

REGINALDO CASTRO DE SOUZA JÚNIOR

**FÓSFORO E SILÍCIO NA QUALIDADE E NA TOLERÂNCIA DE SEMENTES DE
SOJA AO ESTRESSE HÍDRICO**

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

Orientador: Laércio Junio da Silva

Coorientadores: Felipe Lopes da Silva
Denise Cunha Fernandes
dos Santos Dias

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2018**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

S729f
2018 Souza Júnior, Reginaldo Castro de, 1986-
Fósforo e silício na qualidade e na tolerância de sementes
de soja ao estresse hídrico / Reginaldo Castro de Souza Júnior. –
Viçosa, MG, 2018.

1 dissertação eletrônica (74 f.): il.

Orientador: Laércio Junio da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Agronomia, 2018.

Inclui bibliografia.

Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/>

1. *Glycine max*. 2. Sementes. 3. Germinação. 4. Plantas -
Efeito da seca. 5. Plantas - Nutrição. I. Silva, Laércio Junio da,
1984-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia.
III. Título.

CDD 22. ed. 633.3421

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto CRB6 2523

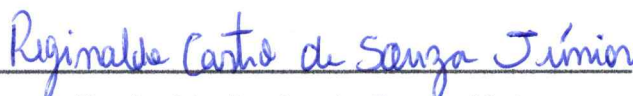
REGINALDO CASTRO DE SOUZA JÚNIOR

FÓSFORO E SILÍCIO NA QUALIDADE E NA TOLERÂNCIA DE SEMENTES DE
SOJA AO ESTRESSE HÍDRICO

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

APROVADA: 22 de fevereiro de 2018.

Assentimento:



Reginaldo Castro de Souza Júnior
Autor



Laércio Junio da Silva
Orientador

*A Deus, a Martha Freire, a meus amigos e familiares!
Dedico*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, por sempre guiar meu caminho, dando-me forças em todos os momentos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Fitotecnia pela oportunidade de participação no mestrado e por todo o conhecimento adquirido nesta etapa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa.

Ao Professor Laércio Junio da Silva, pela oportunidade, orientação, ensinamentos e amizade.

À Professora Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias, ao Professor Felipe Lopes da Silva e ao Dr. Antônio Matos, pelos ensinamentos, apoio, amizade e agradável convívio.

Ao professor Eduardo Euclides de Lima e Borges (DEF/UFV) por disponibilizar a estrutura necessária para as análises enzimáticas.

À Martha Freire por todo apoio, incentivo, conselhos, companheirismo. Sua ajuda foi imprescindível na execução desse trabalho.

Aos amigos do Grupo de Estudos em Sementes (GSEM), aos laboratoristas José Custódio e Wander Douglas pelo apoio, ajuda, companheirismo e agradável convívio.

Aos meus pais Maria das Graças e Reginaldo Castro pelo amor, apoio, incentivo.

A todos os amigos, tios, primos e avós que de certa forma contribuíram na minha caminhada e tornaram possível a realização e conclusão deste trabalho.

Muito obrigado!!!

BIOGRAFIA

Reginaldo Castro de Souza Júnior, filho de Reginaldo Castro de Souza e Maria das Graças Pacheco de Souza, nasceu na cidade de Viçosa (MG), no dia 27 de dezembro de 1986.

No ano de 2007 iniciou a graduação no curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa, graduando-se em março de 2014.

Durante a graduação participou de um intercâmbio no exterior. Em 2013, estagiou na empresa Bergen`s Greenhouse, em Detroit Lakes-Minessota-USA.

Em março de 2016, iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-graduação em Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, com ênfase na área de Tecnologia e Produção de Sementes.

RESUMO

SOUZA JUNIOR, Reginaldo Castro de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Fósforo e silício na qualidade e na tolerância de sementes de soja ao estresse hídrico**. Orientador: Laércio Junio da Silva. Coorientadores: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias e Felipe Lopes da Silva.

A utilização de sementes de elevada qualidade fisiológica é de grande importância para se obter adequada formação do estande de plantas. A deficiência hídrica é o fator limitante de maior significância para a germinação, sobrevivência e crescimento inicial das plantas. A nutrição adequada das plantas possibilita a produção de sementes com maior qualidade fisiológica e, conseqüentemente, mais tolerantes aos diversos estresses abióticos. Dentre os nutrientes que apresentam efeito benéfico na produção das sementes destacam-se o fósforo (P) e o silício (Si). Ainda, existem evidências de que o silício atua no aumento do poder antioxidativo das células e contribui para maior tolerância das plantas e das sementes aos diferentes estresses. Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito do P e do Si aplicados à planta de soja na qualidade fisiológica das sementes produzidas e na tolerância ao estresse hídrico durante a germinação e crescimento inicial das plântulas. Foram conduzidos dois experimentos com a utilização de duas cultivares de soja: TMG 132RR e Anta 82. No primeiro experimento, para avaliação da qualidade fisiológica das sementes, adotou-se o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 3x2, ou seja, três níveis de fósforo (baixo nível, nível recomendado e alto nível) e dois níveis de silício (aplicação ou não de silício ao solo), com quatro repetições. As sementes produzidas foram submetidas aos seguintes testes: germinação; primeira contagem da germinação; envelhecimento acelerado; condutividade elétrica; emergência de plântulas; matéria seca da raiz; matéria seca da parte aérea; matéria seca total e relação parte aérea raiz. No segundo experimento, para avaliação do efeito do P e do Si na tolerância das sementes ao estresse hídrico, foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 3x2x4, ou seja, três níveis de fósforo (baixo nível, nível recomendado e alto nível), dois níveis de silício (aplicação ou não de silício ao solo) e quatro potenciais osmóticos (0 MPa; -0,2 MPa; -0,4 MPa e -0,6 MPa). As sementes foram submetidas

aos seguintes testes: germinação; primeira contagem de germinação; crescimento de plântulas (comprimento e massa seca de raiz e parte aérea); e atividade de enzimas do sistema de defesa antioxidativo: superóxido dismutase, catalase, peroxidases e peroxidase do ascorbato. Para a atividade enzimática foram utilizados apenas os potenciais osmóticos 0 MPa (controle) e -0,4 MPa. Os dados obtidos para as cultivares foram analisados separadamente. O fósforo e o silício não afetaram a germinação das sementes, porém houve incremento do vigor quando foi aplicado o maior nível de fósforo. Com a aplicação de silício, não foi observada diferença no vigor das sementes entre diferentes doses de fósforo. O aumento da disponibilidade de P para as plantas contribuiu para o aumento do vigor das sementes produzidas e o silício contribuiu para o aumento do vigor das sementes quando há baixa disponibilidade de fósforo. Foi observada redução da germinação e dos valores obtidos na primeira contagem de germinação, bem como do crescimento das plântulas sob condição de estresse hídrico. O aumento da disponibilidade de fósforo para as plantas contribuiu para o maior crescimento das plântulas sob condições de déficit hídrico. Foi observado aumento nas atividades das enzimas antioxidativas CAT, APX e POX nas sementes submetidas ao estresse hídrico, em ambas as cultivares. Assim, sementes oriundas de plantas cultivadas com maior disponibilidade de P apresentam maior crescimento das plântulas sob condições de déficit hídrico.

Palavras-chave: *Glycine max*. Sementes. Germinação. Plantas – Efeito da seca. Plantas – Nutrição.

ABSTRACT

SOUZA JUNIOR, Reginaldo Castro de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Phosphorus and silicon in the quality and tolerance of soybean seeds to water stress** Adviser: Laércio Junio da Silva. Co-advisers: Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias and Felipe Lopes da Silva.

The use of seeds with high physiological quality is of great importance to obtain an adequate stand formation. The water deficit is the limiting factor of greater significance in germination, survival and initial plant growth. The adequate plant nutrition allows the production of seeds with higher physiological quality and, consequently, more tolerant to the various abiotic stresses. Among the nutrients that have a beneficial effect on seed production are phosphorus (P) and silicon (Si). Furthermore, there is evidence that silicon acts to increase the antioxidative power of cells and contributes to greater tolerance of plants and seeds to different stresses. Thus, the general objective of this work was to evaluate the effect of P and Si on soybean seed quality and the tolerance to water deficit during germination and initial seedling growth. Two experiments were conducted with two soybean cultivars: TMG 132RR and Anta 82. In the first experiment, the completely randomized design was used in a 3x2 factorial design, that is, three levels of phosphorus (low level, recommended level and high level) and two levels of silicon (application or no silicon to the soil) with four replicates. The seeds produced were tested to determine the following parameters: germination; first germination count; accelerated aging; electrical conductivity; emergence of seedlings; root dry matter; dry matter of the aerial part; total dry matter and root shoot ratio. In the second experiment, to evaluate the effect of P and Si on water stress tolerance, the treatments were arranged in a 3x2x4 factorial scheme, that is, three levels of phosphorus (low level, recommended level and high level), two levels of silicon (application or no silicon to the soil) and four osmotic potentials (0; -0.2 MPa; -0.4 MPa and -0.6 MPa). The seeds were submitted to the following tests and determinations: germination; first germination count; seedlings growth (root and shoot dry mass and length); and activity of SOD, CAT, APX and POX enzymes. To evaluate the enzymatic activities of the antioxidative defense system, the two osmotic potentials (0.0 and -0.4 MPa) were used. The data obtained for the cultivars were analyzed separately. Phosphorus and

silicon doses did not affect seed germination, but seed vigor increased when the highest level of phosphorus was applied, in the absence of silicon. When applied silicon, there was no difference in seed vigor at different doses of phosphorus. The increase in the availability of P to the plants contributes to increase the vigor of the seeds produced and the silicon contributes to the increase of the vigor of the seeds when there is low availability of phosphorus. Reduction in seed germination and in the values obtained for the first count of germination, as well as the growth of the seedlings under water stress conditions were observed. The increase in the availability of phosphorus to the plants contributed to the higher growth of the seedlings under conditions of water deficit. It was observed an increase in the activities of the CAT, APX and POX antioxidative enzymes in seeds subjected to water stress in both cultivars. Thus, seeds from plant cultivated under higher P availability present higher seedling growth under water deficit conditions.

Keywords: *Glycine max.* Seeds. Germination. Plants – Drought effect. Plants – Nutrition.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	12
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
3. Capítulo I - Qualidade fisiológica de sementes de soja provenientes de plantas adubadas com diferentes doses de fósforo e da aplicação de silício às plantas	19
4. ABSTRACT	20
5. INTRODUÇÃO	21
6. MATERIAL E MÉTODOS	24
6.1. Germinação	26
6.2. Primeira contagem da germinação	27
6.3. Envelhecimento acelerado	27
6.4. Condutividade elétrica	27
6.5. Emergência de plântulas	27
6.6. Índice de velocidade de emergência (IVE)	28
6.7. Velocidade de emergência (VE)	28
6.8. Crescimento de plântulas	29
7. ANÁLISE ESTATÍSTICA	29
8. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
9. CONCLUSÕES	38
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
11. Capítulo II - Efeito do fósforo e silício fornecidos às plantas na tolerância de sementes de soja ao estresse hídrico	42
12. ABSTRACT	43
13. INTRODUÇÃO	45
14. MATERIAL E MÉTODOS	48
14.1. Germinação	49
14.2. Primeira contagem da germinação	49
14.3. Crescimento de plântulas	49
14.4. Determinação da atividade da enzima superóxido dismutase (SOD)	51

14.5. Determinação da atividade da enzima catalase (CAT)	51
14.6. Determinação da atividade da enzima peroxidase (POX)	52
14.7. Determinação da atividade da enzima peroxidase do ascorbato (APX) ..	52
15. ANÁLISE ESTATÍSTICA	52
16. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
17. CONCLUSÕES	70
18. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

INTRODUÇÃO GERAL

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma das cinco culturas mais importantes em todo o mundo. O Brasil se destaca mundialmente como o maior exportador e o segundo maior produtor de soja, contribuindo com cerca de 32,4% da produção total de grãos. A área plantada com a cultura na safra 2016/2017 no Brasil foi de 33,9 milhões de hectares, com produtividade média de 3.364 kg/ha (Conab, 2017).

As variações climáticas levam ao surgimento de estresses abióticos, que são considerados um dos principais fatores de restrição à agricultura brasileira, uma vez que causam efeitos adversos no crescimento e desenvolvimento das plantas. O rendimento da cultura da soja é afetado por esses estresses, dentre os quais o déficit hídrico é um dos mais importantes (Passioura, 2007).

A produtividade das culturas agrícolas é limitada pela água e depende da quantidade disponível deste recurso e da eficiência do seu uso pela planta. Como diversas outras culturas, a soja é sensível ao estresse hídrico e a necessidade de água da cultura é relativamente elevada, pois chega a 850 mm ciclo⁻¹ (Yang et al., 2003; Silva et al., 2015). Nos últimos anos, o Brasil registrou um prejuízo de cerca de 27 bilhões de dólares na produção de soja apenas em dois dos estados produtores, Rio Grande do Sul e Paraná, onde as plantações deixaram de produzir mais de 55 milhões de toneladas devido a períodos de seca (Conab, 2014).

A disponibilidade hídrica, bastante variável em termos espacial e temporal, constitui-se no principal limitante à obtenção de rendimentos mais próximos ao máximo potencial produtivo. Para os produtores, o desafio é então produzir mais com uma quantidade de água, possivelmente limitada (Passioura, 2007). Além disso, sua ocorrência na fase de implantação da lavoura afeta a germinação das sementes, reduz a emergência das plântulas e o desenvolvimento inicial das plantas em campo (Wang et al., 2004).

O sucesso da lavoura de soja depende de diversos fatores, mas sem dúvida, o mais importante deles é a utilização de sementes de elevada qualidade, que geram plantas de alto vigor, que terão um desempenho superior no campo. O uso de sementes de elevada qualidade permite o acesso aos avanços genéticos, com as garantias de qualidade e tecnologias de adaptação nas diversas regiões, assegurando maiores produtividades (França-Neto et al., 2016).

A demanda por sementes de alta qualidade tem aumentado significativamente, devido ao aprimoramento tecnológico dos agricultores e ao aumento da área cultivada. As sementes de alta qualidade envolvem uma série de características, dentre as quais estão os atributos fisiológicos, a germinação e o vigor.

O vigor das sementes é um dos principais atributos da qualidade fisiológica a ser considerado na implantação de uma lavoura. Marcos Filho e Kikuti (2006) enfatizam que o uso de sementes vigorosas é justificável para assegurar o estabelecimento adequado do estande, mesmo que não haja resposta consistente em termos de produção final das plantas.

O uso de sementes de baixa qualidade, aliado à ocorrência de condições adversas, como o déficit hídrico, por ocasião do plantio, pode resultar em baixa porcentagem de germinação e menor velocidade de emergência das plântulas. A limitação da disponibilidade de água altera a velocidade de absorção de água pelas sementes e modifica as velocidades das reações químicas que irão acionar o desdobramento, o transporte de reservas e a síntese de compostos para o crescimento das plântulas (Marcos-Filho, 2015). Por outro lado, as sementes consideradas de alto vigor normalmente germinam de maneira mais rápida e uniforme, sendo capazes de suportar melhor as adversidades do ambiente.

Um dos principais fatores responsáveis pela produção de sementes com elevada qualidade fisiológica é a nutrição adequada das plantas. Dentre os nutrientes requeridos em maior quantidade, destaca-se o fósforo, que participa e é fonte de energia para vários processos metabólicos. Esse nutriente apresenta uma dinâmica complexa no solo e muitas vezes pode não estar disponível em quantidade suficiente para as plantas e, como consequência, pode afetar o vigor das sementes produzidas.

Alguns autores sugerem que o fósforo em níveis superiores aos recomendados, em campos de produção de sementes, pode interferir positivamente na qualidade fisiológica da semente produzidas. Além disso, tal melhoria refletiria em incrementos na produção de grãos da próxima geração (Trigo et al., 1997; Corrêa et al., 2004; Marcos-Filho, 2015; Peske et al., 2009).

O fósforo é um dos principais minerais envolvidos no processo de germinação, sendo que os teores presentes na semente são a única fonte deste

elemento para o desenvolvimento inicial da plântula. Após a germinação, as reservas de fósforo nas sementes são rapidamente mobilizadas e translocadas para os tecidos das raízes e parte aérea (White e Veneklaas, 2012).

Durante a emergência das plântulas, a principal fonte de fósforo provém da semente (Trigo et al., 1997). O incremento da concentração deste mineral via endógena e/ou exógena proporciona melhor estabelecimento da planta no solo (Trigo et al., 1997; Soares, 2013). Assim, as sementes que já apresentam um teor de fósforo endógeno elevado podem fornecer mais energia para a plântula e, conseqüentemente, para a planta durante o seu estabelecimento inicial no campo, contudo esta resposta pode variar para diferentes genótipos da mesma espécie.

Os efeitos da nutrição fosfatada em soja podem ser observados em diversas características das sementes, como no tamanho e peso, qualidade fisiológica e sanitária, e composição química (Guerra et al., 2006; Marin, 2012).

Trigo et al. (1997) constataram que o aumento da concentração de fósforo na semente de soja (de 0,58% para 1,10%) propiciou aumento de rendimento de aproximadamente 37%, em solo com adubação de fósforo e, de 20%, em solo sem adubação de fósforo. Soares et al. (2014) observaram que as sementes de soja com maiores níveis de fósforo endógeno apresentaram maior porcentagem de germinação, maior vigor, maior teor de proteína e menor teor de óleo nas cultivares Valiosa RR, MSoy 9144RR e MSoy 8527RR.

O silício (Si) também pode promover efeito benéfico sobre a nutrição das plantas. Estudos mostram que a nutrição com o silício alivia muitos estresses abióticos, incluindo estresses físicos como o estresse hídrico, radiação ultravioleta, altas temperaturas, inundação, congelamento e estresses químicos, como salinidade, toxicidade a metais e desequilíbrio de nutrientes (Epstein, 1994; Ma e Yamaji, 2006). O silício é provavelmente o único elemento conhecido que é capaz de aumentar a resistência a múltiplos estresses (Ma, 2004). A aplicação de Si pode aumentar a tolerância das plantas ao estresse hídrico (Gunes et al., 2008; Mauad et al., 2016), principalmente por meio do aumento da eficiência do sistema de defesa antioxidativo (Gunes et al., 2008; Ma et al, 2004), que constitui um dos mecanismos de defesa das células contra o estresse oxidativo desencadeado pelo estresse hídrico. Kaya et al. (2006) constataram que o uso de Si melhora o crescimento e o rendimento do milho sob condições de estresse hídrico.

O estresse hídrico é cada vez mais preocupante devido ao seu impacto negativo na produção de culturas. O efeito positivo da utilização do Si na biomassa e no rendimento das plantas sob irrigação deficitária tem sido observada em várias culturas (Pei et al., 2010; Shen et al., 2010). Esses efeitos benéficos são atribuídos à alta acumulação de sílica nos tecidos da planta (Feng, 2004). Alguns estudos comprovam, ainda, os benefícios da aplicação de Si na qualidade fisiológica de sementes de soja (Oliveira et al., 2015; Harter e Barros, 2011), com aumento de germinação e vigor.

Oliveira e colaboradores (2015) concluíram que a aplicação de silício via solo é benéfica para a cultura da soja, melhora as características agronômicas e aumenta a massa de sementes, bem como o vigor. Harter e Barros (2011) verificaram efeito positivo utilizando duas doses de silício, 40 e 50 Kg ha⁻¹ de dióxido de silício, aumentando os valores de germinação, primeira contagem de germinação; e diminuindo os valores do teste de condutividade elétrica. No entanto, não existem dados na literatura sobre o efeito do Si na atividade de enzimas do sistema de defesa antioxidativo em sementes de soja e seu efeito na tolerância das sementes ao estresse hídrico na fase de germinação.

