W.; WANG, Z.; WITKAMP, G. Distribution of rare earths and heavy metals in field-grown maize after application of rare earth-containing fertilizer. **The Science of the Total Environment**, Amsterdã, v.293, n.1-3, p.97-105, 2002.

XUE, W.; LIN, Y.; LIU, D.; XU, H.; LIU, T.; ZHAO, F. Cerium toxicity, uptake and translocation in *Arabidopsis thaliana* seedlings. **Journal of Rare Earths**, Washington, v.30, n.6, p.579-585, 2012.

YAJIA, L.; ANG YAN, W.; FUBIN, W.; UMING, Y.; JIANYU, U.I.; LIN, H.; KANGGUO, M. Control effect of lanthanum against plant disease. **Journal of Rare Earths**, Beijing, v.26, n.1, p.115-120, 2008.

YIN, S.; ZE, Y.; LIU, C.; LI, N.; ZHOU, M.; DUAN, Y.; HONG, F. Cerium relieves the inhibition of nitrogen metabolism of spinach caused by magnesium deficiency. **Biological Trace Element Research**, Clifton, v.132, n.1-3, p.247-258, 2009.

ZHU, Z. M.; WU, T. B. Study effect of REEs on soybean. **Rare Metals**, Berlim, v.3, n.1, p.15–19, 1982.