

NAYARA PEREIRA CAPOBIANGO

**ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS EM PLÂNTULAS DE SOJA
EM RESPOSTA À IMPEDÂNCIA MECÂNICA DO SUBSTRATO E AO VIGOR
DE SEMENTES**

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*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C245a
2019

Capobiango, Nayara Pereira, 1994-
Alterações fisiológicas e bioquímicas em plântulas de soja
em resposta à impedância mecânica do substrato e ao vigor de
sementes / Nayara Pereira Capobiango. – Viçosa, MG, 2019.
x, 106 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Laércio Junio da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Soja - Semente. 2. Solos - Compactação. 3. Emergência
de plântula. 4. Plântulas - Crescimento. 5. Etileno. 6. Ativação
enzimática. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Fitotecnia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia. II. Título.

CDD 22. ed. 633.3421

NAYARA PEREIRA CAPOBIANGO

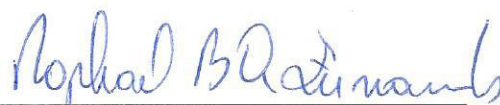
**ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS EM PLÂNTULAS DE SOJA
EM RESPOSTA À IMPEDÂNCIA MECÂNICA DO SUBSTRATO E AO VIGOR
DE SEMENTES**

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: 19 de fevereiro de 2019.



Denise Cunha Fernandes dos S. Dias
(Coorientadora)



Raphael Bragança Alves Fernandes
(Coorientador)



Carla do Carmo Milagres



Laércio Junio da Silva
(Orientador)

Aos meus pais Darci e Maria José

Ao meu irmão Ronan

Ao meu namorado Lucas Júnior

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus por estar ao meu lado renovando minha força e disposição a cada momento.

Aos meus pais, Maria José e Darci, razão da minha vida, pela educação que me proporcionaram, por todo carinho e apoio.

Ao meu irmão Ronan, por quem tenho muita admiração e carinho, um verdadeiro exemplo para mim, imprescindível na minha vida.

À minha avó Eva pelo carinho, pelas orações e ensinamentos.

Ao meu namorado Lucas Júnior, pelo companheirismo, amizade, pela força e ensinamentos durante estes anos. Aos seus pais, Elenice e Lucas, e seus irmãos, Mateus e Priscila, por todo carinho e por fazerem parte da minha vida.

À Igreja Batista Memorial em Viçosa pelas orações, convívio e aprendizado nesse período.

Ao professor Laércio Junio da Silva pela confiança depositada em mim, oportunidade, orientação e ensinamentos.

Ao professor Raphael Bragança Alves Fernandes e à professora Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias pela coorientação e pelos conselhos e sugestões para o enriquecimento deste trabalho.

À Dra. Carla do Carmo Milagres pelas correções e contribuições para este trabalho.

Aos amigos da graduação, pós-graduação e técnicos de laboratório integrantes do GSem, pela amizade e auxílio nos trabalhos.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Centro de Ciências Agrárias, ao Departamento de Fitotecnia e Departamento de Solos pelo apoio.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Márcio Guirro Terra e à empresa GDM Seeds, pelo apoio.

A todos que de alguma forma contribuíram para a execução desse trabalho, muito obrigada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

BIOGRAFIA

Nayara Pereira Capobiango, filha de Darci Capobiango e Maria José Pereira Capobiango, nasceu em 11 de abril de 1994, no município de Guiricema, Minas Gerais, Brasil.

No ano de 2012 iniciou o curso de graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa, obtendo o título de Engenheira Agrônoma no ano de 2017.

Em março de 2017 iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa em fevereiro de 2019.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS	7
CAPÍTULO I - PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA IMPEDÂNCIA MECÂNICA NA EMERGÊNCIA E CRESCIMENTO DE PLÂNTULAS	11
RESUMO	11
ABSTRACT	12
INTRODUÇÃO.....	13
MATERIAL E MÉTODOS.....	15
RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS	39
CAPÍTULO II - EFEITO DO VIGOR DAS SEMENTES NA EMERGÊNCIA E NO CRESCIMENTO DE PLÂNTULAS DE SOJA EM RESPOSTA À IMPEDÂNCIA MECÂNICA DO SUBSTRATO	44
RESUMO	44
ABSTRACT	45
INTRODUÇÃO.....	46
MATERIAL E MÉTODOS.....	47
RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS	72
CAPÍTULO III - EFEITO DO VIGOR DAS SEMENTES NAS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE PLÂNTULAS DE SOJA À IMPEDÂNCIA MECÂNICA DO SUBSTRATO	76

RESUMO	76
ABSTRACT	77
INTRODUÇÃO.....	78
MATERIAL E MÉTODOS.....	79
RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
CONCLUSÕES	99
REFERÊNCIAS	100
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106

RESUMO

CAPOBIANGO, Nayara Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Alterações fisiológicas e bioquímicas em plântulas de soja em resposta à impedância mecânica do substrato e ao vigor de sementes.** Orientador: Laércio Junio da Silva. Coorientadores: Raphael Bragança Alves Fernandes e Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias.

A impedância mecânica é considerada uma preocupação importante da agricultura moderna. O estabelecimento das plantas no campo depende de boa emergência e crescimento das plântulas, além de sementes vigorosas. Todavia, carece de mais pesquisas visando elucidar os efeitos do impedimento físico do solo sobre o crescimento de plântulas de soja, bem como a interferência do vigor das sementes na tolerância à compactação. Além disto, é necessário o desenvolvimento de metodologias mais confiáveis para o estudo da impedância mecânica e das alterações nas plantas provocadas por este estresse. Dessa forma, os objetivos desse trabalho foram: i) desenvolver metodologia para o estudo da impedância mecânica na emergência e crescimento inicial de plântulas de soja; ii) avaliar as alterações fisiológicas e bioquímicas em plântulas em função do aumento da impedância mecânica do substrato; iii) avaliar o efeito do vigor das sementes na tolerância das plântulas ao aumento da impedância mecânica do substrato. Foi desenvolvido um sistema que pode ser utilizado para a avaliação das respostas de sementes e plântulas ao impedimento físico durante a germinação, emergência e crescimento de plântulas. Para validar o sistema foram utilizadas sementes de quatro cultivares de soja, que foram submetidas à emergência sob diferentes níveis de impedância mecânica do substrato (0,15, 0,60 e 0,87 MPa). As plântulas foram avaliadas quanto às características morfológicas. Para avaliar os efeitos do aumento da impedância mecânica do substrato na emergência e no crescimento inicial de plântulas de soja oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor, bem como de características bioquímicas (produção de etileno, concentração de proteína e atividades de enzimas do sistema antioxidante) das plântulas, foram utilizadas sementes de duas cultivares sendo dois lotes de cada uma, com dois níveis de vigor (alto e baixo). As sementes foram submetidas durante a germinação e emergência das plântulas à diferentes níveis de resistência à penetração (0,15, 0,60 e 0,87 MPa) utilizando o sistema desenvolvido. Foi avaliado diariamente o número de plântulas emergidas. Após sete dias, as plântulas foram coletadas e submetidas à avaliação de parâmetros de crescimento (comprimento, diâmetro radicular e massa seca), além das avaliações bioquímicas. Os dados foram utilizados para

caracterizar os efeitos da impedância mecânica nas características morfológicas, fisiológicas e bioquímicas das plântulas. A metodologia é promissora para fins de pesquisa em melhoramento de plantas visando verificar a variabilidade genotípica e selecionar genótipos mais tolerantes à compactação do solo. No entanto, necessita de mais pesquisas que possam relacionar os resultados obtidos neste trabalho com a produtividade da cultura em campo. O aumento da resistência à penetração não reduz a porcentagem final de emergência das plântulas de soja, mas reduz a velocidade e uniformidade de emergência. Foi observado redução da matéria seca, do comprimento total, da área superficial total e do volume total das raízes, além de maior espessamento radicular com o aumento da resistência à penetração. As respostas ao aumento da impedância mecânica na emergência e crescimento das plântulas, para a cultivar 1 e cultivar 2, foram independentes do vigor das sementes. A biossíntese do etileno não foi afetada pela impedância mecânica e vigor de sementes nas plântulas de soja aos sete dias após a emergência. O aumento da resistência à penetração não altera o conteúdo de proteína do sistema radicular e da parte aérea das plântulas da cultivar 1 e cultivar 2, mas proporcionou aumento da atividade da catalase (CAT) na raiz, aumento e redução da peroxidase do ascorbato (APX) e superóxido dismutase (SOD), respectivamente, na parte aérea da cultivar 1. Já a cultivar 2 apresentou maior atividade da SOD na raiz, sem alterações na atividade das demais enzimas. O lote de alto vigor da cultivar 1 tem maior expressão da enzima CAT na raiz e SOD na parte aérea das plântulas sob elevada impedância mecânica.

ABSTRACT

CAPOBIANGO, Nayara Pereira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Physiological and biochemical changes in soybean seedlings in response to mechanical impedance of the substrate and seed vigour.** Adviser: Laércio Junio da Silva. Co- Advisers: Raphael Bragança Alves Fernandes and Denise Cunha Fernandes dos Santos Dias.

Mechanical impedance is considered an important concern of modern agriculture. The establishment of plants in the field depends on good emergence and seedling growth, as well as vigorous seeds. However, further research is needed to elucidate the effects of soil physical impedance on soybean seedlings growth, as well as the interference of seed vigour in the tolerance to soil compaction. In addition, it is necessary to develop more reliable methodologies for the study of soil mechanical impedance and the changes on plants caused by this stress. Thus, the objectives of this work were: i) to develop a methodology for the study of the mechanical impedance in the emergence and initial growth of soybean seedlings; ii) to evaluate the physiological and biochemical changes in soybean seedlings due to the increase in the mechanical impedance of the substrate; iii) to evaluate the effect of seed vigour on seedling tolerance to the increase in the mechanical impedance of the substrate. A system has been developed that can be used to evaluate the responses of seeds and seedlings to the physical impedance during seed germination, emergence and seedling growth. In order to validate the system, seeds of four soybean cultivars were used. The seeds were tested as for seedling emergence under different levels of mechanical impedance of the substrate (0.15, 0.60 and 0, 87 MPa), and the seedlings were evaluated for morphological characteristics. In order to evaluate the effects of the increase in the mechanical impedance of the substrate in the emergence and in the initial growth of soybean seedlings, as well as the biochemical characteristics (ethylene production, protein concentration and enzyme activities of the antioxidant system), two cultivars were used, being two lots of each cultivar, with two levels of seed vigour (high and low). Seeds were submitted to different levels of resistance to penetration of the substrate (0.15, 0.60 and 0.87 MPa) during the germination and emergence of the seedlings using the developed system. The number of emerged seedlings was evaluated daily. After seven days, the seedlings were collected and submitted to the evaluation of growth parameters (length, root diameter and dry mass), besides biochemical evaluations. The data were used to characterize the effects of the

mechanical impedance on the morphological, physiological and biochemical characteristics of the seedlings. The methodology is promising for research on plant breeding aiming to verify the genotypic variability and to select genotypes more tolerant to soil compaction. However, it is necessary further research that could relate the results obtained with this work to the plant productivity on field conditions. Increasing penetration resistance of the substrate does not reduce the final emergence percentage of soybean seedlings but reduces the speed and uniformity of emergence. It was observed reduction of root dry matter, total root length, total root surface area and total root volume, as well as greater root thickening with increased resistance to penetration. The responses to mechanical impedance increasing in seedling emergence and growth, for the cultivar 1 and cultivar 2, were independent of seed vigour. Ethylene biosynthesis was not affected by substrate mechanical impedance and seed vigour in soybean seedlings seven days after emergence. The increase in resistance to penetration did not alter the protein content of the seedling root system and of the seedling shoots of the cultivar 1 and cultivar 2, but it was observed increasing in the activity of catalase (CAT) in the root, as well as increasing and reduction of ascorbate peroxidase (APX) and superoxide dismutase (SOD), respectively, in the seedling shoots of the cultivar 1. However, the cultivar 2 presented higher SOD activity in the root, without altering the activity of the other enzymes due the increasing in the mechanical impedance of the substrate. The high vigour lot of the cultivar 1 had higher expression of the CAT enzyme in the seedling root, and SOD in the seedling shoot under high mechanical impedance.

INTRODUÇÃO GERAL

A compactação do solo é considerada uma preocupação da agricultura moderna, devido ao aumento do tamanho e do peso das máquinas agrícolas, associado ao manejo intensivo das áreas de cultivo, com grande potencial para intensificar este problema. Os indicadores deste impedimento físico compreendem a resistência, densidade, porosidade e umidade do solo, bem como o crescimento, desenvolvimento e a produtividade das plantas cultivadas (Hamza e Anderson, 2005; Batey, 2009).