Dessa forma, torna-se de essencial importância o estudo dos efeitos de diferentes doses de P e da aplicação de Si visando à produção de semente de soja com maior qualidade fisiológica e, ainda, com maior tolerância à estresses abióticos, o que é fundamental para o agricultor, já que as sementes são o principal insumo para a implantação das lavouras e a tolerância aos estresses nessa fase pode contribuir para a formação mais rápida e uniforme do estande de plantas, mesmo sob condição de estresse hídrico.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito do P e Si na qualidade fisiológica das sementes e na tolerância ao estresse hídrico durante a germinação e o crescimento inicial das plântulas de soja.

1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONAB – **Acompanhamento da Safra Bras. Grãos 2013/2014**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>. Acesso em: 10 Abr. 2014.

CONAB – **Acompanhamento da Safra Bras. Grãos**, Brasília, v. 5, p. 1-114, out. 2017, ISSN 2318-6852.

CORRÊA, J.C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C.A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 12, p. 1231-1237, 2004.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 91, p. 11-17, 1994.

FENG, M.J. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 50, n. 1, p. 11-18, 2004.

FRANÇA-NETO, J.B.; KRZYZANOWSKI, F.C.; HENNING, A.A.; PÁDUA, G.P.; LORINI, I.; HENNING, F.A. **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade**. Embrapa Soja, Londrina, PR, 2016.

GUERRA, C.A.; MARCHETTI, M.E.; ROBAINA, A.D.; SOUZA, C.F.; GONÇALVES, M.C.; NOVELINO, J.O. Qualidade fisiológica de sementes de soja em função da adubação com fósforo, molibdênio e cobalto. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 91-97, 2006.

GUNES, A.; PILBEAM, D.J.; INAL, A.; COBAN, S. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, in growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, n. 13-14, p. 1885-1903, 2008.

HARTER, F.S.; BARROS, A.C.S.A. Cálcio e silício na produção e qualidade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 1, p. 054-060, 2011.

KAYA, C.; TUNA, L.; HIGGS, D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. **J. Plant Nutr**, v. 29, p. 1469-1480, 2006.

MA, J.F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Sci. Plant. Nutr.**, v. 50, p. 11-18, 2004.

MA, J.F.; MITANI, N.; NAGAO, S.; KONISHI, S.; TAMAI, K.; IWASHITA, T.; YANO, M. Characterization of the silicon uptake system and molecular mapping of the silicon transporter gene in rice. **Plant Physiology**, v. 136, p. 3284-3289, 2004.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, p. 342-397, 2006.

MARCOS FILHO, J.; KIKUTI, A.L.P. Vigor de sementes de rabanete e desempenho de plantas em campo. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 28, n. 3, p. 44-51, 2006.

MARCOS-FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Londrina: ABRATES, 2015. 659 p.

MARIN, R.S.F. **Fósforo na qualidade de sementes de soja e consequente desempenho na produção de grãos**. 2012. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, UFPEL, Pelotas, PR, 2012.

MAUAD, M.; CRUSCIOL, C.A.C.; NASCENTE, A.S.; GRASSI FILHO, H.; LIMA, G.P.P. Effects of silicon and drought stress on biochemical characteristics of leaves of upland rice cultivars. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 47, n. 3, p. 532-539, 2016.

OLIVEIRA, S.; LEMES, E.S.; MENEGHELLO, G.E.; TAVARES, L.C.; BARROS, A.C.S.A. Aplicação de silício via solo no rendimento e na qualidade fisiológica de sementes de soja. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 36, n. 5, p. 3029-3042, 2015.

PASSIOURA, J. The drought environment: physical, biological and agricultural perspectives. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 58, n. 2, p. 113-117, 2007.

PEI, Z.F.; MING, D.F.; LIU, D.; WAN, G.L.; GENG, X.X.; GONG, H.J.; ZHOU, W.J. Silicon improves the tolerance of water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 29, p. 106-115, 2010.

PESKE, F.B.; BAUDET, L.; PESKE, S.T. Produtividade de plantas de soja provenientes de sementes tratadas com fósforo. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 1, 2009.

SHEN, X.; ZHOU, Y.; DUAN, L.; ENEJI, A.E.; LI, J. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, p. 1248-1252, 2010.

SILVA, F.A.; SEDIYAMA, T.; BORÉM, A. Exigências Edafoclimáticas. In: **Soja do plantio a colheita**. SEDIYAMA, T.; SILVA, F.L.; BORÉM, A. Ed UFV, Viçosa-MG, p. 54-65, 2015.

SOARES, M.M. **Nodulação, nutrição, componentes de rendimento e qualidade de sementes de soja em função do recobrimento de sementes e parcelamento da adubação fosfatada**. 2013. 98 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SOARES, M.M.; SILVA, L.J.; OLIVEIRA, G.L.; SEKITA, M.C.; DIAS, D.C.F.S. Endogenous level of phosphorous in soya bean seeds and the relationship with physiological quality, oil and protein content. **Seed Sci. & Technol.**, v. 42, p. 433-443, 2014.

TRIGO, L.F.N.; PESKE, S.T.; GASTAL, M.F.; VAHL, L.C.; TRIGO, M.F.O. Efeito do conteúdo de fósforo na semente de soja sobre o rendimento da planta resultante. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 19, n. 1, p. 111-115, 1997.

WANG, W.; VINOCUR, B.; SHOSEYOV, O.; ALTMAN, A. Role of plant heat-shock proteins and molecular chaperones in the abiotic stress response. **Trends in Plant Science**, v. 9, n. 5, p. 244-252, 2004.

WHITE, P.J.; VENEKLAAS, E.J. Nature and nurture: the importance of seed phosphorus content. **Plant and Soil**, v. 357, n. 1-2, p. 1-8, 2012.

YANG, P.H.; LI, G.Q.; GUO, L.; WU, S.J. Effect of drought stress on plasma membrane permeability of soybean varieties during flowering-podding stage. **Agricultural Research in the Arid Areas**, v. 21, n. 3, p. 127-130, 2003.

3. Capítulo I. QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE SOJA PROVENIENTES DE PLANTAS ADUBADAS COM DIFERENTES DOSES DE FÓSFORO E DA APLICAÇÃO DE SILÍCIO ÀS PLANTAS

RESUMO - O sucesso da lavoura de soja depende essencialmente da utilização de sementes de elevada qualidade fisiológica, ou seja, elevada porcentagem de germinação e alto vigor. Um dos principais fatores responsáveis pela produção de sementes com elevada qualidade é a nutrição adequada das plantas. Dentre os nutrientes que apresentam efeito benéfico para a produção e qualidade das sementes destacam-se o fósforo (P) e o silício (Si). Assim, objetivou-se avaliar a qualidade fisiológica de sementes de soja em função de diferentes doses de fósforo aplicadas ao substrato de plantio e da aplicação do silício às plantas. O experimento foi conduzido em casa de vegetação e no Laboratório de Análise de Sementes, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa. Foram utilizadas duas cultivares de soja: TMG 132RR e Anta 82. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 3x2, ou seja, três níveis de fósforo (baixo nível, nível recomendado e alto nível) e dois níveis de silício (aplicação ou não de silício). Os dados obtidos para as cultivares foram analisados separadamente. Como fonte de silício foi utilizado o silicato de potássio na quantidade de 0,142 g do produto/vaso, aplicados semanalmente, durante cinco semanas a partir do estágio R2 (floração plena). As variáveis analisadas foram: germinação; primeira contagem da germinação; envelhecimento acelerado; condutividade elétrica; emergência de plântulas; matéria seca da raiz; matéria seca da parte aérea; matéria seca total e relação parte aérea raiz. O fósforo e o silício não afetaram a germinação das sementes, porém houve incremento do vigor quando foram aplicadas as maiores doses de fósforo. Com a aplicação de silício, não foi observada diferença no vigor das sementes entre diferentes doses de fósforo. O aumento da disponibilidade de P para as plantas contribuiu para o aumento do vigor das sementes produzidas e o silício contribuiu para o aumento do vigor das sementes quando há baixa disponibilidade de fósforo.

4. CHAPTER I – PHYSIOLOGICAL QUALITY OF SOYBEAN SEEDS FROM PLANTS FERTILIZED WITH DIFFERENT LEVELS OF PHOSPHORUS AND THE APPLICATION OF SILICON TO PLANTS

ABSTRACT - The success of soybean cultivation depends essentially on the use of seeds with high physiological quality, that is, high percentage of germination and vigor. One of the main factors responsible to produce seeds with high quality is the adequate plant nutrition. Among the nutrients that have a beneficial effect on seed production are phosphorus (P) and silicon (Si). The objective of this study was to evaluate the physiological quality of soybean seeds as a function of different doses of phosphorus applied to the planting substrate and the application of silicon to the plants. The experiment was conducted in greenhouse and in the Laboratory of Seed Analysis, belonging to the Department of Plant Science of the Federal University of Viçosa. Two soybean cultivars were used: TMG 132RR and Anta 82. The experimental design was completely randomized, with four repetitions. The treatments were arranged in a 3x2 factorial scheme, that is, three levels of phosphorus (low level, recommended level and high level) and two levels of silicon (application or no silicon to the soil) with four replications. The data obtained for the cultivars were analyzed separately. As the silicon source, potassium silicate in the amount of 0.142 g of the product / pot, applied weekly, was used for five weeks from stage R2 (full flowering). The seeds were submitted to the following tests: germination; first germination count; accelerated aging; electric conductivity; emergence of seedlings; root dry matter; dry matter of the aerial part; total dry matter and root shoot ratio. Phosphorus and silicon doses did not affect seed germination, but seed vigor increased when the highest level of phosphorus was applied, in the absence of silicon. When applied silicon, there was no difference in seed vigor at different doses of phosphorus. The increase in the availability of P to the plants contributed to increase the vigor of the seeds produced and the silicon contributes to the increase of the vigor of the seeds when there is low availability of phosphorus.

5. INTRODUÇÃO

A qualidade fisiológica das sementes compreende o potencial de germinação e o vigor. O vigor das sementes é a soma dos atributos que conferem à semente o potencial para germinar, emergir e resultar rapidamente em plântulas normais sob ampla diversidade de condições ambientais (Höfs et al., 2004).

A semente de alta qualidade é o ponto de partida para se obter estande de plântulas uniforme, lavoura adequada e, conseqüentemente, alta produtividade. O principal insumo a ser utilizado para implantação da lavoura são as sementes, que devem possuir alta qualidade, pois segundo Kolchinski et al. (2005; 2006) sementes de soja com alta qualidade fisiológica irão proporcionar plantas com maiores taxas de crescimento e eficiência metabólica, maior área foliar, produção de matéria seca e maiores rendimentos, aumentando assim as chances de sucesso da lavoura.

Kolchinski et al. (2005) observaram que o uso de sementes de soja de alto vigor proporcionou acréscimos superiores a 35% no rendimento de grãos, em relação ao uso de sementes de baixo vigor, e que o aumento na proporção das plantas provenientes das sementes de alto vigor na comunidade também proporcionou acréscimo linear no rendimento de grãos.

Dentre os fatores que afetam a qualidade das sementes, tem-se o *status* nutricional da planta, cuja exigência nutricional é mais intensa no início dos estádios reprodutivos, podendo ser considerada mais crítica quando boa parte dos nutrientes é translocada para a formação das sementes (Sfredo, 2008). Assim, o fornecimento adequado de nutrientes às plantas é fundamental para a produção de sementes de elevada qualidade fisiológica e, assim, gerar plantas vigorosas e mais produtivas.

Em solos com baixa disponibilidade de nutrientes minerais, a importância do conteúdo destes nas sementes pode ser relevante para o estabelecimento inicial da planta, principalmente no caso do fósforo, em que grande parte dos solos brasileiros é deficiente (Soares, 2013).

O fósforo (P) é um nutriente de fundamental importância para a cultura da soja, haja vista o fato de que ele participa de vários processos metabólicos. Esse nutriente é extremamente relevante para a produtividade das culturas em decorrência de sua participação nas membranas celulares, nos ácidos nucleicos e como constituinte de compostos armazenadores de energia como o ATP (trifosfato

de adenosina), que participa da germinação e fotossíntese (Guerra et al., 2006). Conforme os mesmos autores, condições de baixa disponibilidade deste nutriente no solo leva a redução no porte da planta e na altura de inserção das primeiras vagens, menor produção e abortamento de flores e maior aborto dessas estruturas, contribuindo para uma baixa produtividade da cultura.

O fósforo é um dos principais minerais envolvidos no processo de germinação, sendo que os teores presentes na semente são a única fonte deste elemento para o desenvolvimento inicial da plântula e o incremento da concentração do mineral na semente via endógena e/ou exógena proporciona um melhor estabelecimento da planta no solo (Trigo et al., 1997; Soares, 2013). A importância do fósforo no suprimento de energia ao metabolismo intenso, que se caracteriza nos processos de formação e de germinação da semente é, desde há muito tempo, reconhecida (Ching, 1972). Assim, há indícios de que a qualidade fisiológica de sementes é maior com o aumento da dose de P endógena, com maior disponibilidade de energia no processo de germinação e crescimento das plântulas (Soares et al. 2014), porém a viabilidade das sementes não é afetada.

O silício (Si) é um dos minerais utilizados no manejo nutricional das culturas que, apesar de não ser considerado essencial para as plantas, porém agronomicamente benéfico, tem aumentado a resistência física de várias espécies (Datnoff et al., 2007).

O Si está relacionado também à qualidade fisiológica das sementes. Segundo Oliveira et al. (2013), a qualidade fisiológica das sementes de soja da cultivar BMX Turbo RR foi influenciada de forma positiva com o aumento das doses de silício quando tratadas via semente. Os resultados demonstraram também que a aplicação de doses de silício via solo aumentou a produtividade, quando comparado com o tratamento de sementes.

Tavares et al. (2011), ao testar o recobrimento de sementes de trigo com cinco doses distintas de um produto comercial como fonte de silício (26% Si) não observaram diferenças significativas quanto a porcentagem total de sementes germinadas e quanto velocidade de germinação.

Coelho (2016), trabalhando com doses de silício na qualidade fisiológica de sementes de soja, verificou que não houve diferença significativa entre as doses de Si quanto a qualidade das sementes, e que a cultivar NA7490 RR produziu

sementes com melhor qualidade fisiológica independente da aplicação de silício. Tunes et al. (2014) concluíram que doses crescentes de casca de arroz carbonizada no solo e o recobrimento das sementes com silicato de alumínio até $120 \text{ g } 100 \text{ kg}^{-1}$ de sementes incrementaram o vigor de sementes de arroz, avaliados pelo comprimento de raiz e pela emergência a campo.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi avaliar a qualidade fisiológica de sementes de soja provenientes de plantas adubadas com diferentes doses de fósforo e da aplicação do silício às plantas.

6. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação e no Laboratório de Análise de Sementes, pertencentes ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Foram utilizadas sementes de soja das cultivares TMG 132RR, maturação relativa 8.5, e Anta 82, maturação relativa 7.4, adquiridas de empresa produtora de sementes.

As sementes foram tratadas com fungicida Derosal Plus (carbendazin + thiram) na dose de 200 mL 100 kg⁻¹ de sementes. A semeadura foi realizada em outubro de 2016, sendo semeadas quatro sementes por vaso, para cada tratamento, na profundidade de três centímetros. Em seguida, foi aplicado sobre a semente, na cova de plantio, o inoculante na dose de 3,0 milhões de células da bactéria *Bradyrhizobium japonicum* por semente. Uma vez emergidas, foram mantidas apenas as duas plântulas mais vigorosas que foram conduzidas até o final do ciclo.

As plantas foram cultivadas em vasos plásticos contendo 3,0 dm³ de substrato, sendo este composto pela mistura de três partes de solo, uma parte de areia e uma parte de esterco, os quais foram adubados com diferentes doses de P (adubação localizada), na ausência e presença de uma dose de silício aplicado via solo.

Trinta dias antes da semeadura nos vasos foi realizada a análise química do solo (Tabela 1).

Tabela 1. Características químicas do solo utilizado no experimento antes da adubação. pH em água, KCL e CaCl₂ – Relação 1:2,5. P – K – Extrator Mehlich 1. Ca – Mg – Al – Extrator: KCl – 1 mol L⁻¹. H + Al – Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹ – pH 7,0. t – Capacidade de Troca Catiônica Efetiva. T – Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0. V - Índice de Saturação por Bases. m – Índice de Saturação por Alumínio. P-rem – Fósforo Remanescente

Análise Química											
pH	P	K	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H + Al	t	T	V	m	P-rem
H ₂ O	mg dm ⁻³		-----cmol _c dm ⁻³ -----						----%----		mg L ⁻¹
5,65	2,0	67	5,85	1,19	0,0	5,2	7,21	12,41	58,1	0,0	29,3

A adubação fosfatada consistiu na utilização de três doses de fósforo (P), calculadas de acordo com a análise de solo, tendo como referência a recomendação segundo Novais et al. (1991). Foram utilizadas as doses: I - baixo nível de fósforo (1/10 da dose recomendada); II – nível recomendado de fósforo (dose recomendada); e III – alto nível de fósforo (5x a dose recomendada); aplicadas na forma de Superfosfato Simples. A adubação com as doses de fósforo foi feita à uma profundidade de cinco centímetros, no momento do plantio.

Metade das plantas de cada cultivar receberam a adubação com uma dose de silício, sendo aplicado ao solo, por meio de fertirrigação, semanalmente, durante cinco semanas, com início das aplicações quando as plantas atingiram o estágio R2 (florescimento pleno). A dose utilizada correspondeu a 121,8 Kg ha⁻¹ de Si, sendo esta adubação parcelada em doses de 0,0473 g dm⁻³ semana⁻¹ do produto Silicato de Potássio PA-125 (25,7% SiO₂ e 12,23% K₂O).

Realizou-se a adubação com potássio (K⁺) de acordo com a recomendação proposta por Novais et al. (1991), em função da análise de solo (Tabela 1). A adubação potássica foi parcelada, sendo aplicada no plantio e no florescimento. No plantio foi utilizado o cloreto de potássio (KCl) na dose de 0,05 g vaso⁻¹ em todos os tratamentos. Para os tratamentos sem aplicação de Si, a fonte K⁺ aplicada em cobertura foi o KCl, na dose de 0,03 g vaso⁻¹ semana⁻¹. Para os tratamentos com aplicação de Si, a fonte de K⁺ foi o Silicato de Potássio, na dose de 0,142 g vaso⁻¹ semana⁻¹. Ambos, KCl e o Silicato de Potássio, foram aplicados conforme descrito para a aplicação de Si.

Foram utilizados 332 vasos, sendo estes distribuídos ao acaso nas bancadas. Cada bancada foi constituída por seis tratamentos e cinco repetições (vasos) por tratamento.

Os tratamentos testados foram os seguintes:

T1 – Baixo nível de P, mais aplicação de Si

T2 – Baixo nível de P, sem aplicação de Si

T3 – Nível recomendado de P, com aplicação de Si

T4 – Nível recomendado de P, sem aplicação de Si

T5 – Alto nível de P, com aplicação de Si

T6 – Alto nível de P, sem aplicação de Si

A irrigação foi realizada duas vezes ao dia, sendo a água disponibilizada sempre que necessário.