A soja é sensível à compactação do solo, o que reduz sua produtividade (Beutler et al., 2006). Ainda, a emergência e o crescimento desuniforme das plantas nessas condições podem dificultar a decisão da época adequada para a realização da dessecação e colheita, prejudicando o manejo da cultura.

Os efeitos da resistência do solo à penetração das raízes das plantas dependem do grau de compactação, cuja aferição é geralmente realizada utilizando-se um penetrômetro. Valores superiores a 2 MPa podem limitar o crescimento das raízes e o desenvolvimento das plantas (Moraes et al., 2014). A umidade e a densidade do solo são os parâmetros que mais influenciam a resistência do solo à penetração das raízes (Ayers e Perumpral, 1981)(Ayers e Perumpral, 1981)(Ayers e Perumpral, 1981), embora a textura também seja muito influente neste processo durante a emergência das plântulas e estabelecimento do sistema radicular (Tracy et al., 2013).

O nível de resistência à penetração na camada compactada pode variar entre 0,26 a 1,98 MPa em nitossolo vermelho argiloso (Foloni et al., 2006), e pode ser crítico ao crescimento e à produtividade da soja a partir de 2,24 MPa, em latossolo vermelho (Beutler et al., 2006), e a partir de 1,9 MPa, em argissolo vermelho (Lima et al., 2010). A impedância mecânica de 0,75 MPa em areia também limita o crescimento inicial de plântulas, sendo considerada alta resistência à penetração do substrato (Jin et al., 2015).

A compactação do solo em níveis intermediários é benéfica às plantas em relação a um solo solto e desagregado, porém em níveis elevados a compactação é extremamente prejudicial ao crescimento vegetal. Szatanik-Kloc et al. (2018) relataram que o solo compactado interfere negativamente nos parâmetros de crescimento radicular e de parte aérea. Assim, a impedância mecânica do solo pode atrasar a emergência das plântulas e comprometer o desenvolvimento e estabelecimento da cultura (Latif et al., 2008).

As sementes estão sujeitas a vários estresses bióticos e abióticos no campo, mas é o vigor que define a capacidade de germinação e emergência das plântulas de forma rápida e uniforme em diversas condições ambientais. Este é um componente determinante para o rendimento da cultura, pois define o estabelecimento das plantas no campo. Assim, o vigor das sementes é uma característica quantitativa influenciada pela complexa interação entre a genética e o meio ambiente. A germinação rápida das sementes e o crescimento subsequente das plântulas em condição de impedimento físico do solo são, portanto, fenótipos chave de sementes vigorosas. No entanto, os mecanismos que controlam o vigor das sementes permanecem pouco compreendidos (Finch-Savage e Bassel, 2016).

Uma das dificuldades enfrentadas por pesquisadores em estudos para avaliação do efeito da compactação do solo sobre as plantas é a reduzida disponibilidade de metodologias eficientes, padronizáveis e reprodutíveis. As metodologias encontradas na literatura, visando ao estudo da impedância mecânica na emergência e crescimento de plântulas, possuem aspectos que podem comprometer a confiabilidade dos resultados. As pesquisas que envolvem compactação, geralmente utilizam o solo como substrato, sendo este influenciado por vários fatores que alteraram a resistência à penetração durante o estabelecimento das plantas. A umidade, textura, estrutura, densidade, tipo de solo, intensidade e frequência de carga aplicada sobre o solo influenciam no grau de compactação (Lebert e Horn, 1991) e, conseqüentemente, os resultados obtidos, o que dificulta extrapolações e comparações com outros trabalhos.

Muitos estudos envolvem a passagem de máquinas agrícolas ou rolos compactadores sobre uma determinada área, visando estudar os efeitos da compactação do solo sobre o crescimento, emergência e produtividade das plantas (Beutler et al., 2006; Grotta et al., 2007; Latif et al., 2008; Modolo et al., 2008; Giarola et al., 2009; Roque et al., 2010). Cada passada da máquina ou rolos compactadores resulta em diferentes níveis de impedimento físico do solo, o qual pode ser mensurado com a utilização de penetrômetros.

Diferentes níveis de resistência à penetração também podem ser obtidos através da utilização de colunas de PVC, preenchidas com solo, por meio da técnica de compressão. Esta metodologia foi utilizada para a avaliação de plantas cultivadas sob diferentes níveis de impedância mecânica, para quantificar a diversidade genética do desenvolvimento precoce do sistema radicular de plantas de trigo em diferentes

densidades do solo, e para testar se o número de raízes é uma característica adequada para se avaliar a tolerância genotípica à compactação do solo (Colombi e Walter, 2017).

Ensaio de compactação do solo em vasos também são utilizados para avaliar os efeitos da impedância no desenvolvimento das culturas. Esta técnica de compactação consiste na compressão do solo por meio de impactos em queda livre de um êmbolo com peso determinado, no centro geométrico de um suporte de madeira com diâmetro ligeiramente inferior ao vaso cilíndrico de PVC utilizado, com capacidade definida (Centurion et al., 2006).

Outra metodologia direcionada ao estudo da impedância mecânica consiste no uso de vasos montados com anéis (normalmente em número de três) de PVC sobrepostos, unidos com fita adesiva de plástico e fechados ao fundo. O solo umedecido do anel intermediário é submetido a uma prensa hidráulica que, pela variação de volume do solo compactado, permite atingir níveis de compactação desejados. Os anéis superior e inferior dos vasos são preenchidos com o solo fertilizado e umedecido, sem o uso da prensa. (Foloni et al., 2006) utilizaram esta técnica para avaliar o crescimento da parte aérea e do sistema radicular da soja em camadas compactadas de solo.

Um sistema de camada fina de cera também pode ser utilizado para avaliar a resistência à penetração de raízes e o crescimento de plantas. Utiliza-se uma mistura fundida de 60% de cera e 40% de petrolato (em peso), vertida em moldes e deixada solidificar à temperatura ambiente. Nesse sistema, tubos de PVC são empilhados e selados com fita adesiva. O tubo é tampado na parte inferior, preenchido com meios (50% de areia e 25% de vermiculita) e uma camada de cera-petrolato, a qual é a responsável pelo impedimento mecânico ao crescimento das raízes. As sementes são pré-germinadas e transplantadas no sistema. A avaliação consiste em verificar o crescimento das plântulas no sistema, o número de raízes que atingiram a camada de cera (baixa ou nenhuma tolerância ao impedimento físico imposto) e aquelas que penetraram a camada de cera (tolerantes ao impedimento físico imposto). Esse sistema foi utilizado para se avaliar a capacidade de penetração da raiz e propriedades biomecânicas no milho (Chimungu et al., 2015). Além disto, ensaios em ágar e com base em papel de filtro também são utilizados em experimentos de laboratório para avaliar a germinação de sementes e o estabelecimento de plântulas em condição de impedância do substrato (Finch-Savage e Bassel, 2016).

No entanto, a maioria das técnicas utilizadas atualmente para simular os efeitos da compactação do solo em experimentação científica possuem limitações que impedem a obtenção de resultados consistentes, bem como a extrapolação e comparação com outras pesquisas. Torna-se necessário a criação de metodologias mais confiáveis, por meio da padronização de fatores como umidade, textura, estrutura, densidade, tipo de solo, intensidade e frequência de carga aplicada. A uniformidade destes fatores, portanto, permite a avaliação de características fisiológicas e bioquímicas das plântulas para investigar os efeitos da resistência à penetração no estabelecimento da cultura no campo. Estas informações são úteis também para subsidiar a seleção de genótipos mais tolerantes à estas condições para cultivos e em programas de melhoramento de plantas.

Dentre os efeitos provocados pela elevada impedância mecânica do solo, estão as alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas das plantas. Respostas fisiológicas e bioquímicas nas raízes à perturbação mecânica são características adaptativas, que incluem a produção de hormônios e de espécies reativas de oxigênio (Masle, 2002).

O etileno desempenha um papel fundamental na mudança de morfologia e desenvolvimento do sistema radicular durante a impedância mecânica (Okamoto et al., 2008). Este fitohormônio pode controlar a penetração das raízes no solo pela interação com a via de sinalização das auxinas (Santisree et al., 2011). Entretanto, existem poucos estudos sobre a inter-relação entre a biossíntese de etileno e o crescimento da radícula e do hipocótilo para sustentar o estabelecimento das plântulas em condições de elevada resistência à penetração.

Além disso, a ativação dos processos de sinalização do etileno é necessária para a tolerância ao estresse abiótico (Achard et al., 2006; Cao et al., 2007; Zhang et al., 2016), sendo que a biossíntese de etileno é estimulada pela impedância mecânica do solo durante a emergência das plântulas (Zhong et al., 2014). Dessa forma, é bastante provável que o etileno atue como um sinal necessário para o estabelecimento e a sobrevivência de plântulas sob condição de impedância mecânica.

As espécies reativas de oxigênio (EROs) são constantemente produzidas em níveis normais dentro das células, mas em situações de estresse ambiental, as plantas podem aumentar a produção de EROs à níveis tóxicos em diferentes compartimentos celulares, tais como mitocôndrias, cloroplastos e peroxissomos (Bailly, 2004). As EROs são continuamente liberadas pelas plantas como subproduto do metabolismo aeróbico e

podem atuar como moléculas sinalizadoras no processo de defesa da planta, ou como produtos tóxicos que se acumulam sob condições de estresse (Baxter et al., 2013; Choudhury et al., 2017; Mittler, 2017). No entanto, uma característica comum entre os diferentes tipos de EROs é sua capacidade de causar dano oxidativo a proteínas, DNA e lipídios (Gill e Tuteja, 2010).

O acúmulo descontrolado de EROs causa danos oxidativos em várias biomoléculas, culminando em necrose e morte celular (Bailly et al., 2008). No entanto, vários mecanismos enzimáticos são rapidamente acionados visando desintoxicar as células e metabolizar as EROs (Mittler, 2002). A extensão do estresse oxidativo é determinada pelas quantidades de radicais superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e hidroxila (OH^-) produzidos (del Ríó, 2015). Os níveis de EROs dentro das células são controlados pelo sistema antioxidativo, composto por antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos, que são responsáveis por manter estas moléculas em níveis homeostáticos. Dentre as enzimas responsáveis pela eliminação de espécies reativas de oxigênio, destacam-se a superóxido dismutase (SOD), a catalase (CAT) e as peroxidases. Assim, o equilíbrio das atividades das enzimas do sistema antioxidativo é crucial para suprimir os níveis de EROs tóxicos em uma célula.

A superóxido dismutase atua em mitocôndrias, citosol e cloroplastos, catalisa os radicais superóxido em peróxido de hidrogênio e oxigênio. A catalase atua nos peroxissomos transformando o peróxido de hidrogênio em água e oxigênio molecular. A peroxidase do ascorbato é uma enzima que metaboliza o peróxido de hidrogênio utilizando o ascorbato como substrato. E as peroxidases são enzimas da parede celular, citosol e vacúolo, que doam elétrons ao peróxido de hidrogênio para formação de O_2 e água (Gill e Tuteja, 2010). No entanto, não há relatos da atividade destas enzimas em plântulas de soja sob compactação do solo, bem como da influência do vigor das sementes nas respostas das plântulas às estas condições.

O entendimento das respostas das plântulas à estresses abióticos é de grande importância para o melhoramento, engenharia genética e criação de cultivares elites (Pandey, 2015). Assim, é de suma importância a observação dos parâmetros de crescimento, dos índices de emergência, da atuação enzimática e hormonal em plântulas de soja sob impedimento físico.

Portanto, o objetivo do presente trabalho foi propor uma nova metodologia direcionada ao estudo da impedância mecânica na emergência e crescimento de plântulas, bem como avaliar o efeito do vigor das sementes nas respostas fisiológicas e bioquímicas de plântulas de soja sob diferentes níveis de impedância mecânica do substrato.

REFERÊNCIAS

- Achard P, Cheng H, De Grauwe L, Decat J, Schoutteten H, Moritz T, Van Der Straeten D, Peng J, Harberd NP. Integration of plant responses to environmentally activated phytohormonal signals. *science* (80). 2006;311:91–94.
- Ayers PD, Perumpral JV. Moisture and density effect on cone index. *Trans ASAE*. 1981;25:1169–1172.
- Bailly C. Active oxygen species and antioxidants in seed biology. *Seed Sci Res*. Cambridge University Press; 2004;14:93–107.
- Bailly C, El-Maarouf-Bouteau H, Corbineau F. From intracellular signaling networks to cell death: the dual role of reactive oxygen species in seed physiology. *C R Biol*. Elsevier Masson; 2008;331:806–814.
- Batey T. Soil compaction and soil management - A review. *Soil Use Manag*. 2009;25:335–345.
- Baxter A, Mittler R, Suzuki N. ROS as key players in plant stress signalling. *J Exp Bot*. 2013;65:1229–1240.
- Beutler AN, Centurion JF, Centurion MAPDC, Silva AP. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em latossolo vermelho. *Rev Bras Cienc do Solo*. 2006;30:787–794.
- Cao W-H, Liu J, He X-J, Mu R-L, Zhou H-L, Chen S-Y, Zhang J-S. Modulation of ethylene responses affects plant salt-stress responses. *Plant Physiol*. American Society of Plant Biologists; 2007;143:707–19.
- Centurion JF, Aparecida M, Centurion C, Nelson A, Rossini LA, Freddi S, Lucas E, Neto DS. Compactação do solo no desenvolvimento e na produção de cultivares de soja. *Científica*. 2006;34:203–209.
- Chimungu JG, Loades KW, Lynch JP. Root anatomical phenes predict root penetration ability and biomechanical properties in maize (*Zea Mays*). *J Exp Bot*. 2015;66:3151–3162.
- Choudhury FK, Rivero RM, Blumwald E, Mittler R. Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *Plant J*. 2017;90:856–867.

Colombi T, Walter A. Genetic diversity under soil compaction in wheat: root number as a promising trait for early plant vigor. *Front Plant Sci.* 2017;8:1–14.

del Río LA. ROS and RNS in plant physiology: an overview. *J Exp Bot.* 2015;66:2827–2837.

Finch-Savage WE, Bassel GW. Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. *J Exp Bot.* 2016;67:567–591.

Foloni JSS, De Lima SL, Büll LT. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Rev Bras Cienc do Solo.* 2006;30:49–57.

Giarola NFB, Brachtvogel EL, Fontaniva S, Pereira RA, Fioreze ESL. Cultivares de soja sob plantio direto em latossolo vermelho compactado. *Acta Sci - Agron.* 2009;31:641–646.

Gill SS, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol Biochem.* 2010;48:909–930.

Grotta SC, Furlani CEA, Silva RP, Santos L, Cortez JW RG. Cultura da soja em função da profundidade de semeadura e da carga vertical sobre a fileira de semeadura. *Eng Agríc.* 2007;27:487–492.

Hamza MA, Anderson WK. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 2005;82:121–145.

Jin K, Shen J, Ashton RW, White RP, Dodd IC, Phillips AL, Parry MAJ, Whalley WR. The effect of impedance to root growth on plant architecture in wheat. *Plant Soil.* 2015;392:323–332.

Latif N, Khan MA, Ali T. Effects of soil compaction caused by tillage and seed covering techniques on soil physical properties and performance of wheat crop. *Water Resour Res.* 2008;27:185–192.

Lebert M, Horn R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage Res.* 1991;19:275–286.

Lima CLR, Reinert DJ, Reichert JM, Suzuki LEAS. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesq. agropec. bras.* 2010;45:89-98.

Masle J. High soil strength: mechanical forces at play on root morphogenesis and in root plant roots. CRC Press; 2002. p. 807–819.

Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends Plant Sci.* 2002;7:405–10.

Mittler R. ROS are good. *Trends Plant Sci.* 2017;22:11–19.

Modolo AJ, Dedordi GF, Vargas TDO, Baesso MM, Ricardo J, Gonçalves R, Andrade GS, Trogello E. Effect of seed-furrow openers on soybean root growth in compacted Oxisol. 2017;12:1067–1073.

Modolo AJ, Fernandes HC, Schaefer CEG, Silveira JCM da. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. *Ciência e Agrotecnologia.* 2008;32:1259–1265.

Moraes MT de, Debiasi H, Carlesso R, Franchini JC, Silva VR da. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. *Rev Bras Ciência do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo;* 2014;38:288–298.

Okamoto T, Tsurumi S, Shibasaki K, Obana Y, Takaji H, Oono Y, Rahman A. Genetic dissection of hormonal responses in the roots of *Arabidopsis* grown under continuous mechanical impedance. *Plant Physiol.* 2008;146:1651–1662.

Pandey GK. Elucidation of abiotic stress signaling in plants. Pandey GK, organizador. New York, NY: Springer New York; 2015.

Roque AA de O, de Souza ZM, Barbosa RS, de Souza GS. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. *Pesqui Agropecu Bras.* 2010;45:744–750.

Santisree P, Nongmaithem S, Vasuki H, Sreelakshmi Y, Ivanchenko MG, Sharma R. Tomato root penetration in soil requires a coaction between ethylene and auxin signaling. *Plant Physiol.* 2011;156:1424–1438.

Szatanik-Kloc A, Horn R, Lipiec J, Siczek A, Szerement J. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. *Soil Tillage Res. Elsevier;* 2018;175:226–233.

Tracy SR, Black CR, Roberts JA, Mooney SJ. Exploring the interacting effect of soil

texture and bulk density on root system development in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Environ Exp Bot.* Elsevier B.V.; 2013;91:38–47.

Zhang W, Yang G, Mu D, Li H, Zang D, Xu H, Zou X, Wang Y. An ethylene-responsive factor BpERF11 negatively modulates salt and osmotic tolerance in betula platyphylla. *Sci Rep.* 2016;6:23085.

Zhong S, Shi H, Xue C, Wei N, Guo H, Deng XW. Ethylene-orchestrated circuitry coordinates a seedling's response to soil cover and etiolated growth. *Proc Natl Acad Sci.* 2014;111:3913–3920.

CAPÍTULO I

PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA IMPEDÂNCIA MECÂNICA NA EMERGÊNCIA E CRESCIMENTO DE PLÂNTULAS

RESUMO

O intenso trânsito de máquinas e implementos agrícolas impõe ao solo tensões que conferem maior grau de impedância mecânica. Por esta razão, existe a necessidade de desenvolver metodologias que possibilitem maior precisão na avaliação da emergência e crescimento inicial das plântulas sob níveis elevados de compactação do solo para investigar os efeitos deste estresse no estabelecimento da cultura no campo. Esta metodologia poderia também subsidiar a seleção de genótipos para cultivos em programas de melhoramento de plantas. Assim, o objetivo deste trabalho foi propor uma nova metodologia para o estudo dos efeitos da impedância mecânica na emergência e crescimento inicial de plântulas, utilizando-se a soja como cultura modelo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação climatizada, no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 3x4, sendo três níveis de resistência à penetração do substrato (0,15; 0,60 e 0,87 MPa) e quatro cultivares de soja. Após a caracterização fisiológica das sementes pelos testes tradicionais (germinação e vigor), avaliou-se a emergência e características fisiológicas das plântulas de soja sob diferentes níveis de impedância mecânica do substrato crescidas no sistema desenvolvido. Com o sistema, foi possível avaliar o comprimento, área, volume e diâmetro radicular das plântulas de soja. Ainda, o sistema permitiu estimar de forma fácil a porcentagem e velocidade de emergência das plântulas sob aumento da impedância mecânica do substrato. Portanto, a metodologia permite a avaliação dos efeitos da impedância mecânica na emergência e crescimento de plântulas. O aumento da impedância mecânica do substrato não afetou a porcentagem final de emergência das plântulas de soja, porém reduziu a velocidade e a uniformidade deste processo. Houve redução do volume, comprimento, área superficial e matéria seca das raízes, além de aumento no diâmetro radicular das plântulas de soja com o aumento da resistência à penetração. As respostas dos genótipos estão associadas ao vigor das sementes, e a cultivar 1 apresentou melhor desempenho quanto ao estabelecimento de plântulas.

ABSTRACT

Proposal of a methodology for evaluating the effects of mechanical impedance in emergence and seedling growth

The intense traffic of agricultural machinery and implements imposes on the soil tensions that lead to a greater degree of mechanical impedance. For this reason, it is needed to develop methodologies that allow the more precise evaluation of the emergence and initial growth of seedling under high levels of mechanical impedance of the soil to investigate the effects of this stress on the establishment of the crop in the field. This methodology could also assist the selection of genotypes for crops in plant breeding programs. Thus, the objective of this work was to propose a new methodology to study the effects of mechanical impedance on seedling emergence and initial growth, using soybean as a model crop. The experiment was conducted in a greenhouse under a randomized complete block design with four replications. The treatments were arranged in a 3x4 factorial scheme, with three penetration resistance levels of the substrate (0.15, 0.60 and 0.87 MPa) and four soybean cultivars. After the physiological characterization of the seeds by the traditional tests (germination and vigour), the emergence and physiological characteristics of the soybean seedlings grown under different levels of mechanical impedance of the substrate in the developed system were evaluated. Using the system, it was possible to evaluate the length, area, volume and root diameter of the soybean seedlings. Also, the system permitted in easier manner estimate the seedling emergence percentage and speed of seedling emergence under increased mechanical impedance of the substrate. Therefore, the methodology allowed the evaluation of the effects of mechanical impedance on seedling emergence and growth. The increase of the mechanical impedance of the substrate did not affect the final percentage of emergence of the soybean seedlings, but it reduced the speed and the uniformity of this process. There was reduction in the volume, length, surface area and dry matter of the roots, as well as increasing in the root diameter of the soybean seedlings with the increase in penetration resistance. Genotype responses were associated with seed vigour, and cultivar 1 showed better performance regarding seedling establishment.

INTRODUÇÃO

A impedância mecânica está ligada às propriedades físicas do solo e indica o grau de compactação nos sistemas agrícolas. A redução da porosidade total, da taxa de difusão de oxigênio, bem como o aumento da densidade, da resistência física e alterações nos parâmetros hídricos, são características de solos com elevada impedância mecânica (Romero et al., 2014).

O intenso trânsito de máquinas e implementos agrícolas na área de cultivo impõe ao solo tensões que conferem maior grau de impedância mecânica, resultando no aumento da densidade do solo devido à redução do espaço poroso, principalmente dos macroporos. Reduções significativas dos espaços porosos, com redução da continuidade, número e tamanho dos poros, além de limitar a difusão de gases, são responsáveis pelo aumento da resistência à penetração das raízes. Neste caso, observa-se maiores decréscimos no volume de macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados. A distribuição e o tamanho dos poros influenciam diretamente a capacidade de retenção, infiltração, drenabilidade e aeração do solo. A quantidade de água disponível é reduzida, o que leva à menor absorção de água e nutrientes, prejudica o crescimento radicular e compromete o desenvolvimento e produtividade da cultura (Nawaz et al., 2013; Romero et al., 2014).

Esse adensamento das camadas superficiais e subsuperficiais pode variar consideravelmente com a umidade, textura, estrutura, teor de matéria orgânica do solo e frequência de cultivo (Lebert e Horn, 1991; Lipiec e Hatano, 2003). Durante as operações de manejo do solo e semeadura são aplicadas forças que afetam a resistência do solo à penetração, estabelecendo dificuldade de crescimento do sistema radicular das plantas. Esta resistência ocorre pela compressão e fricção entre partículas primárias e agregados, que geralmente aumenta proporcionalmente com a densidade, e decresce com a umidade do solo, visto que a água não pode ser comprimida. Os níveis críticos de resistência à penetração variam de acordo com o tipo de solo e a espécie cultivada (Groenevelt et al., 1984; Richart et al., 2005; Suzuki et al., 2007; Mazurana et al., 2011; Patto Pacheco e Ramon Barros Cantalice, 2011). Assim, à medida que os solos são submetidos ao uso agrícola, as propriedades físicas sofrem alterações geralmente desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal. Os efeitos dependem de uma série de fatores que irão interferir no crescimento das plantas e estabelecimento da cultura no campo.

A maioria das técnicas utilizadas atualmente para simular os efeitos da compactação do solo em experimentação científica possuem limitações que impedem a obtenção de resultados consistentes, o que torna necessário a criação de metodologias mais confiáveis. Muitos trabalhos envolvem a passagem de máquinas agrícolas ou rolos compactadores sobre uma determinada área, sendo que cada passada resulta em diferentes níveis de impedimento físico do solo (Beutler et al., 2006; Grotta et al., 2007; Latif et al., 2008; Modolo et al., 2008; Giarola et al., 2009; Roque et al., 2010). Diferentes níveis de resistência à penetração também podem ser obtidos por meio da utilização de colunas de PVC, preenchidas com solo, por meio da técnica de compressão (Colombi e Walter, 2017). Ensaio de compactação do solo em vasos também são utilizados para avaliar os efeitos da impedância no desenvolvimento das culturas (Centurion et al., 2006). Além do uso de vasos montados com anéis (normalmente em número de três) de PVC sobrepostos, unidos com fita adesiva de plástico e fechados ao fundo. O solo umedecido do anel intermediário é submetido a uma prensa hidráulica que, pela variação de volume do solo compactado, permite atingir níveis de compactação desejados (Foloni et al., 2006).

Todos estes métodos descritos anteriormente possuem limitações que comprometem os resultados e as respostas de cada genótipo, dependendo das condições do ambiente e do substrato. A umidade, textura, estrutura, frequência da carga aplicada interferem nos resultados e podem impedir a expressão do genótipo sob estresse de compactação. Assim, é difícil a padronização destas variáveis que podem comprometer a confiabilidade dos resultados obtidos, além de dificultar a comparação com outras pesquisas e realizar extrapolações e recomendações para diferentes áreas de cultivo.