No estádio R8 (maturação plena), as sementes foram colhidas, separadas por cultivar e colocadas em sacos de papel de acordo com os tratamentos e, em seguida, levadas ao laboratório onde foram secas em temperatura ambiente até que atingissem 12% de umidade. As sementes foram padronizadas por tamanho por meio da utilização de peneiras. Para a cultivar TMG 132 foram utilizadas as sementes retidas nas peneiras de nº 15, 14 e 13 e, para a cultivar Anta 82 as sementes retidas nas peneiras de nº 16, 15 e 14.

O armazenamento pós-colheita das sementes foi feito em câmara fria, pertencente ao Departamento de Fitotecnia, até o início das avaliações.

Em seguida, as sementes foram submetidas aos seguintes testes e determinação:

Grau de umidade

Para determinação da umidade foi utilizado o método da estufa, a 105 ± 3 °C, por 24 horas, utilizando-se quatro repetições de aproximadamente 10 gramas de sementes de cada lote (Brasil, 2009). Os resultados foram expressos em percentagem (base úmida).

6.1. Germinação

Para o teste de germinação foram utilizadas quatro repetições de 50 sementes cada. As sementes foram semeadas em papel *germitest* umedecido com um volume de água equivalente a 2,5 vezes o peso do substrato seco. Após a semeadura foram confeccionados rolos que foram mantidos em germinador a 25°C. As avaliações foram realizadas no 5º e 8º dias após a semeadura, com o registro da percentagem de plântulas normais (Brasil, 2009).

6.2. Primeira contagem da germinação

O teste de primeira contagem da germinação foi conduzido juntamente ao teste de germinação. O resultado consistiu na porcentagem de plântulas normais obtidas aos cinco dias após a semeadura.

6.3. Envelhecimento Acelerado

Para o teste de envelhecimento acelerado, foram utilizadas quatro repetições de 50 sementes cada, que foram distribuídas em camada única sobre bandeja de tela metálica acoplada à caixa tipo *gerbox*. Cada caixa continha ao fundo 40 mL de água destilada. As caixas foram tampadas, para se obter 100% de UR em seu interior, e mantidas em BOD a 42°C por 48 horas. Após esse período, as sementes foram submetidas ao teste de germinação. O resultado consistiu na porcentagem de plântulas normais obtidas aos cinco dias após a semeadura.

6.4. Condutividade elétrica

Quatro repetições de 50 sementes foram pesadas e colocadas em copos plásticos contendo 75 mL de água destilada (ISTA, 1995). Em seguida, o conjunto foi mantido em BOD a 25°C, durante 24 horas. Após esse período, foi determinado a condutividade elétrica da solução. Os resultados foram expressos em $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$ de sementes.

6.5. Emergência de plântulas

Quatro repetições de 50 sementes foram semeadas em substrato composto por solo e areia, na proporção de 2:1, em bandejas de poliestireno com capacidade para 1,5 litro, em sala de crescimento de plântulas (24 °C e 8 h de luz) pertencente ao Laboratório de Análises de Sementes. O substrato foi inicialmente umedecido até atingir 60% da capacidade de retenção de água e irrigado diariamente. Foram feitas avaliações diárias do número de plântulas emergidas até os 12 dias após a semeadura, ou seja, tempo suficiente para a estabilização da contagem. Nas

contagens, foram consideradas emergidas as plântulas que apresentaram os cotilédones acima da superfície do substrato. O resultado consistiu na porcentagem de plântulas emergidas aos 12 dias após a semeadura e no índice de velocidade de emergência (Maguire, 1962).

6.6. Índice de Velocidade de Emergência (IVE)

O índice de velocidade de emergência (IVE) foi calculado utilizando-se os dados de contagens diárias, empregando-se a fórmula proposta por Maguire (1962):

$$\text{IVE} = \frac{E_1}{N_1} + \frac{E_2}{N_2} + \dots + \frac{E_n}{N_n}$$

Onde:

IVE = Índice de velocidade de emergência (plântulas/dia);

E_1, E_2, E_n = Número de plântulas emergidas computadas na primeira contagem, na segunda contagem e na última contagem, respectivamente.

N_1, N_2, N_n = Número de dias da semeadura a primeira contagem, segunda contagem e última contagem, respectivamente.

6.7. Velocidade de Emergência (VE)

A velocidade de emergência (VE) foi calculada utilizando-se os dados de contagens diárias, empregando-se a fórmula proposta por Edmond e Drapala (1958):

$$\text{VE} = \frac{(N_1E_1) + (N_2E_2) + \dots + (N_nE_n)}{E_1 + E_2 + \dots + E_n}$$

Onde:

VE = Velocidade de emergência (dias);

E_1, E_2, E_n = Número de plântulas normais computadas na primeira contagem, na segunda contagem e na última contagem, respectivamente.

N_1 , N_2 , N_n = Número de dias da sementeira à primeira contagem, à segunda contagem e à última contagem, respectivamente.

6.8. Crescimento de plântulas

Aos 12 dias após a sementeira no teste de emergência, as plântulas obtidas foram removidas do substrato e lavadas em água corrente. Para determinação da massa seca do hipocótilo e da radícula, as plântulas foram mantidas em estufa de circulação de ar forçada, regulada a 70°C, onde permaneceram até que atingissem peso constante. Em seguida, foram pesadas em balança analítica com precisão de 0,001g. Os dados de massa seca foram expressos em mg plântula⁻¹.

7. ANÁLISE ESTATÍSTICA

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3x2, ou seja, três níveis de fósforo (baixo nível, nível recomendado e alto nível) e dois níveis de silício (aplicação ou não de silício ao solo), com quatro repetições. Os dados obtidos para as cultivares foram analisados separadamente, sendo submetidos à análise de variância. As médias obtidas para as doses de Si foram comparadas pelo teste F ($P < 0,05$); as médias obtidas para os níveis de P foram comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não houve diferença significativa entre os dados de germinação, comparando-se as diferentes doses de P e a aplicação ou não de Si (Figura 1A). Segundo Batistella Filho et al. (2013), a adubação fosfatada não afetou o potencial de germinação das sementes de soja produzidas, mesmo em solo com disponibilidade muito baixa de fósforo. Assim, apesar de haver indícios de que a qualidade fisiológica das sementes é maior com o aumento da dose de P aplicada às sementes, com maior disponibilidade de energia no processo de germinação e crescimento das plântulas (Soares et al. 2014), a viabilidade das mesmas não foi afetada.

Foi observada redução nos valores obtidos para a primeira contagem de germinação (PCG) em baixo nível de P, tanto para o tratamento com aplicação de Si, quanto para o sem aplicação de Si para a cultivar TMG 132 (Figura 1B). Os maiores valores foram obtidos para o nível recomendado de P e alto nível de P, com e sem a aplicação de silício. O vigor das sementes, avaliados pela primeira contagem de germinação aumentou com o aumento nos níveis de fósforo para a cultivar TMG 132. Em estudo realizado por Vieira et al. (1987), foi observado aumento do vigor das sementes com o aumento da dose de P fornecida para as plantas, até a dose de 240 kg/ha de P_2O_5 . Soares (2009) encontrou maior porcentagem da primeira contagem com a utilização de sementes com maior teor endógeno de fósforo.

Em relação a cultivar Anta 82, não houve diferença na primeira contagem de germinação entre os níveis de fósforo, quando foi aplicado o silício. Observa-se que para esta cultivar, a aplicação do silício foi benéfica, principalmente, quando foi aplicado baixo nível de P. Para o tratamento sem aplicação de Si, a porcentagem de plântulas normais no quinto dia foi maior (91%) no alto nível de P, quando comparada com baixo nível de P (80%). Não foi observado efeito significativo da aplicação de silício dentro de cada nível de fósforo para ambas as cultivares (Figura 1B).

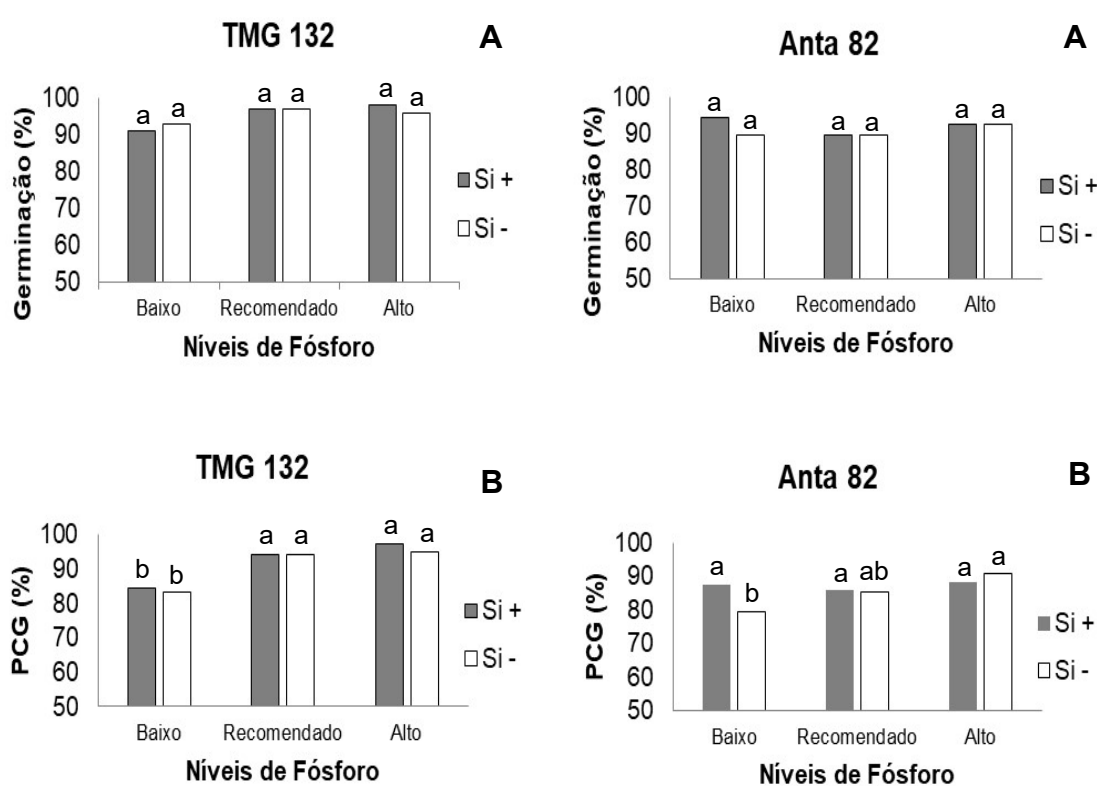
Uma possível explicação para essa diferença entre as cultivares pode ser em razão da variabilidade genética. Soares (2013) verificou diferentes respostas à adubação com P, na avaliação da primeira contagem do teste de germinação, nas cultivares Valiosa RR, Msoy 9144RR e Msoy 8527RR, em diferentes classes de

fósforo endógeno. A maior velocidade de germinação foi observada nas sementes com maior teor endógeno de fósforo para as três cultivares.

Figura 1 - Germinação e primeira contagem do teste de germinação (PCG) de sementes de duas cultivares de soja provenientes de plantas adubadas com diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício.

Letras minúsculas comparam as médias obtidas para os níveis de fósforo (barras de mesma cor). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

* Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo pelo teste F ($p < 0,05$).



Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

Pelo teste de envelhecimento acelerado (E.A.), verifica-se que não houve diferença nos níveis de fósforo quando foi aplicado o silício em ambas as cultivares (Figura 2A). Nos tratamentos em que não foi aplicado o silício, o maior vigor foi obtido no alto nível de P (77%) quando comparado com baixo nível de P (67%), para a cultivar TMG 132; e, em alto nível de P (49%), quando comparado com o nível

recomendado de P (41%), para a cultivar Anta 82. Não foi observado efeito significativo da aplicação de silício dentro de cada nível de fósforo para ambas as cultivares (Figura 2A). Apesar de não ter sido comparados estatisticamente, os valores obtidos no teste de E.A. para a cultivar TMG 132 foram maiores que os obtidos para a cultivar Anta 82, o que indica maior vigor das sementes da cultivar TMG 132.

Lotes de sementes que apresentam maior germinação após o teste de envelhecimento acelerado, em geral, apresentam maior tolerância à deterioração. Um dos efeitos do Si na planta é o aumento da atividade de enzimas do sistema de defesa antioxidativo e, portanto, era esperado que a aplicação do Si aumentasse a tolerância das sementes a esse estresse. A aplicação do Si à planta não foi eficiente em aumentar a tolerância das sementes à deterioração. Na literatura são encontrados trabalhos que mostram o efeito benéfico do Si para as plantas, com aumento da tolerância a condições de estresse (Ma et al., 2001). Porém, esse efeito pode não ser observado nas sementes produzidas por essas plantas (Oliveira et al., 2015), possivelmente porque, como o Si não se move na planta (Ma e Yamaji, 2006), pode não ser translocado para as sementes.

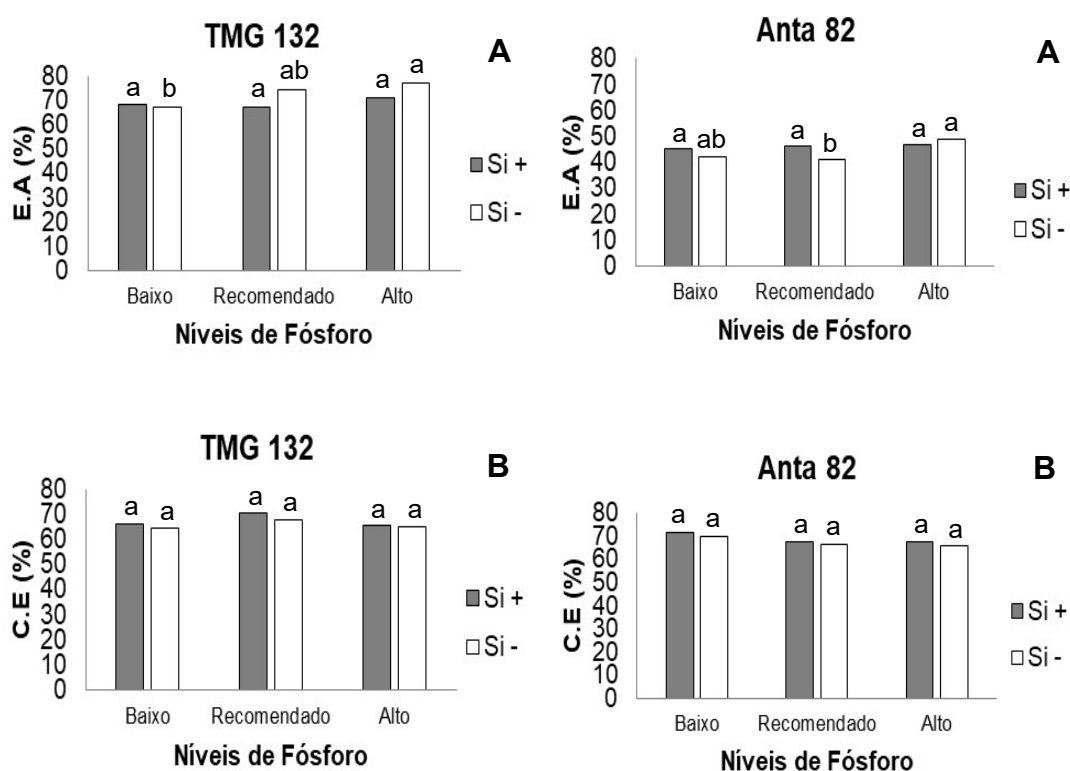
No teste de condutividade elétrica (C.E.), para ambas as cultivares, não houve diferença significativa entre os tratamentos, comparando-se os níveis de fósforo, com e sem a aplicação de silício (Figura 2B). Também não foi observado efeito da aplicação de silício dentro de cada nível de fósforo para ambas as cultivares.

O resultado do teste de C.E. está relacionado com a deterioração/organização de membranas (Marcos-Filho, 2015). Em soja, valores de condutividade elétrica até 80-90 $\mu\text{s}/\text{cm}/\text{g}$ indicam lotes de sementes com elevada qualidade fisiológica (Vieira e Krzyzanowski, 1999). Assim, os valores de C.E. obtidos neste experimento indicam que as sementes apresentavam elevado vigor, ou que não passaram pelo processo de deterioração. Conforme descrito anteriormente, as sementes foram produzidas em ambiente protegido, colhidas no momento adequado, estágio R8, e de forma manual, o que não causou danos às mesmas.

Figura 2 - Envelhecimento acelerado (E.A) e condutividade elétrica (C.E) de sementes de duas cultivares de soja provenientes de plantas adubadas com diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício.

Letras minúsculas comparam as médias obtidas para os níveis de fósforo (barras de mesma cor). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

*
— Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo pelo teste F ($p < 0,05$).



Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

A porcentagem de emergência de plântulas aumentou com o aumento dos níveis de fósforo, quando foi aplicado o silício, para a cultivar TMG 132 (Figura 3A). Não foi observada diferença entre os valores obtidos no nível recomendado de P (97%) e em alto nível de P (100%). Ainda para esta cultivar, não houve diferença na emergência de plântulas entre os níveis de fósforo no tratamento sem aplicação de silício. Observa-se maior porcentagem de emergência de plântula para o tratamento sem aplicação de Si, comparada à aplicação de Si, quando foi aplicado baixo nível de P.

Em relação a cultivar Anta 82, não foi observada diferença entre os níveis de fósforo, independentemente da aplicação ou não de silício (Figura 3A). No maior nível de P, nota-se diferença significativa entre a aplicação e a não aplicação de silício, sendo que a emergência foi maior no tratamento sem a aplicação de silício.

Na avaliação do índice de velocidade de emergência (IVE), para a cultivar TMG 132, as plântulas apresentaram maior índice de velocidade de emergência no tratamento com alto nível de P, independentemente da aplicação de Si (Figura 3B). Observa-se diferença significativa entre a aplicação e não aplicação de silício em baixo nível de P, sendo que o índice de velocidade de emergência foi maior no tratamento sem a aplicação de silício. Para a cultivar Anta 82, não houve diferença entre os tratamentos quanto ao IVE (Figura 3B).