Neste sentido, existe a necessidade de desenvolver metodologias que possibilitem a avaliação de maior número de plântulas de forma simultânea, com estimativa mais fácil da emergência, uniformidade de emergência das plântulas e efeitos nas raízes sob aumento da impedância mecânica. Do mesmo modo, são interessantes metodologias que permitam a avaliação de características morfológicas das plântulas para investigar os efeitos da impedância mecânica no estabelecimento da cultura no campo, além de subsidiar a seleção de genótipos para cultivos e em programas de melhoramento de plantas.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi propor uma nova metodologia para o estudo dos efeitos da impedância mecânica na emergência e crescimento de plântulas, utilizando-se a soja como cultura modelo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação climatizada, com controle de temperatura (25 °C), na área experimental Diogo Alves de Mello da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG. Sementes de quatro cultivares de soja foram utilizadas.

Os lotes de sementes de cada cultivar foram caracterizados quanto à qualidade fisiológica por meio da determinação do teor de água, germinação, primeira contagem de germinação, emergência de plântulas, índice de velocidade de emergência, envelhecimento acelerado e condutividade elétrica, seguindo a descrição:

Teor de água (TA)

Duas repetições de 50 sementes de cada lote foram avaliadas, utilizando o método da estufa a $105\pm 3^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas (BRASIL, 2009). Os resultados foram expressos em porcentagem de base úmida (% b.u.).

Germinação (G)

O teste foi conduzido com quatro repetições de 50 sementes. As sementes foram previamente tratadas com fungicida Derosal[®] de acordo com a recomendação do fabricante. A semeadura foi realizada sobre papel toalha do tipo *Germitest* umedecido com água destilada na quantidade equivalente a 2,5 vezes o peso do substrato seco. Em seguida, foram confeccionados rolos, que foram mantidos em germinador regulado a 25 °C. As avaliações do número de plântulas normais foram realizadas no oitavo dia após o início do teste (BRASIL, 2009). Os dados foram expressos em porcentagem.

Primeira contagem do teste de germinação (PC)

Foi realizado juntamente com o teste de germinação, segundo as Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 2009). No quinto dia após a semeadura, o número de plântulas normais foi contabilizado e os dados foram expressos em porcentagem.

Envelhecimento acelerado (EA)

Caixas plásticas tipo *gerbox* (11 x 11 x 3 cm) foram utilizadas no teste. Aproximadamente 100% de umidade relativa (UR) no interior dessas caixas foi obtida pela adição de 40 mL de água destilada ao fundo de cada caixa plástica. As sementes foram previamente tratadas com fungicida Derosal[®], de acordo com a recomendação do fabricante e distribuídas na superfície da tela metálica mantida no interior de cada caixa plástica, constituída de camada única, tomando toda a superfície da tela metálica, independentemente do número e do peso das sementes. As amostras foram mantidas no interior da câmara, a 42 °C por 48 horas. Após este período, as sementes envelhecidas foram submetidas ao teste de germinação, conforme descrito anteriormente. O resultado consistiu na porcentagem de plântulas normais aos cinco dias após o início do teste de germinação (Dutra e Daiton Vieira, 2004).

Emergência de plântulas (EP)

Quatro repetições de 50 sementes foram tratadas previamente com fungicida Derosal[®], de acordo com a recomendação do fabricante. Utilizou-se bandejas de isopor (28,5x18,5x10,0 cm) contendo como substrato a mistura de areia e solo na proporção 2:1. A semeadura foi realizada a 2 cm de profundidade, e as irrigações foram feitas sempre que necessário para manutenção da umidade do solo próximo à capacidade de campo. As bandejas foram mantidas em câmara de crescimento vegetal a 25 °C com regime diário de 12 horas de luz. Foram realizadas contagens diárias do número de plântulas emergidas até a estabilização da emergência. O resultado foi expresso em porcentagem. Com os dados das contagens diárias, foi calculado o índice de velocidade de emergência (IVE), segundo a fórmula proposta por (Maguire, 1962).

Condutividade elétrica (CE)

Quatro repetições de 50 sementes foram pesadas e colocadas em copos plásticos contendo 75 ml de água destilada. Logo após a montagem do teste, as amostras foram mantidas em germinador, a 25 °C, por 24 horas. Após este período, foi efetuada a leitura da condutividade da solução, utilizando-se um condutivímetro, modelo DM 31 Digimed[®]. Os resultados foram expressos em $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$ de sementes (Vieira, 1999).

Sistema para avaliação do efeito da compactação do substrato na germinação e emergência de plântulas

Para o experimento, foi desenvolvido um sistema para simular os efeitos da compactação do solo (Figura 1). A soja foi escolhida para validação da metodologia que, com alguns ajustes, é aplicável a qualquer espécie. A concepção do sistema é para permitir a avaliação da resposta de sementes e plântulas à condição de impedimento físico do substrato ao simular diferentes níveis de impedância no momento da emergência das plântulas. O princípio do sistema baseia-se no comportamento da areia, que quando submetida à aplicação de uma força (peso), reproduz, sem deformação de suas partículas, um nível de compactação. Diferentes forças (pesos) podem ser utilizadas para simular diferentes valores de impedância mecânica.

O sistema consistiu na utilização de um recipiente (bandeja) com dimensão 515 x 300 x 95 mm (comprimento, largura e altura, respectivamente), superior ao diâmetro do cano/tubo que foi colocado no seu interior, e uma coluna de PVC de 200 mm de diâmetro e 200 mm de altura (Figura 1). Ambos, bandeja e coluna de PVC foram preenchidos com areia (substrato) com granulometria padronizada (> 1 mm = 20%; 1-0,5 mm = 39% e < 0,5 mm = 41%). A coluna de PVC foi inserida dentro da bandeja, na posição vertical, sendo que no fundo da coluna foi colocado um tecido telado (organza) que impede o vazamento de areia. Para o umedecimento da areia dentro do cano, foi adicionado água à bandeja até a saturação da areia no recipiente, que por capilaridade fica disponível para absorção pelas raízes das plântulas. Na superfície da coluna foi inserido um disco metálico de 190 mm de diâmetro, perfurado, contendo 25 orifícios (2 cm de diâmetro cada orifício), sobre o centro do qual foi disposto um objeto (bloco de concreto) de massa (peso) padronizada para simular diferentes níveis de impedância física.

Três níveis de impedância mecânica do substrato foram avaliados de acordo com os tratamentos de 0 (controle), 13 e 26 kg que aplicam, respectivamente, uma pressão de 0, 6 e 12 MPa. Para determinação da pressão proporcionada pelos pesos, utilizou-se a equação $P = \frac{F}{A_e} = \left[\frac{m * a}{A_{(d)} - A_{(o)}} \right] / 1000$. Em que, P : pressão aplicada (MPa); F : força aplicada (kgf); A_e : área onde a força atua efetivamente (m²); m : massa (kg); a : aceleração (m/s²); $A_{(d)}$: Área do disco (m²); $A_{(o)}$: Área ocupada pelos orifícios do disco (m²).

Para avaliar a resistência à penetração das raízes imposta pelos tratamentos, foi utilizado o Penetrômetro de Solos Automatizado – TE-096, da marca Tecnal®. Foi

utilizada uma haste com 4 mm de diâmetro, com velocidade de penetração de 0,2 mm/s. A leitura foi realizada até 100 mm de profundidade. Foram obtidos valores de resistência à penetração em unidade de pressão (MPa) em diferentes profundidades (máximo 100 mm de profundidade). O valor máximo de compactação foi utilizado para análise instantânea (em MPa). Os dados de resistência à penetração (MPa) foram plotados em um gráfico de acordo com a profundidade (mm).

Para a semeadura, as sementes foram previamente tratadas com fungicida Derosal[®] de acordo com a recomendação do fabricante. A semeadura ocorreu após o umedecimento da areia, em profundidade de 2 cm, e foi realizada de forma a garantir a coincidência do local de semeadura e emergência das plântulas com os orifícios do disco. Após a semeadura, foi colocado o objeto de massa conhecida (peso) sobre o disco para proporcionar a aplicação da força e garantir o aumento da impedância mecânica. Após a emergência das plântulas de soja no sistema, sete dias após a semeadura, o experimento foi desmontado.

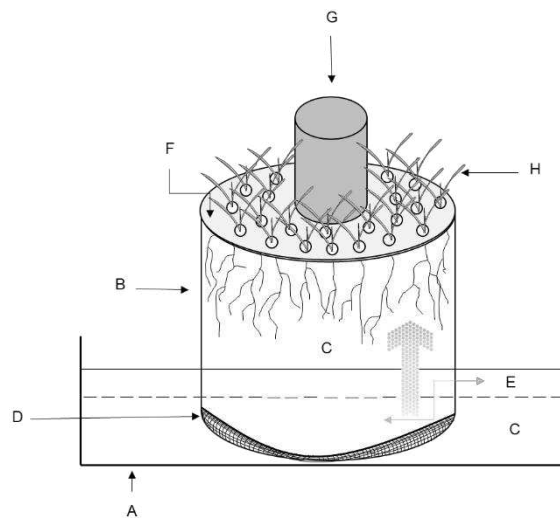


Figura 1. Sistema para seleção de genótipos de plantas tolerantes à compactação do solo, constituído por: (A) bandeja de plástico; (B) cano de PVC; (C) areia; (D) tecido telado; (E) água; (F) disco de metal perfurado; (G) objeto de peso conhecido e (H) sementes/plântulas.

O sistema desenvolvido com o presente estudo (Figura 1) permitiu simular diferentes níveis de impedância mecânica no momento da emergência das plântulas. Tratamentos de 0 (controle), 6 e 12 MPa proporcionaram, respectivamente, uma resistência à penetração máxima de 0,15 MPa (baixa), 0,60 MPa (moderada) e 0,87 (alta) MPa. Estes valores foram obtidos no sétimo dia após a semeadura, o que corresponde ao período final de condução do experimento (Figura 2), uma vez que a impedância mecânica aumentou com o tempo pela própria acomodação do substrato (Figura 3). Os valores encontrados para o impedimento mecânico são próximos aos obtidos por Coelho Filho et al. (2013a) e Jin et al. (2015), ao utilizarem um peso de 17 kg sobre um substrato de areia, que proporcionou uma resistência ao penetrômetro de aproximadamente 0,75 MPa, valor considerado de elevada impedância mecânica para a emergência das plântulas, pois afeta os parâmetros de crescimento de parte aérea e sistema radicular. Os mesmos autores obtiveram 0,19 MPa no tratamento controle, valor considerado de baixa impedância mecânica para emergência de plântulas, proporcionada pela acomodação natural das partículas de areia.

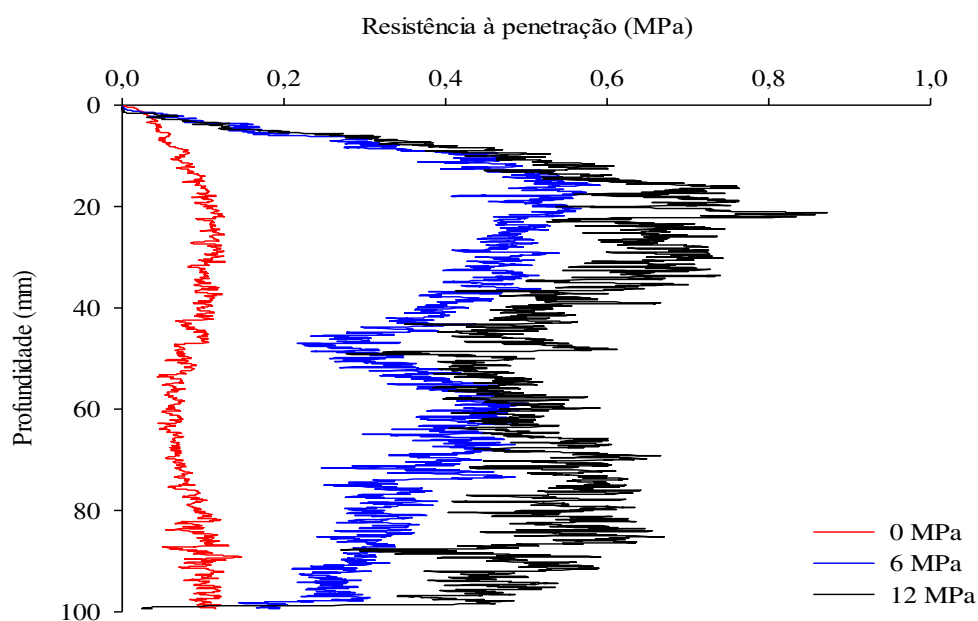


Figura 2. Valores de resistência à penetração em função da profundidade, obtidos com os pesos de 0, 13 e 26 kg, para simular diferentes níveis de impedância mecânica do substrato aos sete dias após a semeadura

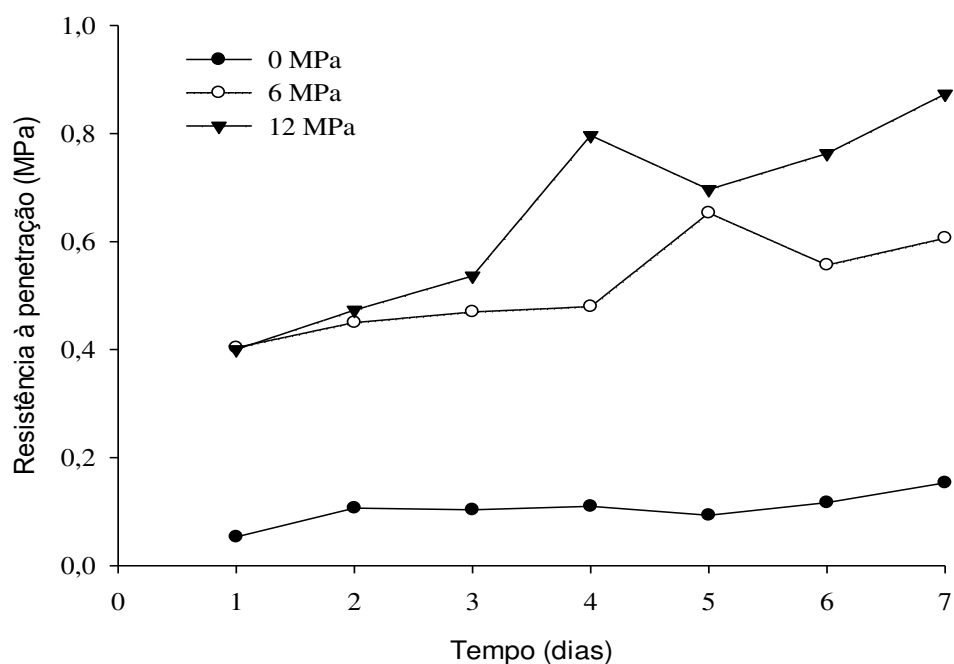


Figura 3. Valores máximos de resistência à penetração ao longo do tempo, obtidos com os pesos de 0, 13 e 26 kg, para simular diferentes níveis de impedância mecânica do substrato.

Emergência das plântulas

Durante a condução do experimento, avaliou-se a emergência (ISTA, 2015) e índices relacionados à emergência das plântulas de soja, tais como índice de velocidade de emergência (Maguire, 1962), coeficiente de velocidade de emergência (Nichols, 1968), tempo gasto para 10%, 50% e 90% de emergência (Farooq et al., 2005), uniformidade de emergência (Demilly, 2014), sincronia de emergência (Primack, 1980) e tempo médio de emergência (Labouriau, 1983). Contagens diárias do número de plântulas emergidas foram realizadas até sete dias após a semeadura, quando ocorreu a estabilização do número de plântulas emergidas (considerando-se emergidas aquelas que apresentaram os cotilédones expostos). Os dados foram analisados por meio do *SeedCalc*, pacote do software R (Silva et al., 2018). Ao final, o experimento foi desmontado e as plântulas foram coletadas para análise em laboratório.

Crescimento de plântulas

Para esta análise, foi coletada uma amostra de 15 plântulas por repetição de cada tratamento. Estas foram avaliadas, de maneira não destrutível, quanto às características do sistema radicular, por meio de análise utilizando-se o software WinRhizo[®], comprimento de plântulas, por meio de análise de imagens no software ImageJ[®], e, em último momento, de forma destrutível para avaliação da matéria seca. Essas análises foram realizadas de acordo com as seguintes descrições:

Caracterização do sistema radicular

Após o processo de lavagem, as plântulas foram separadas em sistema radicular e parte aérea na altura do coleto. As raízes lavadas foram armazenadas em frascos contendo solução de etanol 40%, para evitar sua desidratação. Para a análise da morfologia do sistema radicular foi utilizado o sistema WinRHIZO Pro 2007a (Régent Instr. Inc.), acoplado a um scanner profissional Epson XL 10000 equipado com unidade de luz adicional (TPU). Uma definição de 400 (dpi) foi utilizada para as medidas de morfologia de raiz, como descrito por Bauhus e Messier (1999). As raízes foram dispostas em uma cuba de acrílico de 30 cm de largura por 40 cm de comprimento, contendo água. As características avaliadas foram: comprimento total de raiz (cm), área superficial total de raiz (cm²), volume total de raiz (cm³) e diâmetro médio de raiz (mm).

Comprimento de plântulas

A mensuração do comprimento das plântulas foi realizada por meio de análise de imagens. As plântulas foram dispostas sobre uma folha de espuma vinílica acetinada (EVA) azul, tamanho A3, mantendo-as paralelas entre si, evitando sobreposição de plântulas ou de suas partes. As imagens foram capturadas através de uma câmera fotográfica com resolução de 13 MP, e assim, foi criado um banco de imagens no computador. Para o processamento das imagens foi utilizado o software ImageJ[®]. O comprimento total de cada plântula foi avaliado. Os resultados foram expressos em cm plântula⁻¹.

Matéria seca

Para a determinação da matéria seca, as raízes e a parte aérea das plântulas foram acondicionadas em saco de papel e, em seguida, secas em estufa com circulação forçada de ar, regulada a 65 °C, onde permaneceram por aproximadamente 72 horas. A pesagem das amostras foi realizada em balança analítica, com precisão de quatro casas decimais. Os resultados foram expressos em mg plântula⁻¹.

Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 3x4, sendo três níveis de resistência à penetração (0,15; 0,60 e 0,87 MPa) e quatro cultivares de soja. O estudo foi dividido em duas etapas, sendo que cada etapa consistiu na condução de duas repetições.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, e quando a interação entre níveis de vigor e níveis de impedância foi significativa ($p < 0,05$), procedeu-se o desdobramento. As médias foram comparadas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Para as análises foi utilizado o pacote “ExpDes.pt” do programa R (Ferreira et al., 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de água foi semelhante entre as sementes das cultivares, sendo obtidos valores de aproximadamente 12% (Tabela 2). Segundo Marcos-Filho (2016), a uniformidade deste parâmetro é de suma importância, pois diferenças maiores que dois pontos percentuais no teor de água comparando-se diferentes lotes podem afetar a confiabilidade dos resultados dos testes de vigor, visto que é uma característica que influencia a velocidade de absorção de água pelas sementes.

Tabela 2. Avaliação das características das sementes de quatro cultivares de soja.

Cultivar	TA	G	PC	EA	EP	IVE	CE
	%						$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$
1	12,9	95 a	89 a	89 a	96 ab	1,13 a	61,56 a
2	12,6	84 bc	79 ab	70 b	92 ab	1,03 a	57,59 a
3	11,8	92 ab	90 a	88 a	97 a	1,15 a	65,07 a
4	12,0	81 c	74 b	66 b	88 b	1,01 a	62,40 a
CV (%)	0,75	5,64	6,49	7,60	4,37	6,28	7,19

* Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Teor de água (TA); Germinação (G); Primeira contagem do teste de germinação (PC); Envelhecimento acelerado (EA); Emergência de plântulas (EP); Índice de velocidade de emergência (IVE) e Condutividade elétrica (CE). CV = coeficiente de variação.

As cultivares 1 e 3 apresentaram maior porcentagem de germinação das sementes, seguidas pelas cultivares 2 e 4 (Tabela 2). No entanto, verifica-se que todas as cultivares atingiram valores acima de 80% de germinação, que é o padrão mínimo para a comercialização de sementes de soja no Brasil (BRASIL, 2013).

Os resultados obtidos para os testes de vigor apresentaram a mesma tendência obtida para o teste de germinação. As sementes das cultivares 1 e 3 apresentaram maior vigor, seguido das sementes das cultivares 2 e 4 (Tabela 2). Por outro lado, não foram observadas diferenças significativas para os dados obtidos no teste de condutividade elétrica e no índice de velocidade de emergência.

Na avaliação da emergência e índices relacionados à emergência das plântulas, não houve interação significativa entre os níveis de resistência à penetração e as cultivares de soja (Figuras 4, 5 e 6). Não houve diferença na porcentagem final de emergência (Figura 4), no tempo gasto para 10% de emergência (Figura 5) e no índice de uniformidade de emergência das plântulas (Figura 6) com o aumento da resistência à penetração. Porém, houve redução do índice de velocidade de emergência e do coeficiente de velocidade de emergência (Figura 4), maior tempo gasto para emergência de 50% e

90% das plântulas (Figura 5), e da sincronia de emergência (Figura 6); além de aumento no tempo médio de emergência (Figura 6), com o aumento dos níveis de impedância. Portanto, o aumento impedância mecânica do substrato não teve efeito sobre a porcentagem final de emergência das plântulas, porém reduziu a velocidade e a uniformidade deste processo.

Na comparação entre cultivares, no geral, a cultivar 1 apresentou, em resposta à compactação, maior porcentagem de emergência, índice de velocidade de emergência e coeficiente de velocidade de emergência de plântulas (Figura 4), além de menor tempo gasto para 10%, 50% e 90% de emergência (Figura 5) e tempo médio de emergência (Figura 6). Não houve diferença significativa entre as cultivares quanto ao índice de uniformidade de emergência e sincronia de emergência das plântulas (Figura 6).

A cultivar 2 se destacou com o pior desempenho pelos dados de IVE, CVE (Figura 4) e tempo para emergência (T10, T50 e T90) (Figura 5), enquanto para as cultivares 3 e 4 foram obtidos valores intermediários. Assim, infere-se que a cultivar 2 é a mais sensível ao impedimento físico do substrato.

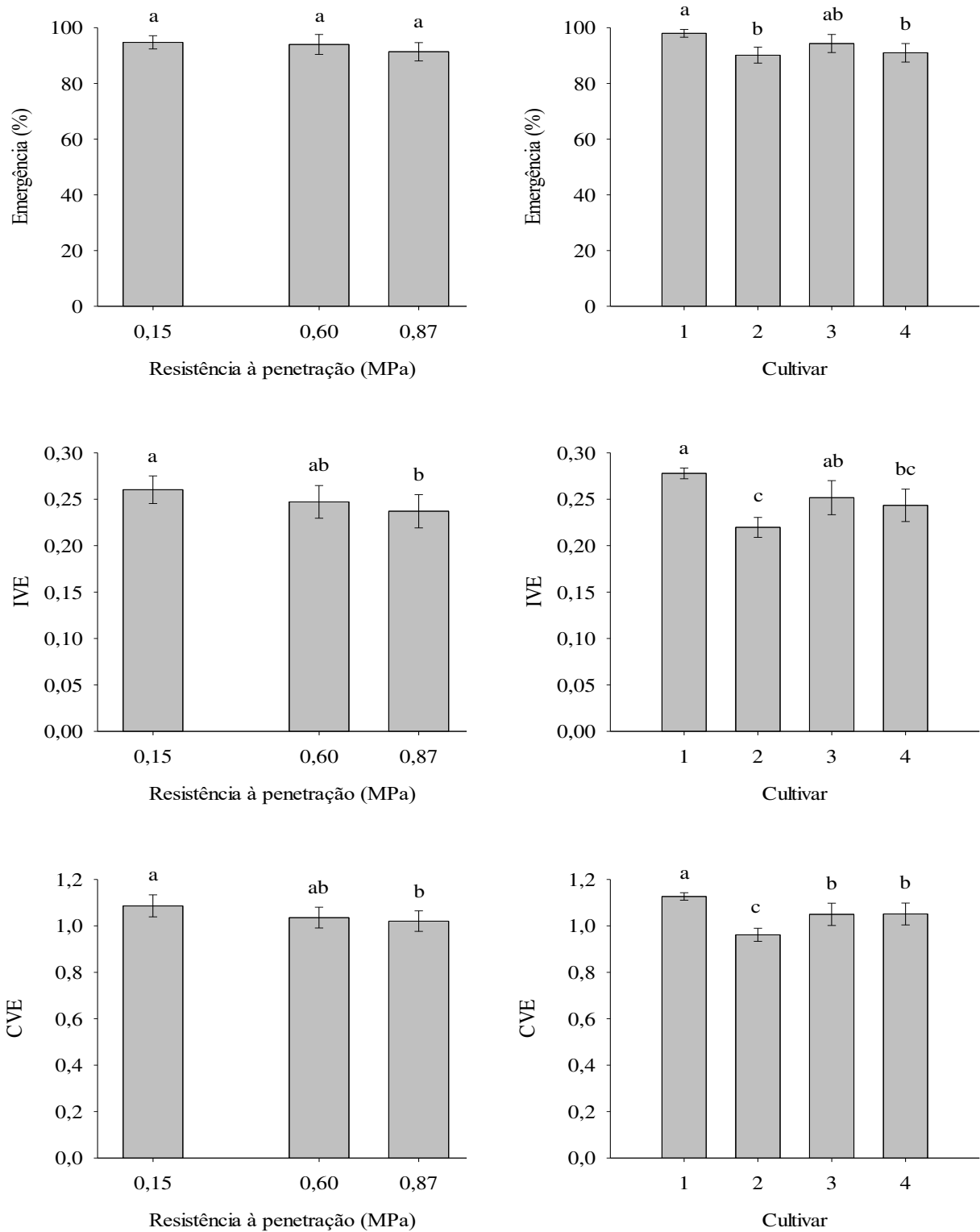


Figura 4. Emergência, Índice de velocidade de emergência (IVE) e Coeficiente de velocidade de emergência (CVE) de plântulas de soja sob impedância mecânica. As barras representam o erro padrão da média (n=4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