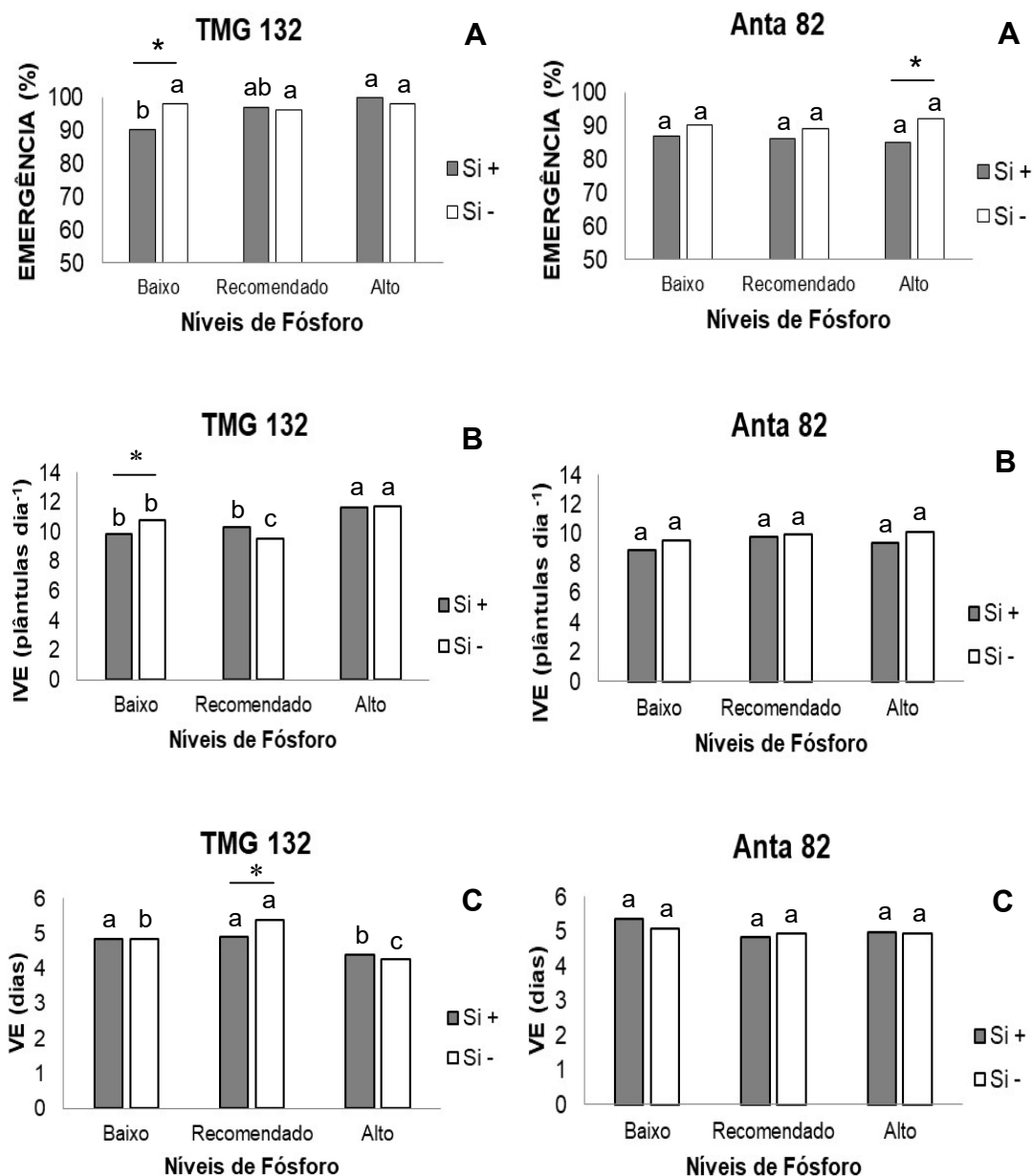
A velocidade de emergência das plântulas (VE) foi maior em alto nível de P, tanto para os tratamentos com aplicação de silício (4,4 dias), quanto para os tratamentos sem aplicação de silício (4,2 dias), para a cultivar TMG 132 (Figura 3C). Observa-se diferença significativa entre a aplicação e não aplicação de silício no nível recomendado de P, sendo que a velocidade de emergência das plântulas foi maior no tratamento sem a aplicação de silício. Já para a cultivar Anta 82, não houve diferença significativa entre os tratamentos quanto ao VE (Figura 3C).

De acordo com Guerra et al. (2006), maiores concentrações de P no solo podem proporcionar sementes com maiores teores deste nutriente, o que disponibilizaria maior energia inicial para as atividades metabólicas das plântulas. Assim, maiores teores de P nas sementes podem contribuir para maior porcentagem e velocidade de emergência de plântulas (Soares et al., 2014). No presente trabalho, o tratamento com alto nível de P proporcionou maior velocidade de emergência de plântulas, o que foi mais evidente para a cultivar TMG 132.

Figura 3 - Emergência de plântulas (EMERG), índice de velocidade de emergência (IVE) e velocidade de emergência (VE) de sementes de duas cultivares de soja provenientes de plantas adubadas com diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício.

Letras minúsculas comparam as médias obtidas para os níveis de fósforo (barras de mesma cor). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

*
— Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo pelo teste F ($p < 0,05$).



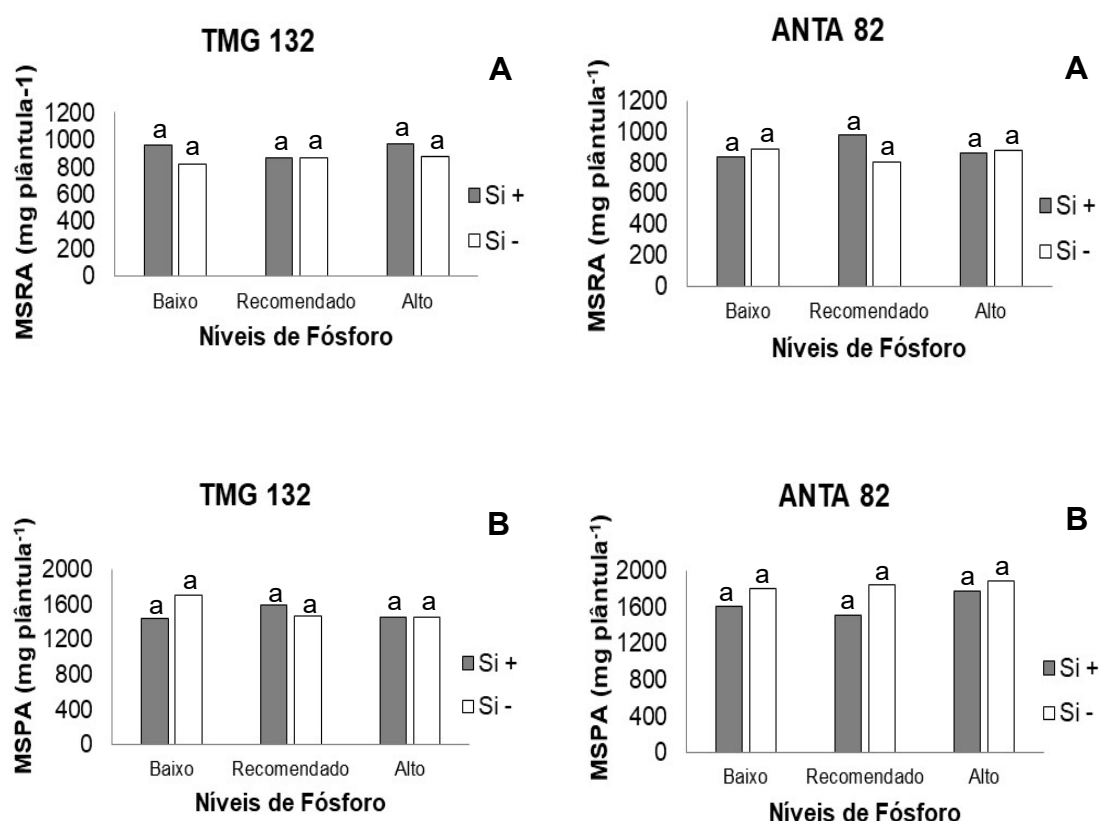
Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

Não foram verificadas diferenças significativas nos dados obtidos para a matéria seca de raiz (MSRA) e matéria seca da parte aérea (MSPA), entre os diferentes níveis de fósforo, com e sem a aplicação de silício, em ambas as cultivares (Figura 4). Não foram observados efeitos significativos da aplicação de silício dentro de cada nível de fósforo para ambas as cultivares nas duas variáveis.

Figura 4 - Matéria seca de raiz (MSRA) e matéria seca da parte aérea (MSPA) de sementes de duas cultivares de soja provenientes de plantas adubadas com diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício.

Letras minúsculas comparam as médias obtidas para os níveis de fósforo (barras de mesma cor). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

*
— Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo pelo teste F ($p < 0,05$).



Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

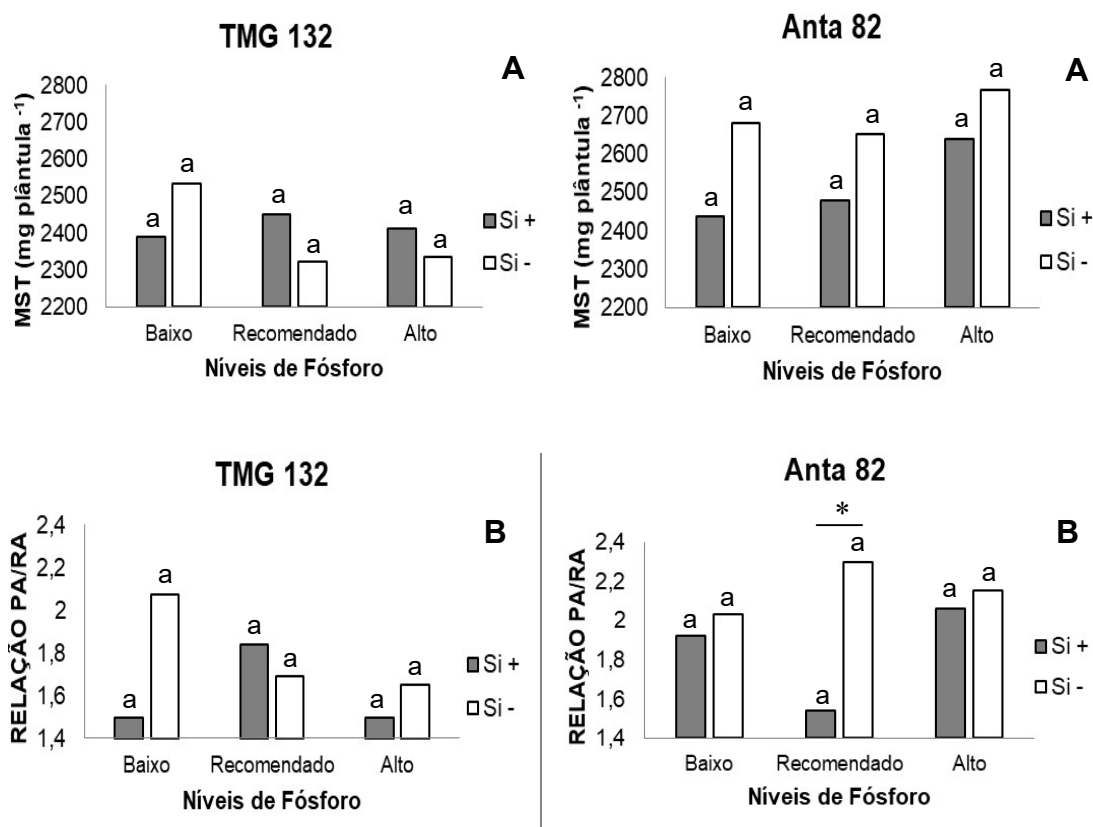
Não foram observadas diferenças entre os diferentes níveis de fósforo, com e sem a aplicação de silício, em ambas as cultivares, para as variáveis matéria seca de plântulas (MSP) (Figura 5A) e da relação matéria seca da parte aérea e da raiz (MSPA/MSR) (Figura 5B). Não foram observados efeitos significativos da aplicação de silício dentro de cada nível de fósforo para ambas as cultivares na variável MST. Porém, para a variável MSPA/MSR, no nível recomendado de P, foi obtido maior valor no tratamento sem a aplicação do silício.

As variáveis analisadas no teste de crescimento de plântulas (Figuras 4A, 4B, 5A, 5B) não apresentaram diferenças entre os tratamentos de níveis de fósforo, com e sem a aplicação de silício, em ambas as cultivares. Porém há indícios que de que a maior disponibilidade de fósforo para as plantas contribua para o maior crescimento das plântulas oriundas das sementes produzidas (Soares et al., 2014). Portanto, de acordo com os dados do presente trabalho, os diferentes níveis de P aplicados ao solo e a aplicação do Si não afetaram o crescimento das plântulas de soja.

Figura 5 - Matéria seca total (MST) e relação parte aérea raiz (RELAÇÃO PA/RA) de sementes de duas cultivares de soja provenientes de plantas adubadas com diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício.

Letras minúsculas comparam as médias obtidas para os níveis de fósforo (barras de mesma cor). Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

* — Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo pelo teste F ($p < 0,05$).



Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

Em geral, os dados obtidos com o presente trabalho mostraram que as doses de fósforo e silício não afetaram a germinação das sementes (Figura 1A). O aumento da dose de fósforo contribuiu para o aumento do vigor das sementes nos testes de primeira contagem de germinação (Figura 1B), para ambas as cultivares; e índice de velocidade de emergência e velocidade de emergência (Figuras 3B e 3C), para a cultivar TMG 132.

O silício atua no aumento do vigor das sementes quando as plantas são cultivadas com baixa disponibilidade de fósforo, evidenciado pelo teste de envelhecimento acelerado (Figura 2A), para a cultivar TMG 132; e, primeira contagem de germinação (Figura 1B) e envelhecimento acelerado, para a cultivar Anta 82.

9. CONCLUSÕES

O aumento da disponibilidade de P para as plantas contribui para o aumento do vigor das sementes produzidas, tanto da cultivar TMG 132, quanto da Anta 82.

Em condição de baixa disponibilidade de P, a adubação das plantas com Si contribui para o aumento do vigor das sementes de soja produzidas.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATISTELLA FILHO, F.; FERREIRA, M.E.; VIEIRA, R.D.; DA CRUZ, M.C.P.; CENTURION, M.A.P.; SYLVESTRE, T.B.; RUIZ, J.G.C.L. Adubação com fósforo e potássio para produção e qualidade de sementes de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p. 783-790, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes / **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399 p.

CHING, T.M. Metabolism of germinating seeds. In Seed Biology, (ed. T.T. Koslowski), **Academic Press**, New York, v. 2, p. 103– 218, 1972.

COELHO, P.H.M. **Doses de silício na produtividade e qualidade fisiológica de sementes de soja**. 2016. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Programa de PósGraduação em Produção Vegetal, Universidade Estadual de Goiás – UEG, Unidade Universitária de Ipameri, 36p, 2016.

DATNOFF, L.E.; RODRIGUES, F.A. SEEBOLD, K.W. Silicon and Plant Nutrition. In: Datnoff L.E.; Elmer W.H.; Huber D.M. (Eds.) **Mineral Nutrition and Plant Disease**, Saint Paul MN, APS Press, p. 233-246, 2007.

EDMOND, J.B.; DRAPALA, W.J. The effects of temperature, sand, soil, and acetone on germination of okra seeds. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v. 71, n. 5, p. 428-434, 1958.

GUERRA, C.A.; MARCHETTI, M.E.; ROBAINA, A.D.; SOUZA, C.F.; GONÇALVES, M.C.; NOVELINO, J.O. Qualidade fisiológica de sementes de soja em função da adubação com fósforo, molibdênio e cobalto. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 91-97, 2006.

HÖFS, A.; SCHUCH, L.O.B.; PESKE, S.T.; BARROS, A.C.S.A. Emergência e crescimento de plântulas de arroz em resposta à qualidade fisiológica de sementes. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 26, n. 1, p. 92-97, 2004a.

ISTA-INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION. **Handbook of vigor tests methods**. 3.ed. Zürich: ISTA, 1995. 117p.

KOLCHINSKI, E.M.; SCHUCH, L.O.B.; PESKE, S.T. Vigor de sementes e competição intra-específica em soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 6, p. 1248-1256, nov-dez 2005.

KOLCHINSKI, E.M.; SCHUCH, L.O.B.; PESKE, S.T. Crescimento inicial de soja em função do vigor das sementes. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 12, n. 2, p. 163-166, abr-jun, 2006.

MA, J.F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants, In: DATNOFLF, L.E.; SNYDER, G.H. & KORNDÖRFER, G.H. (Eds). Silicon in Agriculture. The Netherland, **Elsevier Science**, p. 17-39, 2001.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, p. 342-397, 2006.

MAGUIRE, J.D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigour. **Crop Science**, v. 2, p. 176-177, 1962.

MARCOS-FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Londrina: ABRATES, 2015. 659 p.

NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Ensaio em ambiente controlado. [Test in a controlled environment]. In Métodos de Pesquisa em Fertilidade do Solo [Research Methods in Soil Fertility], (eds. A.J. Oliveira, W. E.Garrido, J.D. Araújo and S.Lourenço), pp. 189-253, **Embrapa-SEA**, Brasília, 1991.

OLIVEIRA, S.; LEMES, E.S.; TAVARES, L.C.; VILLELA, F.A. Tratamento de Sementes: Ferramenta Promissora e Eficiente para o Agricultor, **Seed News**, Pelotas, ano XVII, n. 2, p. 8-11, Mar-Abr, 2013.

OLIVEIRA, S.; LEMES, E.S.; MENDONÇA, A.O.; DIAS, L.W.; BRUNES, A.P.; LEITZKE, I.D.; MENEGHELLO, G.E. Tratamento de semente de soja com silício: efeitos na qualidade fisiológica e nas características agronômicas. **Revista Cultivando o Saber**, v. 8, n. 2, p. 215-230, 2015.

SFREDO, G.J. Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral. [Soya bean in Brazil: Liming, fertilization and mineral nutrition]. **Embrapa Soja**, Londrina, 2008.

SOARES, M.M. **Efeito do recobrimento de sementes com fósforo na qualidade das sementes, nodulação e crescimento das plantas de soja**. 2009. 61f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

SOARES, M.M. **Nodulação, nutrição, componentes de rendimento e qualidade de sementes de soja em função do recobrimento de sementes e parcelamento da adubação fosfatada**. 2013. 98f. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SOARES, M.M.; SILVA, L.J.; OLIVEIRA, G.L.; SEKITA, M.C.; DIAS, D.C.F.S. Endogenous level of phosphorous in soya bean seeds and the relationship with physiological quality, oil and protein content. **Seed Sci. & Technol.**, v. 42, p. 433-443, 2014.

TAVARES, L.C.; BRAZ, H.S.; TUNES, L.M.; FONSECA, D.A.R.; BARROS, A.C.S.A. **Desempenho de sementes de trigo recobertas com silício**. In: 20º CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, II Amostra científica, Pelotas. Anais, UFPel, p. 12-15, 2011.

TRIGO, L.F.N.; PESKE, S.T.; GASTAL, M.F.; VAHL, L.C.; TRIGO, M.F.O. Efeito do conteúdo de fósforo na semente de soja sobre o rendimento da planta resultante. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 19, n. 1, p. 111-115, 1997.

TUNES, L.V.M.; FONSECA, D.Â.R.; MENEGHELLO, G.E.; DOS REIS, B.B.; BRASIL, V.D.; RUFINO, C.A.; VILELLA, F.A. Qualidade fisiológica, sanitária e enzimática de sementes de arroz irrigado recobertas com silício. **Revista Ceres**, v. 61, n. 5, p. 675-685, 2014.

VIEIRA, R.D.; KRZYZANOWSKI, F.C. Teste de condutividade elétrica. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. cap. 4, p. 1-26.

VIEIRA, R.D.; SEDIYAMA, T.; CARVALHO, N.M.; THIEBAUT, J.T.L.; SILVA, R.F.; SEDIYAMA, C.S. Avaliação do efeito de doses de P e K na qualidade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 1, p. 83-89, 1987.