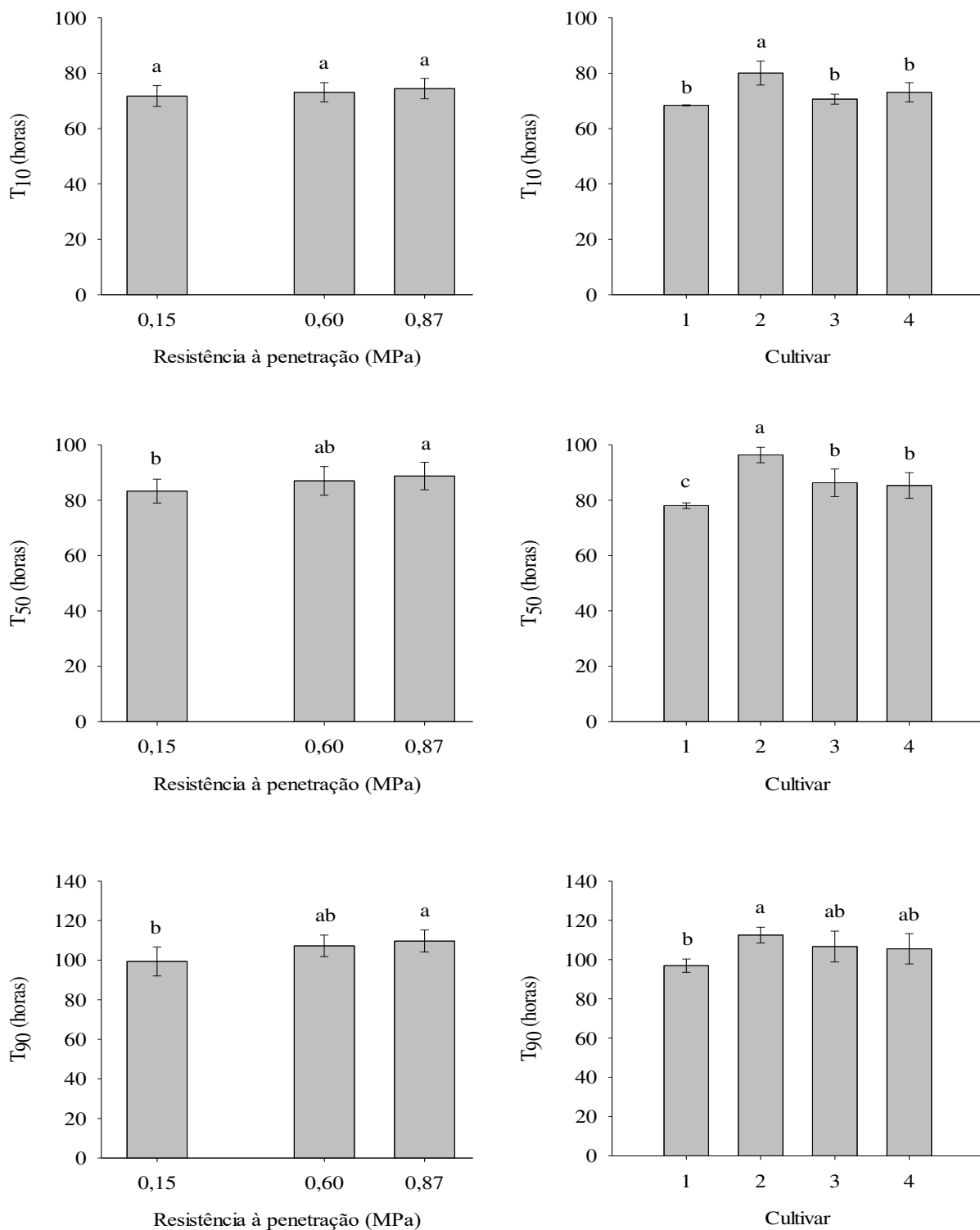


Figura 5. Tempo gasto para 10% de emergência (T₁₀), Tempo gasto para 50% de emergência (T₅₀) e Tempo gasto para 90% de emergência (T₉₀) de plântulas de soja sob impedância mecânica. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

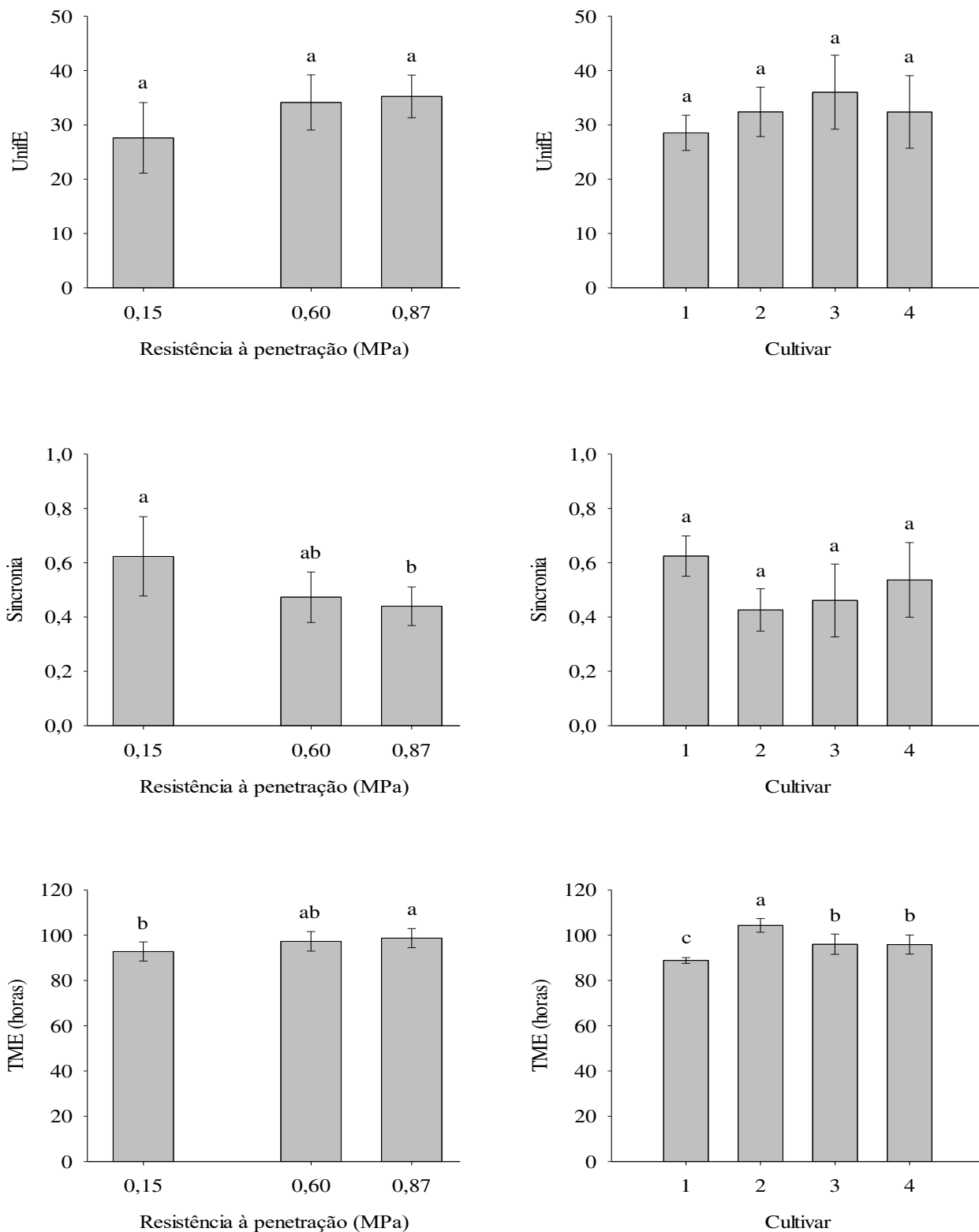


Figura 6. Índice de uniformidade de emergência (UnifE), Sincronia de emergência (Sinc) e Tempo médio de emergência (TME) de plântulas de soja sob impedância mecânica. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

A metodologia utilizada neste estudo (Figura 1) apresentou capacidade de avaliação simultânea de várias plântulas em um único sistema, o que foi possível pela utilização de um disco perfurado, com 25 furos (que pode ser alterado para atender as especificidades da espécie que se deseja trabalhar). Com os dados obtidos foi possível calcular a porcentagem e a uniformidade de emergência das plântulas, que são informações importantes, principalmente em se tratando de melhoramento de plantas em que se busca o desenvolvimento de genótipos com maior tolerância à solos pesados ou compactados. Neste contexto, genótipos com maior porcentagem e uniformidade de emergência podem ser mais facilmente selecionados com a utilização do sistema, facilitando o *screening* de cultivares mais adequadas à determinada realidade.

Outros sistemas experimentais são utilizados na investigação do efeito da impedância mecânica sobre o crescimento das plantas. Alguns também utilizam a compressão da areia, através de objeto de peso conhecido, o que aumenta a resistência à penetração do ambiente de crescimento radicular das plantas (Coelho Filho et al., 2013b; Jin et al., 2015). No entanto, estes sistemas preconizam a avaliação de apenas uma planta, o que não permite a obtenção de parâmetros de porcentagem, velocidade e uniformidade de emergência, para os quais se requer maior número de sementes/plântulas por repetição.

Outros métodos já foram utilizados para avaliar as respostas de plântulas à compactação utilizando diferentes pesos sobre areia para obtenção de forças que resultaram no aumento da impedância. Geralmente utiliza-se uma adaptação da técnica de carga morta proposta por (Collis-George e Yoganathan, 1985), desenvolvida para estudar o crescimento de plantas de trigo sob diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. Para isso, níveis de estresse físico são aplicados em areia por meio de objetos de diferentes massas. Whalley et al. (1999) utilizaram este método para avaliar as respostas de plântulas de cenoura e cebola à impedância mecânica do substrato e ao estresse hídrico. Entretanto, foram utilizadas poucas plântulas por unidade experimental, necessitando de grande número de recipientes e repetições para coleta dos dados. Com a metodologia proposta neste estudo, é possível a avaliação de maior número de plântulas de forma simultânea, com estimativa mais fácil da emergência e uniformidade de emergência das plântulas sob impedância mecânica do substrato.

Na avaliação morfológica das raízes das plântulas sob impedância mecânica, não se verificou interação significativa entre os níveis de resistência à penetração e as cultivares de soja para volume do sistema radicular (Figura 7). Entretanto, interação

significativa foi verificada para comprimento, área e diâmetro do sistema radicular (Figura 8).

O aumento da impedância mecânica proporcionou redução de 30% no volume total de raízes das plântulas, mas não houve diferenças significativas entre as cultivares (Figura 7). Todas as cultivares apresentaram redução do comprimento e da área superficial total de raiz, além de maior espessamento do sistema radicular com o aumento da impedância mecânica (Figura 8). Comparando-se as cultivares dentro de cada nível de resistência à penetração, observa-se que no tratamento controle a cultivar 1 apresentou maior comprimento total de raiz, e menor comprimento foi verificado na cultivar 4, a qual também apresentou menor área superficial total. Nas impedâncias de 0,60 e 0,87 MPa, as cultivares não diferiram significativamente entre si para comprimento e área superficial total de raiz. Em baixa resistência à penetração (0,15 MPa), verificou-se maior diâmetro radicular na cultivar 4 e menor espessamento foi observado nas cultivares 3 e 1. Em moderada resistência à penetração, cultivares 2 e 3 apresentaram maior diâmetro médio de raiz. Já em alta resistência à penetração, maior espessamento foi observado nas cultivares 3, 4 e 2.

Em resumo, o aumento da resistência à penetração reduziu em média 75% o comprimento total, 63% a área superficial total das raízes e aumentou 45% o diâmetro radicular da cultivar 3. Para a cultivar 1, foi observada redução de 59% no comprimento e 45% na área das raízes, além de aumento de 44% do diâmetro radicular. A cultivar 2 apresentou redução, respectivamente, de 57% e 43% do comprimento e área das raízes, e aumento de 46% do diâmetro radicular. Já a cultivar 4 apresentou redução de 27% do comprimento e área das raízes, e aumento de apenas 0,9% no diâmetro radicular.