11. Capítulo II – EFEITO DO FÓSFORO E SILÍCIO FORNECIDOS ÀS PLANTAS NA TOLERÂNCIA DE SEMENTES DE SOJA AO ESTRESSE HÍDRICO

RESUMO - A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é sensível ao déficit hídrico. A deficiência hídrica é o fator limitante de maior significância na germinação, sobrevivência e crescimento inicial das plantas. A nutrição adequada das plantas possibilita a produção de sementes com maior qualidade fisiológica e, conseqüentemente, mais tolerantes aos diversos estresses abióticos. Dentre os nutrientes mais importantes para a qualidade das sementes, destaca-se o fósforo. Ainda, existem evidências de que o silício atua no aumento do poder antioxidativo das células e contribui para aumentar a tolerância das plantas e das sementes aos diferentes estresses. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito de diferentes doses de fósforo no solo e da aplicação de silício às plantas na tolerância ao estresse hídrico e na atividade de enzimas do sistema de defesa antioxidativo durante a germinação das sementes e crescimento inicial das plântulas. Foram utilizadas duas cultivares de soja: TMG 132RR e Anta 82. O delineamento experimental utilizado foi o delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 3x2x4, ou seja, três níveis de fósforo (baixo nível, nível recomendado e alto nível), dois níveis de silício (aplicação ou não de silício ao solo) e quatro potenciais osmóticos (0; -0,2 MPa; -0,4 MPa e -0,6 MPa). Já para avaliação das atividades enzimáticas foram utilizados apenas dois potenciais osmóticos (0,0 e -0,4 MPa). Para a indução dos diferentes potenciais (déficit hídrico), foi utilizado o PEG 6000. As variáveis analisadas foram: germinação; primeira contagem da germinação; crescimento de plântulas (comprimento e massa seca de raiz e parte aérea); e a atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidases (POX) e peroxidase do ascorbato (APX) nas sementes. Os dados obtidos para as cultivares foram analisados separadamente. Foi observada redução da germinação e dos valores obtidos na primeira contagem de germinação, bem como do crescimento das plântulas sob condição de estresse hídrico. O aumento da disponibilidade de fósforo para as plantas contribuiu para o maior crescimento das plântulas sob condições de déficit hídrico. Foi observado aumento nas atividades das enzimas antioxidativas CAT, APX e POX nas sementes submetidas ao estresse hídrico, em ambas as cultivares. Assim, sementes oriundas de plantas cultivadas com maior

disponibilidade de P apresentam maior crescimento das plântulas sob condições de déficit hídrico. O silício atua no aumento do vigor das sementes quando as plantas são cultivadas com baixa disponibilidade de fósforo.

12. Chapter II – EFFECT OF PHOSPHORUS AND SILICON SUPPLIED TO PLANTS IN TOLERANCE OF SOYBEAN SEEDS TO WATER STRESS

ABSTRACT – The soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] is sensitive to water deficit. Water deficiency is the limiting factor of greater significance in germination, survival and initial plant growth. The adequate nutrition of the plants allows the production of seeds with higher physiological quality and, consequently, more tolerant to the various abiotic stresses. Among the most important nutrients for seed quality, phosphorus stands out. Furthermore, there is evidence that silicon acts to increase the antioxidative power of cells and contributes to greater tolerance of plants and seeds to different stresses. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of different doses of phosphorus in the soil and the application of silicon to the plants on tolerance to water stress and enzyme activity of the antioxidative defense system during seed germination and initial growth of soybean seedlings. Two soybean cultivars were used: TMG 132RR and Anta 82. The experimental design was completely randomized, with four replicates. The treatments were arranged in a 3x2x4 factorial scheme, that is, three levels of phosphorus (low level, recommended level and high level), two silicon levels (application or no silicon to the soil) and four osmotic potentials (0, -0.2 MPa, -0.4 MPa and -0.6 MPa). To evaluate the enzymatic activities of the antioxidative defense system, it was used only two osmotic potentials (0.0 and -0.4 MPa). PEG 6000 was used to induce water deficit. The seeds were submitted to the following tests and determinations: germination; first count of germination and seedling growth (root length and dry mass of root and shoot); and the activities of the enzymes of the antioxidative defense system (superoxide dismutase, catalase, peroxidases and ascorbate peroxidase) were determined in seeds. The data obtained for the cultivars were analyzed separately. Reduction in seed germination and in the values obtained for the first count of germination, as well as the growth of the seedlings under water stress conditions were observed. The increase in the availability of phosphorus to the plants contributed to the higher

growth of the seedlings under conditions of water deficit. It was observed an increase in the activities of the CAT, APX and POX antioxidative enzymes in seeds subjected to water stress in both cultivars. Thus, seeds from plant cultivated under higher P availability present higher seedling growth under water deficit conditions. Silicon acts to increase seed vigor when plants are grown with low availability of phosphorus.

13. INTRODUÇÃO

Mudanças climáticas, como o aquecimento global decorrente do aumento de “gases de efeito estufa”, têm exposto algumas regiões a condições cada vez mais secas e quentes. A ocorrência de adversidades climáticas cada vez mais frequentes e intensas tem representado um sério problema à produção agrícola. Segundo McCough (2013), a demanda mundial por alimentos será o dobro da atual até o ano de 2038, e as alterações climáticas tornarão o desafio de produzir alimentos mais difícil. Desta forma, as plantas são constantemente exigidas quanto à capacidade de lidar com alterações ambientais, buscando evitar prejuízos no crescimento e desenvolvimento (Pyl et al., 2012).

Ao longo do período que compreende o processo de germinação à colheita, a cultura da soja está sujeita aos mais variados estresses. Os estresses abióticos impostos pela seca, salinidade e temperaturas extremas representam sérias ameaças ao desenvolvimento e produtividade de diversas plantas cultivadas em todo o mundo (Ahuja et al., 2010).

A deficiência hídrica é um dos fatores mais relevantes a serem considerados, que afetam a germinação e o estabelecimento das plantas em campo. As condições em que as sementes se encontram no solo para a germinação nem sempre são ótimas, como é o caso dos solos com deficit hídrico (Guedes et al., 2013).

Durante a germinação, o déficit hídrico é prejudicial para a obtenção de uniformidade e estande inicial. Para a soja, inclusive, há casos em que é necessária nova semeadura no campo para corrigir problemas de formação de estande de plantas por falta de chuvas no início do ciclo da cultura.

Assim como a germinação, o vigor das sementes também é afetado sob condição de deficit hídrico. Kappes et al. (2010), trabalhando com híbridos de milho sob condições de deficit hídrico, verificaram que houve redução da germinação, do vigor de sementes e do crescimento de plântulas de milho com o estresse.

Um dos períodos mais críticos para a sobrevivência das plantas é durante a germinação até o estabelecimento das plântulas, o que torna importante entender os mecanismos que conferem às sementes a capacidade de germinar sob condições de estresse hídrico.

Uma das respostas das plantas ao déficit hídrico é o estresse oxidativo. Diversos fatores ambientais podem levar ao estresse oxidativo e conseqüentemente, a produção descontrolada de espécies reativas de oxigênio (EROs) que, em níveis elevados, são extremamente tóxicas aos vegetais. Para combater essas EROs, as plantas dispõem de um sistema de defesa composto por antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos, que trabalham em conjunto e em sincronia para controlar os níveis destes compostos produzidos nas células (Rossi, 2012).

Na cultura da soja, o estresse hídrico provoca efeitos negativos na germinação e vigor das sementes e, em condições de estresses ainda mais severos, as sementes de menor vigor são as mais suscetíveis (Braccini et al., 1996).

O status nutricional da planta é um dos principais fatores que afetam a qualidade da semente. O fornecimento adequado de nutrientes às plantas é fundamental para a produção de sementes de elevada qualidade fisiológica.

O fósforo (P) é um nutriente de fundamental importância para a cultura da soja, haja vista o fato de que ele participa de vários processos metabólicos. Firmano et al. (2009) consideraram a hipótese de que suplementações de fósforo poderiam aumentar a tolerância das plantas ao déficit hídrico, mas relataram que houve apenas uma redução parcial dos efeitos danosos do déficit hídrico e que apenas a biomassa do sistema radicular respondeu à aplicação de fósforo.

Segundo dados obtidos por Soares et al. (2014), existe uma clara relação entre o conteúdo de P nas sementes de soja e a sua qualidade fisiológica. Resultados obtidos por esses autores demonstram que o aumento na concentração de P nas sementes resultam em aumento na germinação e no vigor. Porém, ainda não se sabe se o maior vigor das sementes relacionados ao aumento da concentração de P está também relacionado à maior tolerância das sementes a estresses abióticos, como o estresse hídrico.

O Silício (Si) é considerado o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre. Embora não seja reconhecido como elemento essencial, pode ser exigido por algumas plantas (Epstein, 1994; Luyckx et al., 2017). Quando o Si é disponibilizado, este elemento pode estimular o crescimento e a produção vegetal por meio de várias ações indiretas, podendo ainda estar envolvido em atividades metabólicas ou fisiológicas das plantas sob estresse salino e/ou hídrico (Gunes et al., 2008).

A aplicação do Si na agricultura é de grande relevância para as plantas cultivadas em lugares onde o período de estiagem é longo e severo, devido ao acúmulo de silício nos órgãos de transpiração que provoca a formação de uma dupla camada de sílica, a qual, pela redução de transpiração, faz com que a exigência de água pelas plantas seja menor (Raizer Neto, 2007).

Com relação à deficiência hídrica, o efeito benéfico do Si tem sido associado ao aumento da capacidade de defesa antioxidante (Gong et al., 2005; Zhu et al., 2004) e à manutenção da taxa fotossintética, da condutância estomática da planta, mesmo em solo seco (Hattori et al., 2005), devida à redução da transpiração através da cutícula (Ma e Yamaji, 2006).

Zargar e Agnihotri (2013) relataram que a aplicação de silicato de cálcio no solo aumentou a germinação de sementes de milho sob estresse hídrico. Esses estudos revelaram que a aplicação de Si pode aumentar a germinação de sementes de plantas cultivadas, mas ainda há mecanismos para serem explorados para entender melhor o papel do Si em plantas sob estresse hídrico.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de diferentes doses de fósforo no solo, e da aplicação ou não de silício nas plantas, na tolerância ao estresse hídrico durante a germinação das sementes e crescimento inicial das plântulas de soja.

14. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Pesquisa de Sementes, do Departamento de Fitotecnia, e no Laboratório de Análises de Sementes Florestais, do Departamento de Engenharia Florestal, ambos da Universidade Federal de Viçosa.

Foram utilizadas sementes de soja das cultivares TMG 132RR, maturação relativa 8.5, e Anta 82, maturação relativa 7.4, produzidas em vasos em casa de vegetação sob a combinação de três níveis de P, mais a aplicação ou não de uma dose de Si, conforme descrito a seguir:

- T1 – Baixo nível de P, com a dose de Si
- T2 – Baixo nível de P, sem a dose de Si
- T3 – Nível recomendado de P, com a dose de Si
- T4 – Nível recomendado de P, sem a dose de Si
- T5 – Alto nível de P, com a dose de Si
- T6 – Alto nível de P, sem a dose Si

No estágio R8 (maturação plena), as sementes foram colhidas, separadas por cultivar e colocadas em sacos de papel de acordo com os tratamentos e, em seguida, levadas ao laboratório onde foram secas em temperatura ambiente até que atingissem 12% de umidade. As sementes foram padronizadas por tamanho utilizando-se o teste de uniformidade (retenção em peneiras), sendo que para a cultivar TMG 132 foram utilizadas as sementes retidas nas peneiras de nº 15, 14 e 13 e, para a cultivar Anta 82 as sementes retidas nas peneiras de nº 16, 15 e 14. O armazenamento pós-colheita das sementes foi feito em câmara fria, a 10°C e 50% de UR.

Os tratamentos de estresse hídrico foram induzidos por polietileno glicol (PEG 6000). Foram utilizados os potenciais de 0,0; -0,2; -0,4 e -0,6 MPa. O nível zero consistiu no tratamento controle, no qual foi utilizada água destilada. As sementes foram submetidas aos seguintes testes:

14.1. Germinação

Para o teste de germinação foram utilizadas quatro repetições de 50 sementes cada. As sementes foram semeadas em papel *germitest* umedecido com um volume de água, ou solução com diferentes potenciais osmótico (estresse hídrico), equivalente a 2,5 vezes o peso do substrato seco. Após a semeadura foram confeccionados rolos, que foram mantidos em germinador a 25°C. As avaliações foram realizadas no 5º e 8º dias após a semeadura, com o registro da percentagem de plântulas normais (Brasil, 2009).

14.2. Primeira contagem da germinação

O teste de primeira contagem da germinação foi conduzido juntamente ao teste de germinação. O resultado consistiu na percentagem de plântulas normais obtidas aos cinco dias após a semeadura.

14.3. Crescimento de plântulas

Para o teste de crescimento de plântulas foram utilizadas quatro repetições de 10 sementes cada, semeadas nas mesmas condições utilizadas para o teste de germinação. As sementes foram semeadas na parte superior do rolo e mantidas em germinador. As seguintes avaliações foram realizadas no 8º dia após a semeadura:

Comprimento de hipocótilo e radícula: As medições foram realizadas com auxílio de régua graduada em mm. Os resultados foram expressos em cm/plântula.

Massa seca de hipocótilo e radícula: As plântulas foram seccionadas em hipocótilo e radícula e colocadas para secar em estufa com circulação de ar forçada, regulada na temperatura de 70°C, onde permaneceram até que atingissem peso constante. Em seguida, o material foi pesado em balança analítica com precisão de 0,001g. Os resultados foram expressos em mg/plântula.

Determinação da atividade de enzimas do sistema de defesa antioxidativo

Para análise das atividades das enzimas do sistema de defesa antioxidativo foram feitas curvas de embebição. As sementes foram inicialmente pesadas e posteriormente postas para embeber, entre três folhas de papel germitest umedecidas com um volume de água equivalente a 2,5 vezes o peso do substrato seco, de acordo com os tratamentos descritos.

Foram realizadas pesagens a cada duas horas, nas primeiras 12 horas de embebição, e de 12 em 12 horas, nas horas subsequentes, até que 50% das sementes apresentassem a protusão radicular ou até o oitavo dia, data da última contagem da germinação.

O grau de umidade adquirido pelas sementes no decorrer das horas foi calculado com base no peso inicial, conforme a fórmula descrita abaixo:

$U_f = ((P_f \cdot 100) - (P_i \cdot (100 - U_i))) / P_f$, sendo:

U_f = umidade final das sementes (%);

P_f = peso final das sementes (g);

P_i = peso inicial das sementes (g);

U_i = umidade inicial das sementes (%).

Em função do tempo necessário para que as sementes atingissem 50% de umidade, estas foram colocadas para embeber, nas mesmas condições utilizadas para o teste de germinação, por 12 (Anta 82 – Potencial 0), 16 (TMG 132 – Potencial 0) e 45 horas (TMG 132 e Anta 82 – Potencial -0,4 MPa). Após esses períodos, o tegumento das sementes foi removido e o eixo embrionário e os cotilédones foram utilizados para a determinação das atividades das enzimas do sistema de defesa antioxidativo.

Os extratos enzimáticos brutos para as determinações da atividade das enzimas catalase (CAT), peroxidase (POX), peroxidase do ascorbato (APX) e superóxido dismutase (SOD) foram obtidos pela maceração de aproximadamente 0,3 g de embrião em nitrogênio líquido e, então, adicionados 2 mL de meio de homogeneização, seguido de centrifugação a 12.000 xg por 15 min, a 4°C. Os meios

de homogeneização foi composto de Tampão fosfato de potássio 0,1M, pH 6,8, ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) 0,1mM, fluoreto de fenilmetilsulfônico (PMSF) 1 mM e polivinilpirrolidona (PVPP) 1% (p/v) (Peixoto et al., 1999), para as enzimas CAT, POX e SOD e; 2) Tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 7,0, ascorbato 1mM e EDTA1 mM (Nakano e Asada, 1981), para a APX.

Determinação de proteínas

Os teores de proteínas dos extratos enzimáticos foram determinados pelo método de Bradford (1976), utilizando albumina bovina (BSA) como padrão.

14.4. Superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)

Foi determinada a atividade da SOD pela adição de 50 µL do extrato enzimático bruto a 2,95 mL de meio de reação constituído de tampão fosfato de sódio 50 mM, pH 7,8, contendo metionina 13 mM, azul de p-nitro tetrazólio (NBT) 75 µM, EDTA 0,1 mM e riboflavina 2 µM (Del Longo et al., 1993). A reação foi conduzida a 25°C, numa câmara de reação sob iluminação de uma lâmpada fluorescente de 15 W, mantida no interior de uma caixa coberta com papel alumínio. Após 5 min de exposição à luz, a iluminação foi interrompida e a formazana azul, produzida pela fotorredução do NBT, foi determinada pela medição da absorbância a 560 nm. A medição da absorbância, nesse mesmo comprimento de onda, de um meio de reação exatamente igual ao anterior, mas mantido no escuro por igual tempo, serviu de branco e foi subtraída da leitura da amostra que recebeu iluminação (Giannopolitis e Ries, 1977). Uma unidade de SOD foi definida como a quantidade de enzima necessária para inibir em 50% a fotorredução do NBT (Beauchamp e Fridovich, 1971).

14.5. Catalase (CAT, EC 1.11.1.6)

Foi determinada a atividade da catalase pela adição de 50 µL do extrato enzimático bruto a 2,95 mL de meio de reação, constituído de tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 7,0 e H₂O₂ 12,5 mM (Havir e Mchale, 1987). Durante o primeiro minuto de reação, mantida a 25°C, foi medido o decréscimo na absorvância a 240

nm. A atividade enzimática foi calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar de $36 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (Anderson et al., 1995) e expressa em $\text{nmol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ de proteína.

14.6. Peroxidases (POX, EC 1.11.1.7)

A atividade da peroxidase foi determinada pela adição de 100 μL do extrato enzimático bruto a 2,9 mL de meio de reação constituído de tampão fosfato de potássio 25 mM, pH 6,8, pirogalol 20 mM e peróxido de hidrogênio 20 mM (Kar e Mishra, 1976). O incremento da absorvância durante o primeiro minuto de reação a 420 nm, a 25°C determinou a produção de purpurogalina. A atividade enzimática foi calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar de $2,47 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (Chance e Maehley, 1955) e expressa em $\mu\text{mol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ de proteína.

14.7. Peroxidase do ascorbato (APX, EC 1.11.1.11)

A atividade da APX foi determinada pela adição de 100 μL do extrato enzimático bruto a 2,9 mL de meio de reação constituído de ascorbato 0,8 mM e H_2O_2 1,0 mM em tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 6,0. Foi observado o decréscimo na absorvância a 290 nm, à 25°C, durante o primeiro minuto de reação (Nakano e Asada, 1981; Koshiba, 1993). A atividade enzimática foi calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar de $2,8 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (Nakano e Asada, 1981) e expressa em $\text{nmol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ de proteína.

15. ANÁLISE ESTATÍSTICA

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial $3 \times 2 \times 4$, ou seja, três níveis de fósforo (baixo, recomendado e alto), dois níveis de silício (aplicação ou não de silício ao solo) e quatro potenciais osmóticos (0,0; -0,2; -0,4 e -0,6 MPa), com quatro repetições. Já para avaliação das atividades enzimáticas do sistema de defesa antioxidativo, o experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial $3 \times 2 \times 2$,

ou seja, três níveis de P (baixo, recomendado e alto), dois níveis de silício (aplicação ou não de silício ao solo) e dois potenciais osmóticos (0,0 e -0,4 MPa), com quatro repetições. Os dados obtidos para as cultivares foram analisados separadamente. Os dados foram submetidos à análise de variância. As médias obtidas para as doses de Si e para os potenciais osmóticos foram comparadas pelo teste F ($P < 0,05$); as médias obtidas para os níveis de P foram comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

16. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve queda na germinação das sementes com a redução do potencial osmótico, independentemente da dose de fósforo e da aplicação de silício em ambas as cultivares (Figuras 1A e 1B). A redução do poder germinativo se deve à menor disponibilidade de água para as sementes, com a redução do potencial osmótico. Nestas condições, a atividade respiratória das sementes é reduzida (Barrueto Cid et al., 1981), inibindo a germinação e a formação de moléculas de ATP, necessárias ao desencadeamento dos processos germinativos (Machado, 2014). A redução da germinação das sementes também pode ser atribuída à menor mobilização das reservas, menor síntese e atividade enzimática e à mudanças na turgescência celular (Bewley et al., 2013).