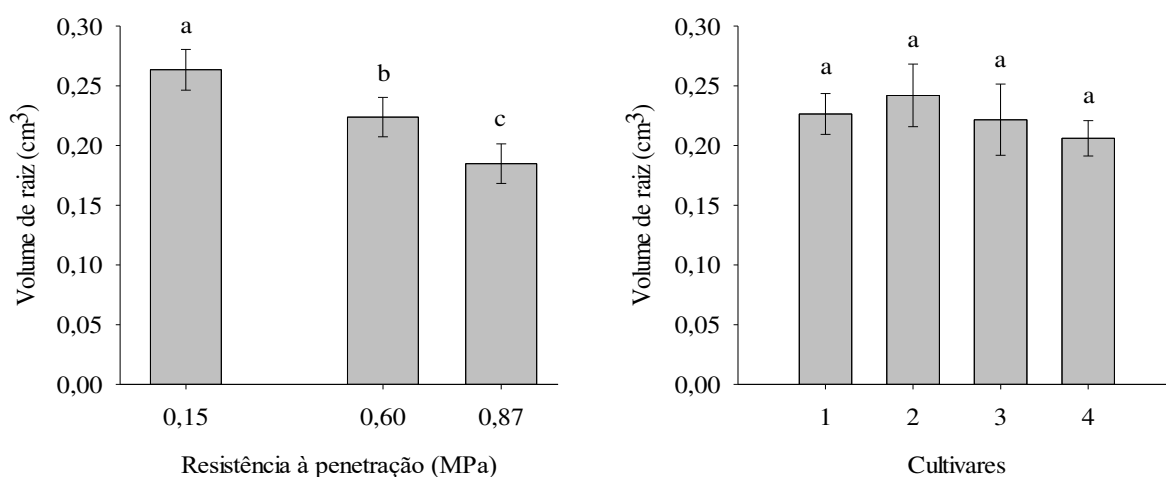


Figura 7. Médias do volume total das raízes por plântulas de soja de quatro cultivares submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

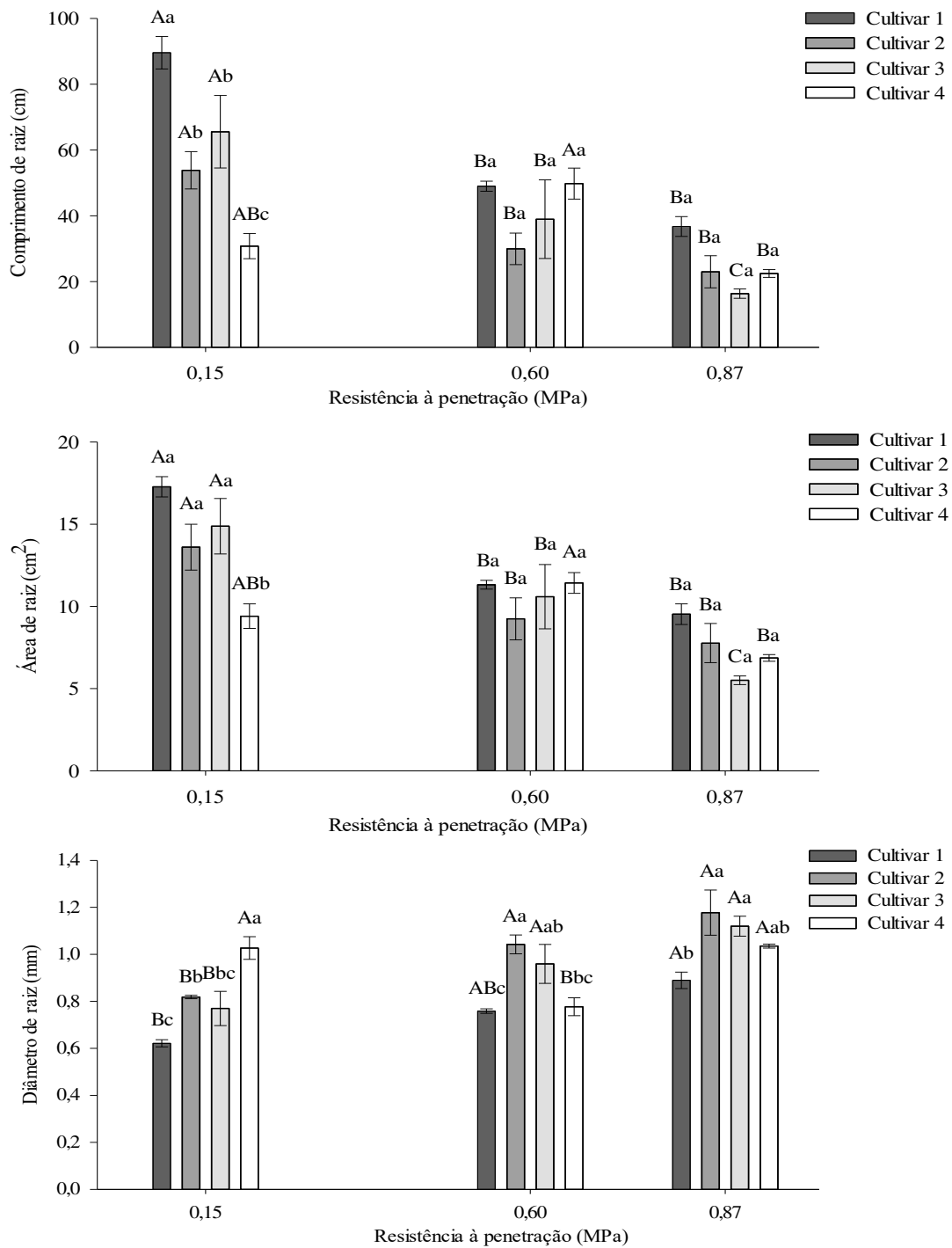


Figura 8. Comprimento total de raízes, área superficial total de raízes e diâmetro médio total de raízes por plântulas de soja de quatro cultivares submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas comparam entre os níveis de resistência à penetração e letras minúsculas comparam entre cultivares.

Em resposta ao aumento do nível de impedância, os sistemas radiculares das plântulas da soja evidenciaram variabilidade na forma resultante do comprimento da raiz e da distribuição das raízes laterais (Figuras 7 e 8). Resultados semelhantes foram encontrados por Ramos et al. (2018) em estudos de compactação com três valores de resistências do solo (< 0,1 MPa, 0,5 MPa e 3,5 MPa) e verificaram menor comprimento total de raízes, menor número de raízes laterais e maior diâmetro radicular de plantas de soja com aumento da compactação. O crescimento dos sistemas radiculares também foi sensível à impedância mecânica do solo mesmo em níveis de resistência inferiores a 1 MPa.

Alterações fisiológicas, durante o crescimento das plântulas, que favorecem sua adaptação sob condições de alta resistência do solo, são características importantes para a seleção de cultivares ou práticas de manejo do solo. Elevada impedância mecânica do solo proporciona mudanças estruturais nas raízes que podem ser utilizadas para caracterizar os sistemas radiculares de plantas que crescem em solo compactado (Bennie, 1996).

A compactação causa redução da porosidade do solo e da conectividade dos poros (Chen et al., 2014), resultando em aumento da resistência à penetração (Hernandez-Ramirez et al., 2014; Kuncoro et al., 2014). A capacidade das raízes de localizar fissuras e canais no solo é uma característica potencialmente muito relevante para a penetração em condição de impedância mecânica, aspecto importante em termos de desenvolvimento de uma técnica de seleção de campo (McKenzie et al., 2009). Esta é uma área relativamente pouco pesquisada, e há evidências de diferenças varietais para características hereditárias (Massa e Gilroy, 2003). Novos métodos de triagem são necessários para auxiliar no desenvolvimento de cultivares que possam utilizar melhor os canais pré-existentes. Assim, a metodologia utilizada nesta pesquisa (Figura 1) permitiu isolar os fatores do ambiente que poderiam interferir nos resultados, incluindo a utilização da areia como substrato, que não possui estrutura definida, e permitiu a padronização da porosidade no sistema. Isto destacou as respostas dos genótipos, associados à qualidade das sementes, sob condição de impedância mecânica.

Metodologias que permitam avaliar a variação fenotípica para arquitetura das raízes podem ajudar a identificar pais adequados e mapear população para seleção assistida por marcadores e melhoramento molecular. Este *screening* permitiria a marcação molecular, facilitaria a reprodução de características relacionadas à raiz,

possibilitaria o desmembramento de mecanismos moleculares e sistemas de sinalização entre genótipos de soja com características contrastantes de crescimento radicular (Manavalan et al., 2010).

Na figura 9 observa-se que não houve interação significativa entre os níveis de resistência à penetração e as cultivares de soja para comprimento total de plântula e da parte aérea, mas interação significativa foi observada com relação ao comprimento da raiz principal.

O comprimento total das plântulas de soja reduziu com o aumento do impedimento físico do substrato, embora não tenha sido observado diferenças significativas entre a moderada (0,60 MPa) e alta resistência à penetração (0,87 MPa) (Figura 9). A cultivar 1 destacou-se por apresentar maior comprimento de plântulas em relação aos demais genótipos avaliados. O comprimento da parte aérea das plântulas não foi influenciado pelos níveis de impedância, entretanto, maiores e menores valores foram observados nas cultivares 3 e 2, respectivamente. As cultivares tiveram redução do comprimento da raiz principal com o aumento da impedância. Entre as cultivares avaliadas, a cultivar 4 apresentou menor comprimento da raiz principal nos níveis de resistência à penetração, juntamente com a cultivar 2 (0,15 MPa) e cultivar 3 (0,60 MPa). Com o aumento dos níveis de impedância, houve redução de 60% do comprimento radicular da cultivar 4, e de 52%, 39% e 35% das cultivares 3, 2 e 1, respectivamente.

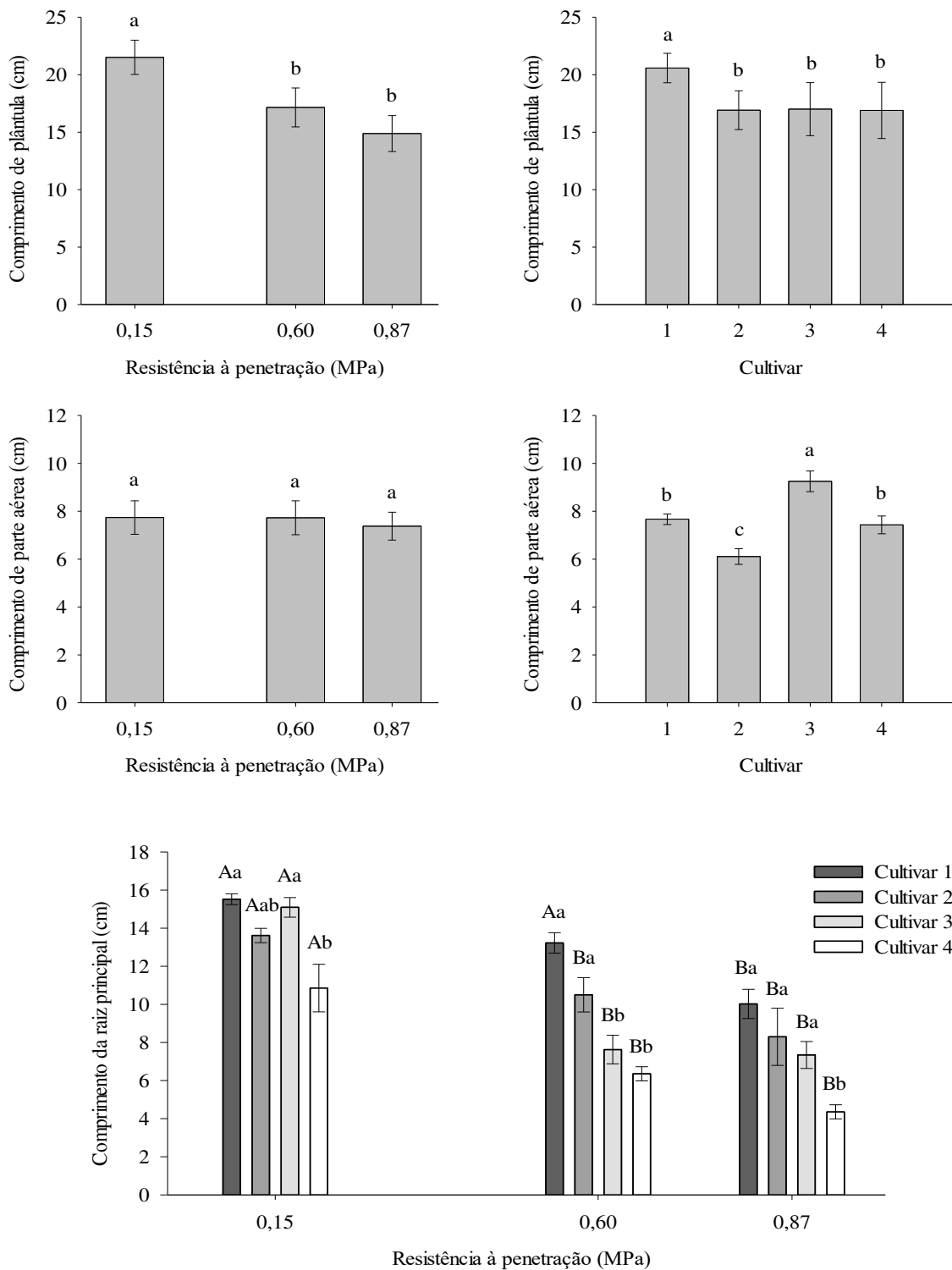


Figura 9. Comprimento total de plântulas, comprimento da parte aérea e comprimento de raiz principal por plântulas de quatro cultivares de soja submetidas à diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Para interação significativa, letras maiúsculas comparam entre os níveis de resistência à penetração e letras minúsculas comparam entre os níveis de vigor.