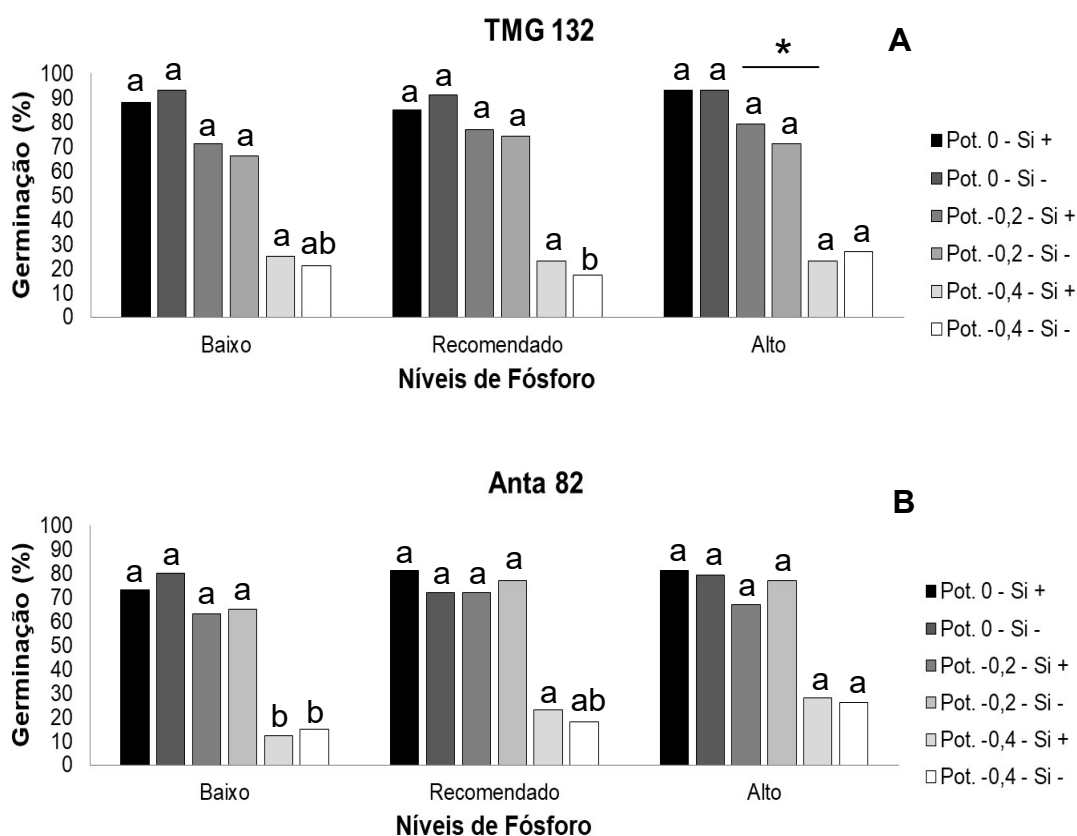
Nota-se, no potencial -0,2 MPa, em alto nível de P, que ocorreu uma maior porcentagem de germinação das sementes com a aplicação de silício quando comparada a não aplicação, na cultivar TMG 132 (Figura 1A). Shi et al. (2014), investigando os efeitos do silício na germinação de quatro cultivares de tomate sob condição de estresse hídrico, verificaram que a adição de silício causou aumentos significativos na germinação das sementes. Em relação a cultivar Anta 82, observa-se que no potencial -0,4 MPa, com e sem a aplicação de silício, a menor porcentagem de germinação foi obtida em baixo nível de P (Figura 1B). Não houve germinação das sementes, de ambas as cultivares, quando estas foram submetidas ao potencial -0,6 MPa.

Figura 1 - Germinação de sementes de duas cultivares de soja em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

*

— Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.



Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

Houve redução dos valores obtidos na primeira contagem de germinação das sementes (PC) com a redução do potencial osmótico, independentemente da dose de fósforo e da aplicação de silício em ambas as cultivares (Figura 2). Assim como para a germinação, os resultados obtidos para a primeira contagem de germinação, que é um indicativo da velocidade de germinação (Nakagawa, 1999), evidenciaram que esta variável foi afetada no potencial -0,2 MPa, indicando redução na velocidade

de germinação ao se comparar com o potencial 0,0 MPa. Não foram observadas plântulas normais na primeira contagem da germinação de sementes, em ambas as cultivares, quando estas foram submetidas aos potenciais -0,4 e -0,6 MPa.

A redução da velocidade de germinação está associada à menor taxa de absorção de água pelas sementes imposta pelo PEG. A água é essencial para germinação das sementes, uma vez que, ao se hidratarem, há a reativação de diversas enzimas, e ainda síntese de outras, que irão desdobrar as substâncias de reservas, as quais são essenciais à retomada de crescimento do embrião da semente (Bewley et al., 2013).

No potencial -0,2 MPa, com aplicação de silício, o valor obtido para a primeira contagem de germinação foi maior no nível recomendado de P (Figura 2A). Houve diferença significativa entre os tratamentos com aplicação e não aplicação de silício quando as plantas foram adubadas com baixo nível de P. No potencial 0 MPa, a primeira contagem de germinação das sementes foi maior no tratamento sem a aplicação de silício. Já no potencial -0,2 MPa, a primeira contagem de germinação foi maior no tratamento com aplicação de silício, no nível recomendado de P e em baixo nível de P (Figura 2A).

Para a cultivar Anta 82 (Figura 2B), observa-se que no potencial -0,2 MPa, com aplicação de silício, a primeira contagem foi maior no tratamento com alto nível de P. Para o tratamento sem a aplicação de silício, nesse mesmo potencial, a primeira contagem de germinação foi maior tanto no nível recomendado de P, quanto em alto nível de P.

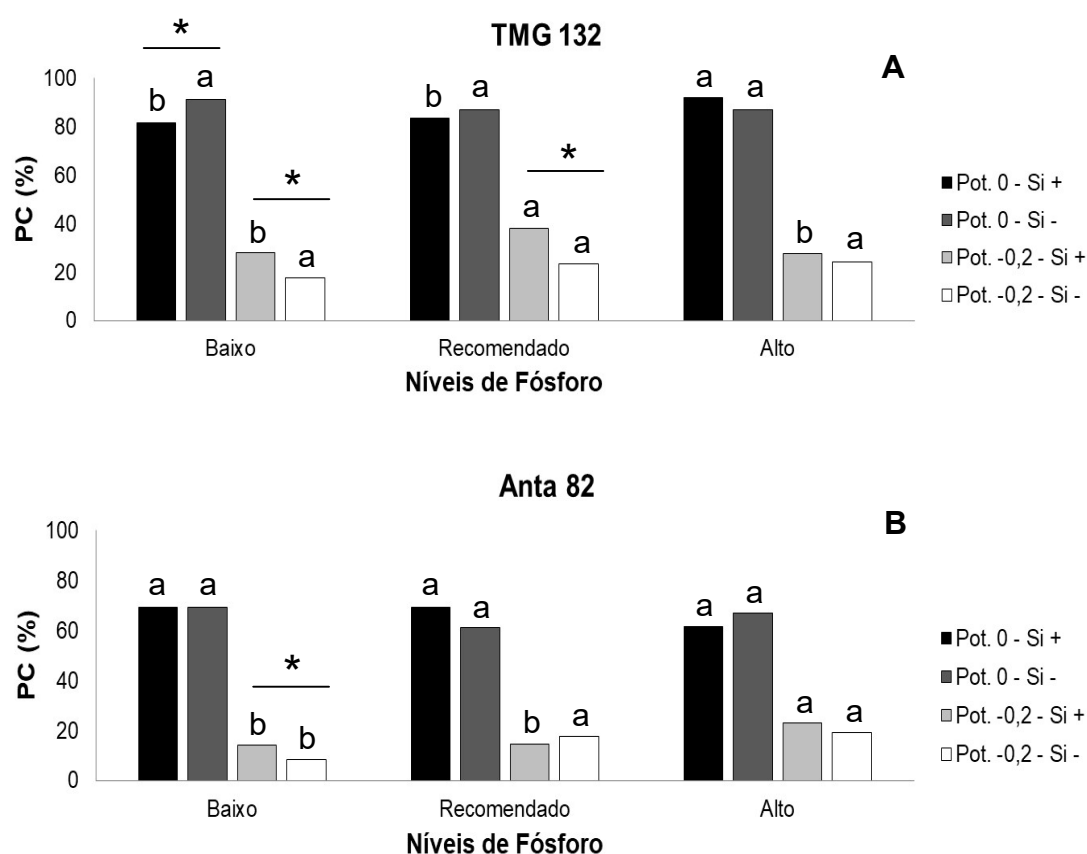
Houve diferença significativa entre a aplicação e não aplicação de silício em baixo nível de P, sendo que no potencial -0,2 MPa, a primeira contagem de germinação das sementes foi maior no tratamento com a aplicação de silício (Figura 2B).

Observa-se efeito da aplicação do silício sob condição de estresse hídrico em diferentes níveis de fósforo para a cultivar TMG 132 (Figura 2A) e, em baixo nível de P para a cultivar Anta 82 (Figura 2B). Estudos mostram que a nutrição com o silício alivia muitos estresses abióticos, incluindo estresses físicos como estresse hídrico, melhorando as características de germinação e primeira contagem da germinação das sementes. Zargar e Agnihotri (2013) relataram que a aplicação de silicato de cálcio no solo aumentou a germinação de sementes de milho sob estresse hídrico.

Figura 2 - Primeira contagem de germinação (PC) de duas cultivares de soja em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

* Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.



Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

O comprimento de plântulas pode ser um parâmetro adequado para prognosticar o desempenho de um lote de sementes de soja em campo (Vanzolini et al., 2007).

Os valores obtidos para o comprimento de raiz, em geral, não diferiram com a redução do potencial osmótico, independentemente da dose de fósforo e da aplicação de silício na cultivar TMG 132 (Figura 3A). No potencial -0,2 MPa, sem a aplicação de silício, o maior comprimento de raiz foi obtido no nível recomendado de

P e em alto nível de P. Houve diferença significativa entre a aplicação e não aplicação de silício em baixo nível de P, sendo que no potencial -0,2 MPa, o comprimento de raiz foi maior no tratamento com a aplicação de silício (Figura 3A).

Em relação a cultivar Anta 82, houve diminuição no comprimento de raiz das plântulas com a redução do potencial osmótico; assim como observado em estudo conduzido por Vieira et al. (2013); em alto nível de P, independentemente da aplicação ou não de silício (Figura 3B). Esse comportamento diferenciado das cultivares deve-se, possivelmente, as características genéticas. No potencial -0,2 MPa, sem a aplicação de silício, o menor comprimento de raiz foi obtido em baixo nível de P e, no potencial -0,4 MPa, sem a aplicação de silício, o menor comprimento de raiz foi observado no tratamento alto nível de P (Figura 3B).

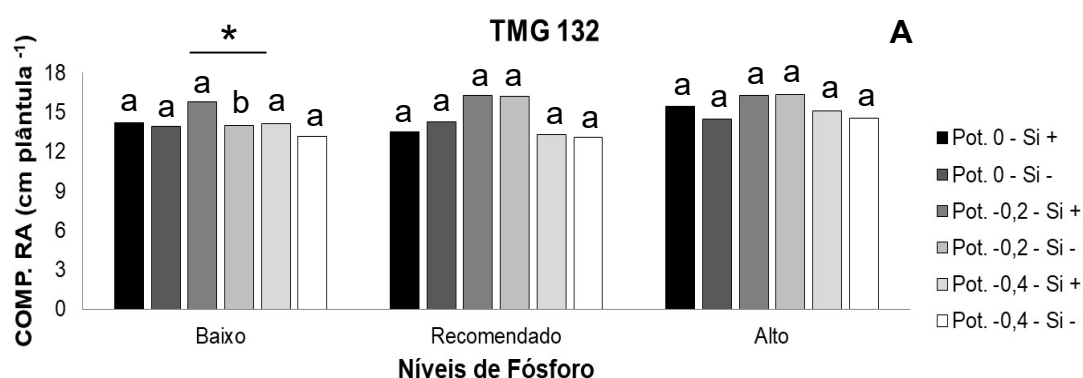
Houve diferença significativa entre a aplicação e não aplicação de silício em baixo nível de P, sendo que no potencial -0,2 MPa, o comprimento de raiz foi maior no tratamento com a aplicação de silício em ambas as cultivares. Acredita-se que o silício pode aumentar a tolerância das plantas ao déficit hídrico (Deren, 2001) e por consequência aumentar a qualidade das sementes produzidas e sua tolerância a estresses. O desenvolvimento das plântulas foi inibido no potencial -0,6 MPa, em ambas as cultivares.

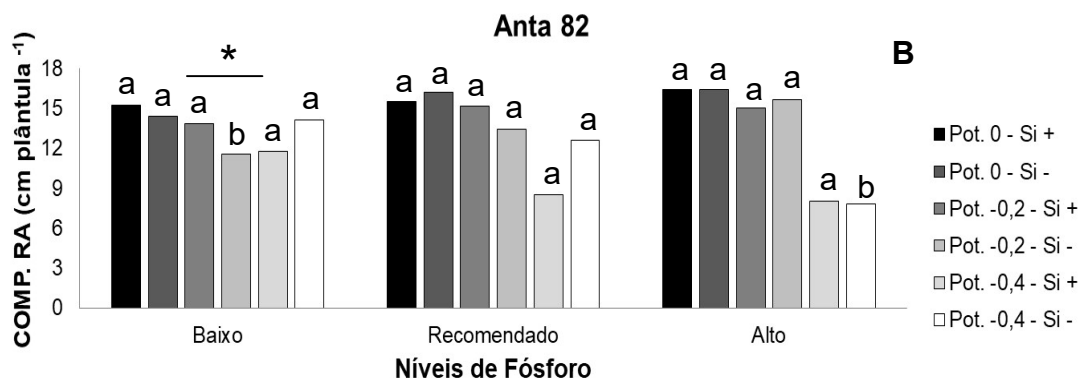
Figura 3 - Comprimento de raiz de plântulas de duas cultivares de soja em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

*

— Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.





Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

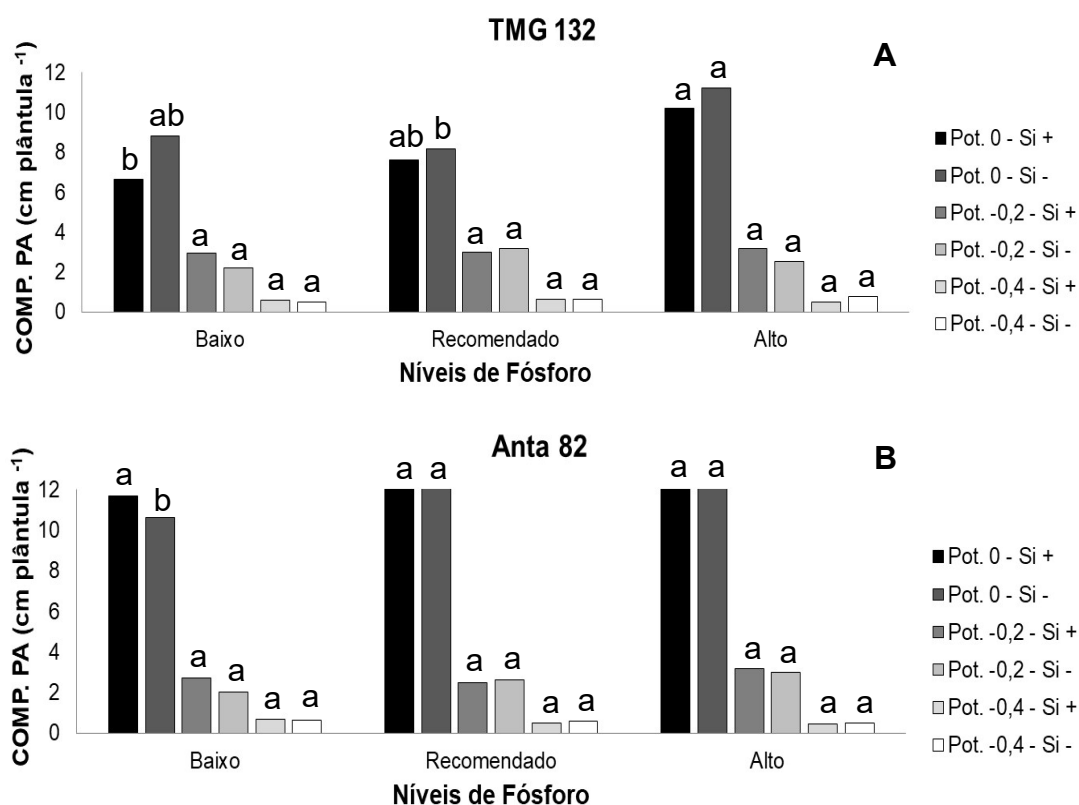
Observa-se decréscimo no comprimento da parte aérea das plântulas com a redução do potencial osmótico, independentemente da dose de fósforo e da aplicação de silício em ambas as cultivares (Figura 4). Quanto menor o potencial osmótico, ou seja, quanto maior o nível de estresse, menor o comprimento do hipocótilo das plântulas, assim como observado por Vieira et al. (2013). Uma possível explicação para a redução do crescimento do hipocótilo é que a menor disponibilidade de água em condição de estresse hídrico afeta a divisão e expansão celular. Além disso, houve priorização do crescimento das raízes nas plântulas sob estresse. Segundo Vieira et al. (2013), o comprimento de plântulas pode ser uma medida eficiente para distinção de genótipos adaptados a condições adversas, como ao déficit hídrico.

No potencial 0 MPa, com e sem a aplicação de silício, o comprimento da parte aérea foi maior em alto nível de P para a cultivar TMG 132 (Figura 4A). No potencial 0 MPa, sem a aplicação de silício, o comprimento da parte aérea foi menor em baixo nível de P na cultivar Anta 82 (Figura 4B).

Figura 4 - Comprimento da parte aérea (COMP. PA) de plântulas de duas cultivares de soja em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

* — Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.



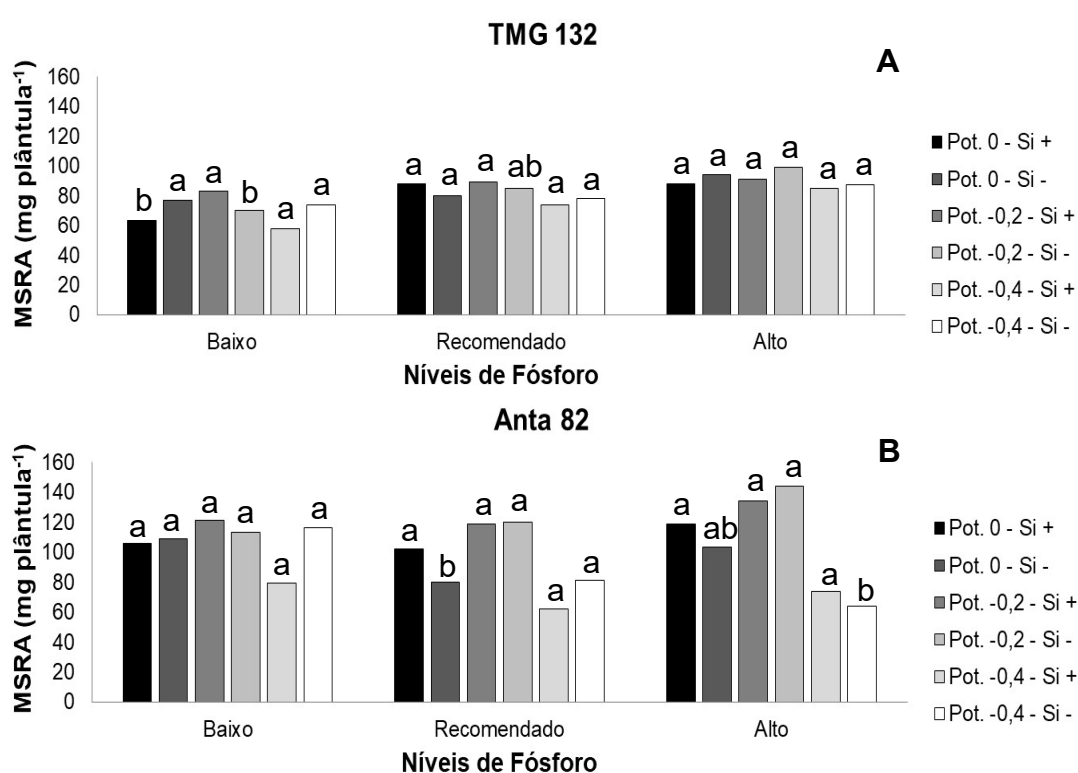
Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

Os valores obtidos para a massa seca de raiz mantiveram-se estáveis com a redução do potencial osmótico, independentemente da dose de fósforo e da aplicação de silício para a cultivar TMG 132 (Figura 5A). Já para a cultivar Anta 82, a matéria seca de raiz foi menor no potencial -0,4 MPa (Figura 5B). Na cultivar TMG 132, no potencial -0,2 MPa, sem a aplicação de silício, a maior matéria seca de raiz foi obtida em alto nível de P (Figura 5A). Já para a cultivar Anta 82, no potencial -0,4 MPa, sem a aplicação de silício, a maior matéria seca de raiz foi obtida no nível recomendado de P e em baixo nível de P (Figura 5B).

Figura 5 - Matéria seca de raiz (MSRA) de plântulas de duas cultivares de soja em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

* — Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.



Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

Houve decréscimo na matéria seca da parte aérea com a redução do potencial osmótico, independentemente da dose de fósforo e da aplicação de silício em ambas as cultivares (Figura 6).

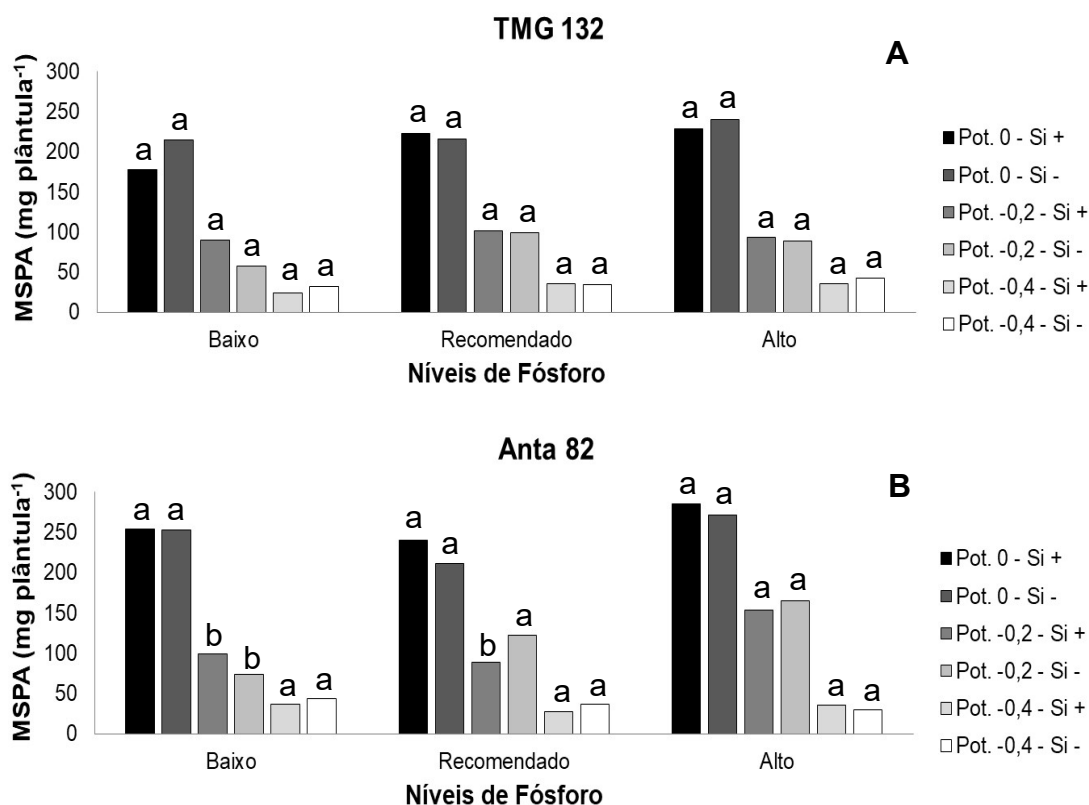
Não foram verificadas diferenças nos tratamentos em relação aos níveis de fósforo com e sem a aplicação de silício na cultivar TMG 132 (Figura 6A). Porém, para a cultivar Anta 82, no potencial -0,2 MPa, com a aplicação de silício, a maior matéria seca da parte aérea foi obtida em alto nível de P e, no mesmo potencial, entretanto, sem a aplicação de silício, a maior matéria seca da parte aérea foi obtida no nível recomendado de P e em alto nível de P (Figura 6B).

Os resultados obtidos para a matéria seca de raiz e da parte aérea apresentaram a mesma tendência dos testes de comprimento de raiz e parte aérea em relação aos potenciais osmóticos. As sementes produzidas em plantas cultivadas em baixo nível de fósforo deram origem a plântulas com menor acúmulo de matéria seca da parte aérea para a cultivar Anta 82. O maior acúmulo deu-se no maior nível de fósforo. A maior disponibilidade de fósforo na semente contribui para a translocação de reservas para a plântula (Nadeem et al., 2012), o que pode ter ocorrido no presente trabalho.

Figura 6 - Matéria seca da parte aérea (MSPA) de plântulas de duas cultivares de soja em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

* Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.

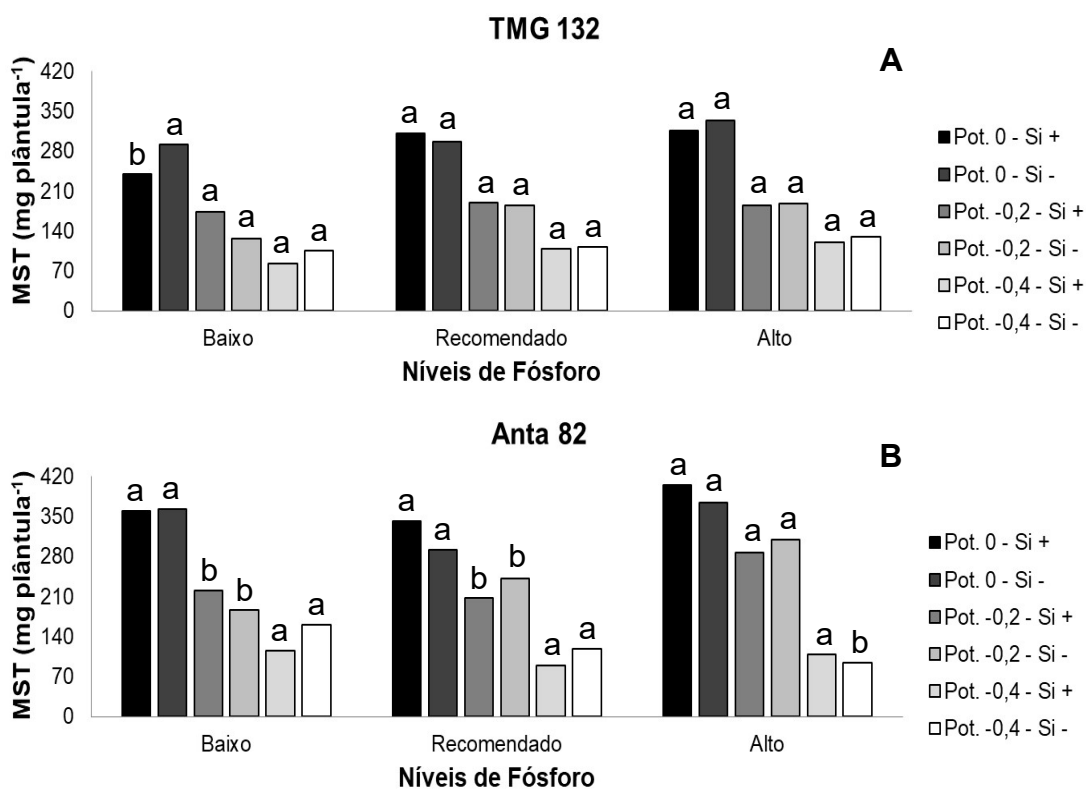


Foi observado decréscimo na matéria seca total das plântulas com a redução do potencial osmótico, independentemente da dose de fósforo e da aplicação de silício em ambas as cultivares (Figura 7). Na cultivar TMG 132, no potencial 0 MPa, com a aplicação de silício, a matéria seca total foi maior no nível recomendado de P e em alto nível de P (Figura 7A). Em relação a cultivar Anta 82, no potencial -0,2 MPa, independentemente da aplicação do silício, a matéria seca total foi maior em alto nível de P; no potencial -0,4 MPa, sem a aplicação de silício, a matéria seca total foi menor em alto nível de P (Figura 7B).

Figura 7 - Matéria seca total (MST) de plântulas de duas cultivares de soja em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

* Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.



Houve decréscimo da relação parte aérea raiz com a redução do potencial osmótico, independentemente da dose de fósforo e da aplicação de silício em ambas as cultivares (Figura 8).

Não foram verificadas diferenças nos tratamentos em relação aos níveis de fósforo com e sem a aplicação de silício na cultivar TMG 132 (Figura 8A). Porém, para a cultivar Anta 82, no potencial -0,2 MPa, com a aplicação de silício, a menor relação parte aérea raiz foi obtida no nível recomendado de P; no mesmo potencial, entretanto, sem a aplicação de silício, a menor relação parte aérea raiz foi obtida em baixo nível de P (Figura 8B).

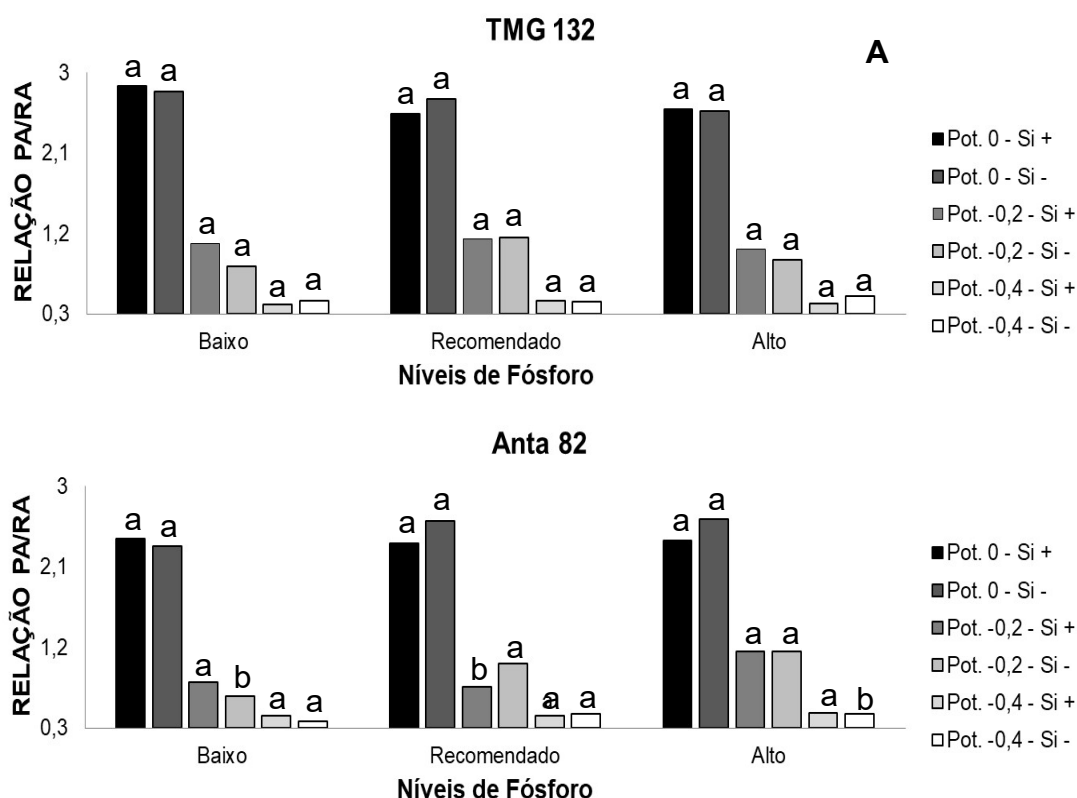
Verificou-se um decréscimo, tanto da matéria seca total quanto da relação parte aérea raiz, com a redução do potencial osmótico, independentemente da dose de fósforo e da aplicação de silício em ambas as cultivares (Figuras 7 e 8). Estorino (2017), trabalhando com quatro cultivares de soja em condições de estresse hídrico, constatou que a concentração de PEG 6000 interferiu na quantidade de massa seca das plântulas. Ele verificou que o peso de massa seca das plântulas das quatro cultivares de soja sofreu redução progressiva quando ocorreu redução do potencial osmótico das soluções. Isso pode ser explicado pela baixa disponibilidade de água, em condição de estresse hídrico, que afeta o metabolismo das plântulas.

Nota-se, que a relação parte aérea raiz de plântula diminui à medida que os potenciais foram reduzidos. Castro e Kluge (1999), relataram que fatores como alta luminosidade e déficit hídrico podem reduzir esta relação em plântulas de milho.

Figura 8 - Relação parte aérea raiz (RELAÇÃO PA/RA) de plântulas de duas cultivares de soja em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

*
— Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.



Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

A atividade da enzima SOD diferiu entre as cultivares (Figura 9). As atividades das enzimas CAT, APX e POX aumentaram com a indução do estresse hídrico em ambas as cultivares (Figuras 10, 11 e 12).

Alguns pesquisadores como Apel e Hisrt (2004) e Moller et al. (2007) reportam que a falta de água leva à restrição da atividade fotossintética e ao aumento na respiração das plantas, ocasionando produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs). Para tanto tais compostos são capazes de causar dano oxidativo aos lipídeos, proteínas e ao DNA. Para se defender, as células possuem mecanismos antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos os quais mantêm a concentração destas substâncias em níveis basais não destrutivos. Quando os níveis das espécies reativas de oxigênio ultrapassam a capacidade antioxidante da célula, desencadeia-se o estresse oxidativo (Angelova et al., 2005). Quando isso acontece, ocorrem aumentos na atividade do sistema de defesa antioxidativo que inicia um processo sincronizado de desintoxicação dos radicais tóxicos existentes (Mittler, 2002).

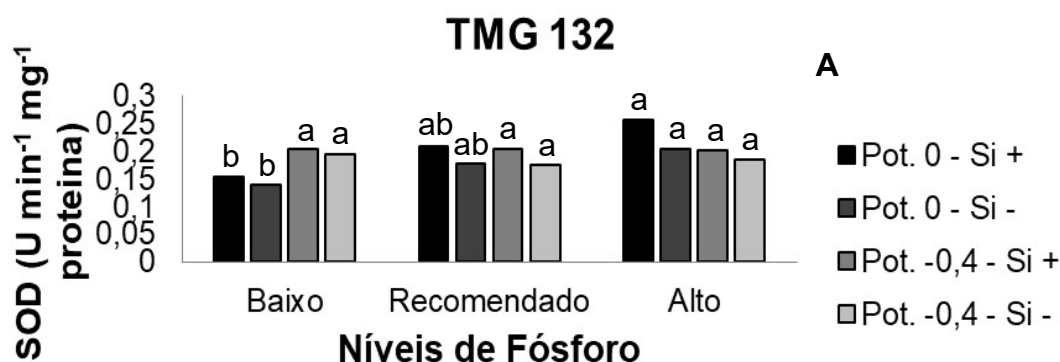
Na cultivar TMG 132, observa-se um aumento da atividade da SOD provocada pelo estresse hídrico, nos tratamentos com e sem a aplicação de silício em baixo nível de P (Figura 9A). Esse resultado sugere que a atividade da SOD auxilia na manutenção do equilíbrio celular e na tolerância ao estresse hídrico. O silício também pode aumentar as atividades das enzimas antioxidantes e reduzir o dano oxidativo em diferentes espécies de plantas quando submetido ao estresse por seca (Gong et al., 2005; Gunes et al., 2008). Isso sugere que o silício pode melhorar a tolerância à seca das plantas através da absorção e utilização de água e nutrientes, e modulação de atividades fisiológicas (como o aumento das atividades de enzimas antioxidantes). No potencial 0 MPa, com e sem a aplicação de silício, a maior atividade da SOD foi constatada em alto nível de P.

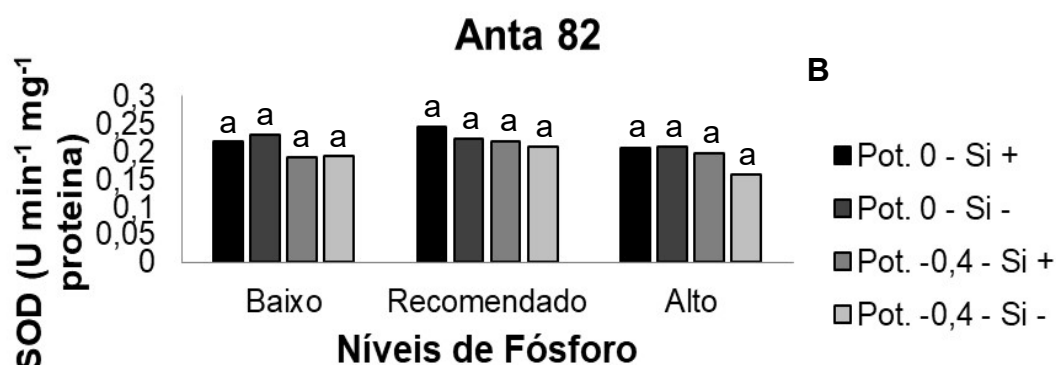
Houve decréscimo na atividade da SOD provocada pelo estresse hídrico na cultivar Anta 82 (Figura 9B). Não foram verificadas diferenças nos tratamentos em relação aos níveis de fósforo com e sem a aplicação de silício.

Figura 9 - Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) em sementes de duas cultivares de soja (A,B) em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

*
— Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.





Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

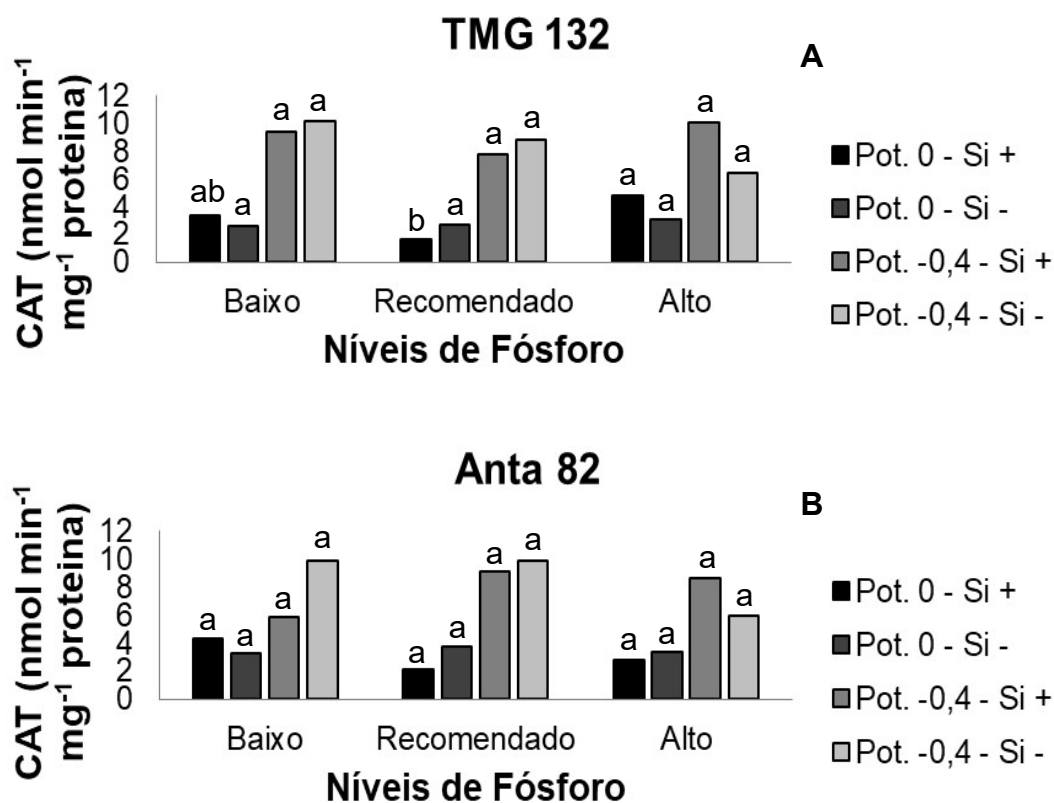
A atividade da enzima catalase, no potencial 0 MPa, com a aplicação de silício, foi maior em alto nível de P na cultivar TMG 132 (Figura 10A). Já para a cultivar Anta 82, não foram verificadas diferenças nos tratamentos em relação aos níveis de fósforo com e sem a aplicação de silício (Figura 10B).

O aumento da atividade da enzima catalase pode ser explicado devido ao fato desta enzima ser particularmente importante nos primeiros eventos da germinação e crescimento de plântulas, removendo o H₂O₂ produzido durante a β-oxidação de ácidos graxos (Bewley et al., 2013). Este fato evidencia a importância desta enzima no mecanismo de defesa ao estresse oxidativo sob essas condições.

Figura 10 - Atividade da enzima catalase (CAT) em sementes de duas cultivares de soja em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

* — Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.



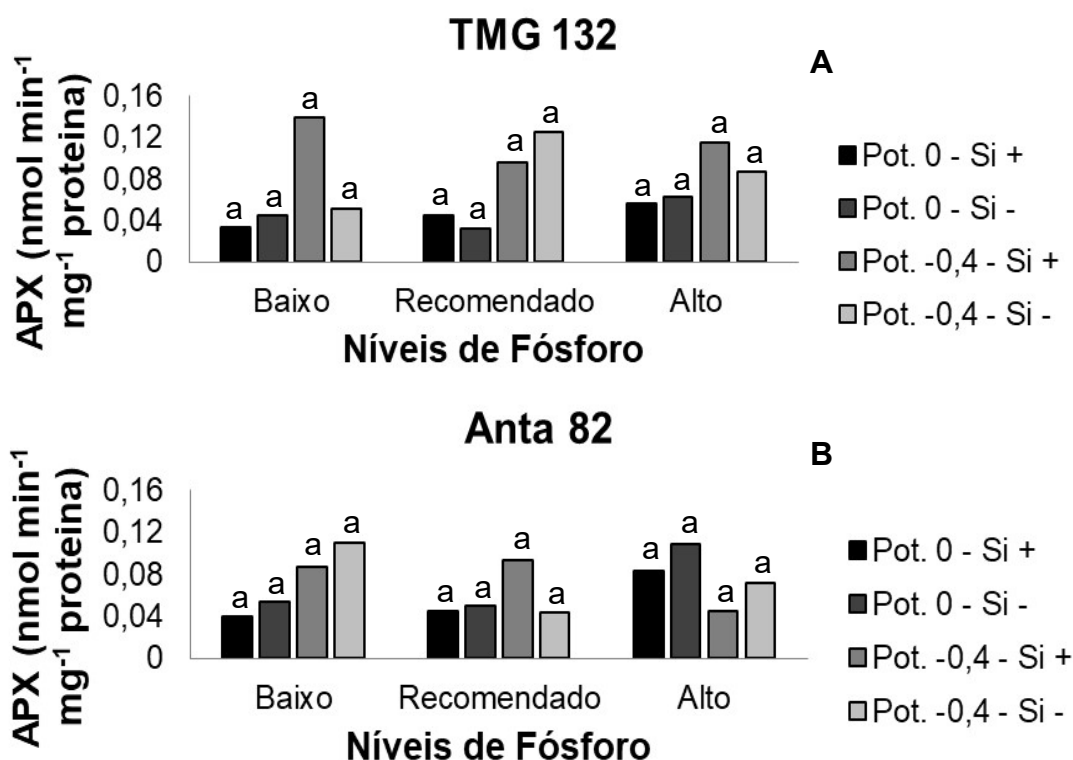
Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

Para a atividade da enzima peroxidase do ascorbato (APX), não foram verificadas diferenças nos tratamentos em relação aos níveis de fósforo com e sem a aplicação de silício em ambas as cultivares (Figura 11). A atividade da enzima APX, de modo geral, aumentou com a redução do potencial osmótico em ambas as cultivares.

Figura 11 - Atividade da enzima peroxidase do ascorbato (APX) em sementes de duas cultivares de soja em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

* — Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.



Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

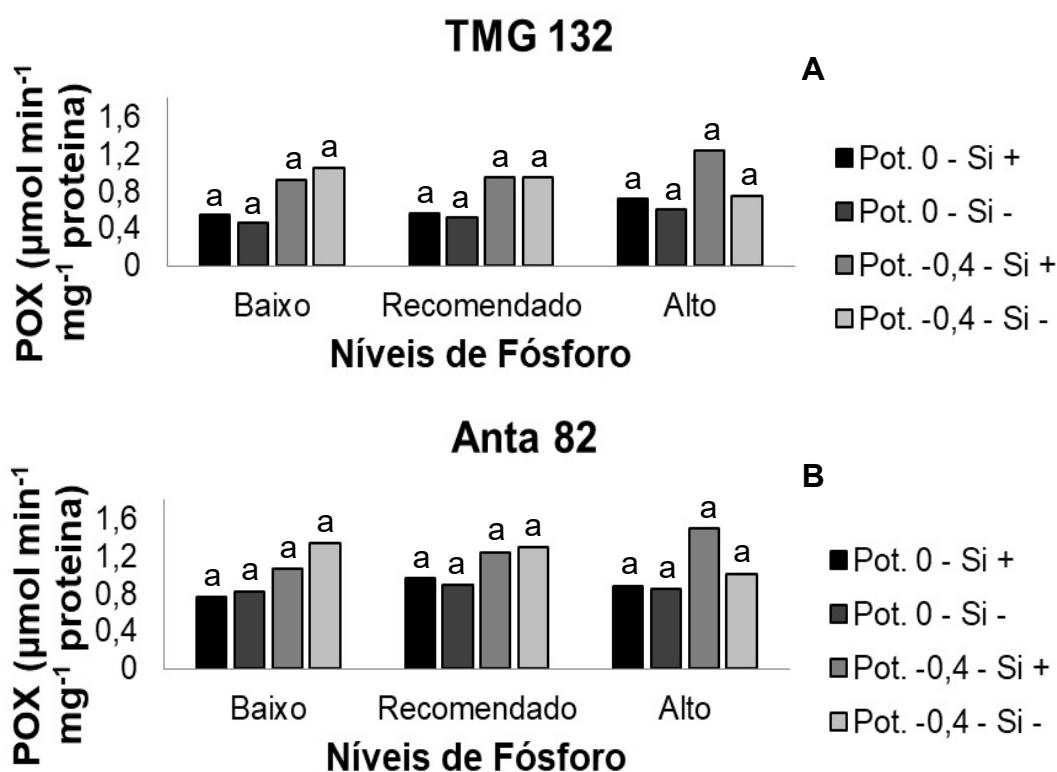
Para a enzima POX, não foram verificadas diferenças nos tratamentos em relação aos níveis de fósforo com e sem a aplicação de silício em ambas as cultivares, porém houve aumento na atividades destas enzimas com a redução do potencial osmótico (Figura 12).

O aumento da atividade da POX, assim como a APX (Figura 11) sob a condição de estresse hídrico, pode ser uma resposta adaptativa, o que contribui para a tolerância a esse estresse. Segundo Foyer e Noctor (2003), as enzimas peroxidases estão ligadas aos diferentes mecanismos de ajustes ao estresse hídrico.

Figura 12 - Atividade da enzima peroxidase (POX) em sementes de duas cultivares de soja em função de diferentes níveis de fósforo, associados ou não à aplicação de silício ao solo em diferentes potenciais osmóticos.

Letras minúsculas comparam os níveis de fósforo dentro de cada potencial osmótico (barras de mesma cor). Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

* — Diferença significativa entre os tratamentos com e sem aplicação do silício dentro de cada nível de fósforo.



Fonte: Souza Junior, R. C, 2018.

Em geral, foi observada redução da germinação (Figura 1) e dos valores obtidos na primeira contagem de germinação (Figura 2), bem como do crescimento das plântulas sob condição de estresse hídrico (Figuras 3-8), independentemente dos níveis de P e Si aplicados às plantas. O aumento da disponibilidade de fósforo para as plantas contribuiu para o maior crescimento das plântulas sob condições de déficit hídrico, principalmente quanto à massa seca de raiz, para a cultivar TMG 132 (Figura 5A); e maior germinação (Figura 1B), primeira contagem de germinação

(Figura 2B), massa seca de parte aérea (Figura 6B) e massa seca total (Figura 7B) das plântulas da cultivar Anta 82. Foi observado aumento na atividade das enzimas do sistema de defesa antioxidativo SOD, com o aumento da dose de P (Figura 9), e CAT, POX e APX (Figuras 10, 11 e 12), com o déficit hídrico. O Si aplicado às plantas proporcionou maiores valores de primeira contagem de germinação (Figura 2) e maior crescimento das raízes (Figuras 3 e 4) das plântulas sob estresse hídrico moderado (-0,2 MPa), nos menores níveis de P, em ambas as cultivares.

17. CONCLUSÕES

Sementes oriundas de plantas cultivadas com maior disponibilidade de P apresentam maior vigor e conseqüentemente maior crescimento das plântulas sob condições de déficit hídrico.

O silício atua no aumento do vigor das sementes quando as plantas são cultivadas com baixa disponibilidade de fósforo, e para o maior crescimento das plântulas oriundas dessas sementes quando sob estresse hídrico moderado (-0,2 MPa).

18. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHUJA, I.; DE VOS, R.C.; BONES, A.M.; HALL, R.D. Plant molecular stress responses face climate change. **Trends in Plant Science**, v. 15, n. 12, p. 664–674, 2010.
- ANDERSON, M.D.; PRASAD, T.K.; STEWART, C.R. Changes in isozyme profiles of catalase, peroxidase, and glutathione reductase during acclimation to chilling in mesocotylus of maize seedlings. **Plant Physiology**, v. 109, p. 1247-1257, 1995.
- ANGELOVA, M.B.; SVETLANA, B.P.; BORYANA, K.S.; SPASSEN, V.V; LYUDMILA, S.S. Oxidative stress response of filamentous fungi induced by hydrogen peroxide and paraquat. **Micological Resezrch**, v. 109, p. 150-158, 2005.
- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, n. 1, p. 373-399, 2004.
- BARRUETO CID, L.P.; OLIVA, M.A.; CARDOSO, A.A. Efeito do potencial hídrico sobre a embebição, a respiração e a germinação da leguminosa *Cratylia floribunda*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 16, n. 6, p. 883-890, 1981.
- BEAUCHAMP, C.; FRIDOVICH, I. Superoxide Dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. **Analytical Biochemistry**, v. 44, p. 276-287, 1971.
- BEWLEY, J.D.; BRADFORD, K.J.; HILHORST, H.W.M.; NONOGAKI, H. **Seeds: physiology of development, germination and dormancy**. Springer. Third Edition, 2013. 392p.
- BRACCINI, A.L.; RUIZ, H.A.; BRACCINI, M.C.L.; REIS, M.S. Germinação e vigor de sementes de soja sob estresse hídrico induzido por soluções de cloreto de sódio, manitol e polietilenoglicol. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 18, n. 1, p. 10-16, 1996.
- 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. 1-2, p. 248-254, 1976.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes / **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399 p.
- CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. **Ecofisiologia de cultivos anuais: trigo, milho, soja, arroz e mandioca**. São Paulo: Nobel, 1999. 126 p.
- CHANCE, B.; MAEHLEY, A.C. Assay of catalases and peroxidases. **Methods in Enzymology**, v. 2, p. 764-775, 1955. [http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879\(55\)02300-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879(55)02300-8).

DEL LONGO, O.T.; GONZÁLEZ, A.; PASTORI, G.M.; TRIPPI, V. Antioxidant defenses under hyperoxygenic and hyperosmotic conditions in leaves of two lines of maize with differential sensitivity to drought. **Plant Cell Physiology**, v. 34, p. 1023-1028, 1993.

DEREN, C. Plant genotypes, silicon concentration and silicon related responses. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G.H. **Silicon in Agriculture**. Netherlands: Elsevier Science, cap. 8, p. 149-158, 2001.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 91, p. 11-17, 1994.

ESTORINO, L.M. **Desempenho de cultivares de soja em diferentes potenciais osmóticos de polietilenoglicol**. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

FIRMANO, R.S.; KUWAHARA, F.A.; SOUZA, G.M. Relação entre adubação fosfatada e deficiência hídrica em soja. **Ciencia Rural**, v. 39, n. 7, p. 1967-1973, 2009.

FOYER, C.H.; NOCTOR, G. Redox sensing and signalling associated with reactive oxygen in chloroplasts, peroxisomes and mitochondria. **Physiologia Plantarum**, v. 119, p. 355-364, 2003. <http://dx.doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.00223.x>

GIANNOPOLITIS, C.N.; RIES, S.K. Superoxide Dismutases. **Plant Physiology**, v. 59, p. 309-314, 1977.

GONG, H.; X, ZHU; K, CHEN; S, WANG; C, ZHANG. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, p. 313–321, 2005.

GUEDES, R.S.; ALVES, E.U.; VIANA, J.S.; GONÇALVES, E.P.; LIMA, C.R.D.; SANTOS, S.D.R.N.D. Germinação e vigor de sementes de *Apeiba tibourbou* submetidas ao estresse hídrico e diferentes temperaturas, **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 45-53, 2013.

GUNES, A.; PILBEAM, D.J.; INAL, A.; COBAN, S. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, in growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, n. 13-14, p. 1885-1903, 2008.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; ARAKI, H.; AN, P.; MORITA, S.; LUXOVÁ, M.; LUX, A. Application of silicon enhanced drought tolerance in sorghum bicolor. **Physiology Plant**, v. 123, p. 459-466, 2005.

HAVIR, E.A.; MCHALE, N.A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiology**, v. 84, p. 450-455, 1987.

KAPPES, C.; ANDRADE, J.A.C.; HAGA, K.I.; FERREIRA, J.P.; ARF, M.V. Germinação, vigor de sementes e crescimento de plântulas de milho sob condições de déficit hídrico. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, n. 2, p. 125-134, 2010.

KAR, M.; MISHRA, D. Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. **Plant Physiology**, v. 57, p. 315-319, 1976.

KOSHIBA, T. Cytosolic ascorbate peroxidase in seedlings and leaves of maize (*Zea mays*). **Plant and Cell Physiology**, v. 34, n. 05, p. 713-721, 1993.

LUYCKX, M.; HAUSMAN, J.F.; LUTTS, S.; GUERRIERO, G. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. **Plant Science**. v. 8, n. 411, p. 1-8, Março 2017.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, p. 342-397, 2006.

MACHADO, B.Q.V. **Avaliação de três cultivares de soja quanto à tolerância ao déficit hídrico induzido por polietilenoglicol**. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

MCCOUCH, S. Feeding the future. **Nature**. v. 499, p. 23-24, 2013.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002.

MOLLER, I.M.; JENSEN, P.E.; HANSSON, A. Oxidative modifications to cellular components in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 58, p. 459-481, 2007.

NADEEM, M., MOLLIER, A.; MOREL, C.; VIVES, A.; PRUD'HOMME, L.; PELLERIN, S. Maize (*Zea mays* L.) endogenous seed phosphorus remobilization is not influenced by exogenous phosphorus availability during germination and early growth stages. **Plant and Soil**, v. 357, n. 1-2, p. 13-24, 2012.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA NETO, J.B.. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES. p. 2-1-2-24. 1999.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant Cell Physiology**, v. 22, p. 867-880, 1981.

PEIXOTO, P.H.P.; CAMBRAIA, J.; SANTANA, R.; MOSQUIM, P.R.; MOREIRA, M.A. Aluminum effects on lipid peroxidation and on the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 11, p. 137-143, 1999.

PYL, E.T.; PIQUES, M.; IVAKOV, A.; SCHULZE, W.; ISHIHARA, H.; STITT, M.; SULPICE, R. Metabolism and growth in *Arabidopsis* depend on the daytime temperature but are temperature-compensated against cool nights. **The Plant Cell**, v. 24, p. 2443-2469, 2012.

RAIZER NETO, E. **O estado da arte do uso da cinza de casca de arroz**. Disponível em: www.sindarroz-sc.com.br/default.php?pg=binario&id=28., 2007.

ROSSI, V.S. **Mecanismo antioxidante em plantas**. 10º mostra acadêmica UNIMEP. 10º Simpósio de ensino de graduação, 2012.

SHI, Y.; ZHANG, Y.; YAO, H.; W.U, J.; SUN, H.; GONG, H. Silicon improves seed germination and alleviates oxidative stress of bud seedlings in tomato under water deficit stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 78, p. 27-36, 2014.

SOARES, M.M.; SILVA, L.J.; OLIVEIRA, G.L.; SEKITA, M.C.; DIAS, D.C.F.S. Endogenous level of phosphorous in soya bean seeds and the relationship with physiological quality, oil and protein content. **Seed Science and Technology**, v. 42, p. 1-11, 2014.

VANZOLINI, S.; ARAKI, C.A.D.S.; SILVA, A.C.T.M.; NAKAGAWA, J. Teste de comprimento de plântula na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 29, n. 2, p. 90-96, 2007.

VIEIRA, F.C.F.; SANTOS JUNIOR, C.D.; NOGUEIRA, A.P.O.; DIAS, A. C.C.; HAMAWAKI, O.T.; BONETTI, A.M. Aspectos fisiológicos e bioquímicos de cultivares de soja submetidos a déficit hídrico induzido por peg 6000. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 29, n. 2, p. 543-552, 2013.

ZARGAR, S.M.; AGNIHOTRI, A. Impact of silicon on various agromorphological and physiological parameters in maize and revealing its role in enhancing water stress tolerance. **Emir J Food Agric**, v. 25, p. 138–141, 2013.

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