A arquitetura de raiz é importante na sobrevivência e produtividade das plantas, especialmente em ambientes restritivos, como sob estresse por compactação do solo. As raízes principais são as primeiras a serem formadas na soja, e a identificação de genótipos com maior crescimento da raiz principal sob condições de não estresse, pode permitir a determinação de capacidade de enraizamento mais profunda. Assim, genótipo de soja com raiz principal de rápida expansão pode ter sistema radicular mais profundo do que genótipo com raiz principal fraca e de crescimento lento (Kaspar et al., 1984). Isto explica os resultados de comprimento radicular observados para a cultivar 1 (Figura 9), que também apresentou alta capacidade de emergência das plântulas (Figuras 4, 5 e 6).

As raízes primárias são, geralmente, mais sensíveis ao aumento da impedância mecânica do que as raízes laterais (Bingham e Bengough, 2003), e os resultados são mais evidentes nas raízes do que na parte aérea das plântulas (Colombi e Walter, 2017; Colombi et al., 2017). Assim, para se ter um método eficiente de triagem, o estabelecimento das plântulas é um ponto chave na análise genética e na reprodução para melhorar a arquitetura das raízes. Neste contexto, é muito importante o uso de sistemas que avaliem os efeitos da resistência à penetração no estabelecimento e crescimento da cultura de forma rápida, precisa, que possa ser reproduzido em pesquisas e que garanta confiabilidade nos resultados. Além disso, tais métodos devem ser capazes de rastrear com precisão grande número de genótipos e avaliar o germoplasma sob condições controladas para reduzir ou eliminar a interação genótipo/ambiente (Manavalan et al., 2010).

Não se verificou interação significativa entre os níveis de resistência à penetração e as cultivares de soja para matéria seca da parte aérea das plântulas, mas interação significativa foi observada com relação à matéria seca das raízes, considerando a raiz principal e as raízes secundárias (Figura 10).

A matéria seca da parte aérea não foi influenciada pelos níveis de resistência à penetração, mas houve diferença entre as cultivares, sendo que maior valor foi observado na cultivar 1, e menor valor para a cultivar 2 (Figura 10). As cultivares 3 e 4 não tiveram redução a matéria seca das raízes com o aumento da impedância, como observado para cultivar 1 (35%) e cultivar 2 (20%). Na condição de baixa resistência à penetração (0,15 MPa), as cultivares 3 e 1 apresentaram maiores valores de matéria seca de raiz, no entanto, nos demais níveis (0,60 e 0,87 MPa), a cultivar 3 se destacou em relação às demais.

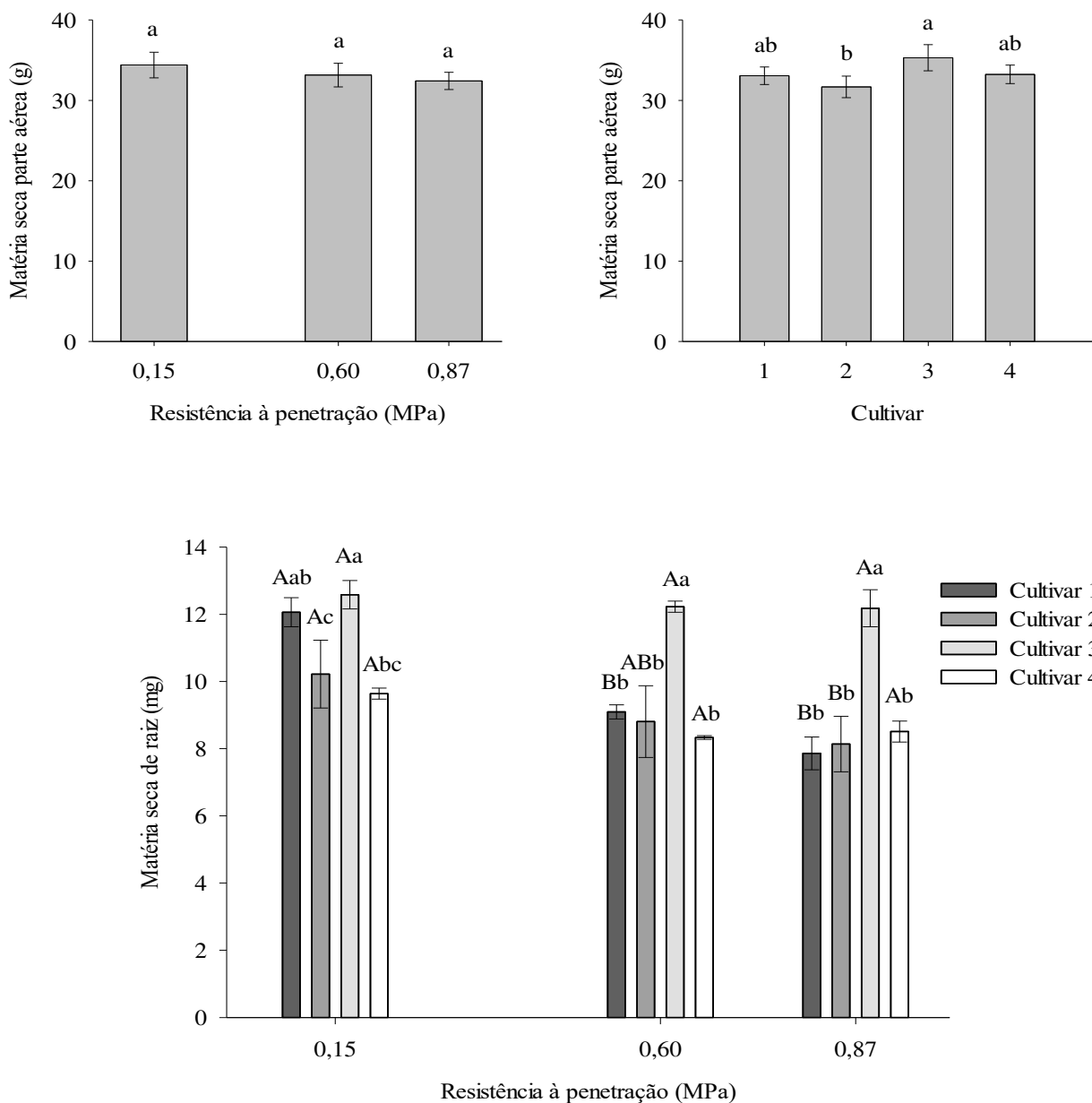


Figura 10. Matéria seca da parte aérea e de raízes por plântulas de soja de quatro cultivares sob diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Para interação significativa, letras maiúsculas comparam entre os níveis de resistência à penetração e letras minúsculas comparam entre cultivares.

As cultivares que aumentam significativamente o diâmetro das raízes em condição de elevada impedância mecânica possuem incremento substancial na matéria seca

radicular. Assim, mesmo com o aumento da resistência à penetração, a cultivar 3 não mostrou redução da matéria seca das raízes, sendo maior que nas demais cultivares (Figura 10). Isso aconteceu porque apesar de haver redução do comprimento, o diâmetro aumentou consideravelmente (Figura 8). Em condições de elevada impedância mecânica, ocorre redistribuição das reservas das sementes para espessar as raízes tornando-as mais curtas e espessas (Finch-Savage e Bassel, 2016), o que é considerado uma estratégia das plantas para possivelmente superar a camada de solo compactada. Este espessamento radicular é devido ao aumento da área cortical, que reduz o risco de flambagem da raiz e diminui o estresse mecânico durante a penetração (Chimungu et al., 2015).

De acordo com as características fisiológicas avaliadas nas plântulas no sistema desenvolvido, foi possível observar os efeitos da impedância mecânica na emergência e no crescimento. A cultivar 1 se destacou por apresentar melhor desempenho no estabelecimento das plântulas em relação aos demais genótipos (Figura 4, 5 e 6). Apresentou maior capacidade de crescimento inicial em condição de elevada impedância mecânica e pouco espessamento radicular (Figura 8) que garantiu maior exportação de assimilados para desenvolvimento do comprimento das plântulas. Estas são características importantes que conferem maior tolerância à compactação, pois permitem que maior volume de solo seja explorado pelas raízes, sem comprometer a absorção de água e nutrientes pelas plantas que, conseqüentemente, poderá influenciar na produtividade da cultura. No entanto, todos os efeitos observados em cada genótipo sob condição de impedimento físico estão associados ao vigor das sementes, que define a capacidade de germinação e emergência das plântulas de forma rápida e uniforme (Finch-Savage e Bassel, 2016).

Por fim, o sistema desenvolvido (Figura 1) permitiu avaliar as respostas das sementes/plântulas à condição de impedância mecânica do substrato, padronizando fatores perturbadores que poderiam interferir nos resultados. Assim, em geral, as vantagens desta nova metodologia consistem em: i) padronização da umidade e aeração do substrato, pois a água é distribuída uniformemente por todo o substrato devido ao seu fluxo ascendente por capilaridade, e o material não possui uma estrutura que influencie nos resultados; ii) padronização do nível de impedimento físico com a utilização de mesmo peso e, por conseqüência, mesmo nível de força imposto sobre o sistema, o que permite padronizar o nível de impedimento mecânico do substrato; iii) padronização da temperatura e luminosidade, quando o sistema é montado em sala de crescimento com

todas essas condições controladas, o que é vantajoso comparado a experimentos de campo, em que não existe controle do ambiente e; iv) utilização de substrato com material inerte (areia), de granulometria semelhante, o que permite a padronização do substrato, o que não é possível com a utilização de solos. O sistema pode ser aplicado à outras espécies, com ajuste nas dimensões da bandeja, do cano, do disco metálico e dos orifícios efetuados no disco, bem como na profundidade de semeadura e no peso dos objetos que proporcionam o aumento da impedância mecânica; v) avaliação de várias plântulas/genótipos na mesma unidade experimental; vi) preservação da raiz para avaliações subsequentes, pela natureza mais grosseira do substrato; vii) ser de baixo custo; viii) ser adaptável a outras culturas; ix) utilização de diferentes genótipos ou lotes de sementes em uma mesma unidade experimental.

Trabalhos futuros são necessários para relacionar estes resultados com a produtividade da cultura em campo, além de maior número de cultivares e lotes de sementes com diferentes níveis de vigor.

CONCLUSÕES

A metodologia permite a avaliação dos efeitos da impedância mecânica na emergência e crescimento de plântulas.

O aumento da impedância mecânica do substrato não afeta a porcentagem final de emergência das plântulas de soja, porém reduz a velocidade e a uniformidade deste processo.

Há redução do volume, comprimento, área superficial e matéria seca das raízes, além de maior diâmetro radicular das plântulas de soja com o aumento da resistência à penetração.

As respostas dos genótipos estão associadas ao vigor das sementes, e a cultivar 1 apresentou melhor desempenho no estabelecimento das plântulas.

REFERÊNCIAS

- Bauhus J, Messier C. Evaluation of fine root length and diameter measurements. *Agron J*. 1999;91:142–147.
- Bennie ATP. Growth and mechanical impedance. *Plant root: The hidden half*. Y. Waisel, A. Eshel UK, organizador. New York; 1996.
- Beutler AN, Centurion JF, Centurion MAPDC, Silva AP. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em latossolo vermelho. *Rev Bras Cienc do Solo*. 2006;30:787–794.
- Bingham IJ, Bengough AG. Morphological plasticity of wheat and barley roots in response to spatial variation in soil strength. *Plant Soil*. Kluwer Academic Publishers; 2003;250:273–282.
- BRASIL, Ministério da Agricultura P e A. Regras para análise de sementes. Brasília: Secretaria de Defesa Agropecuária; 2009.
- BRASIL MDAPEA. Padrões para a produção e a comercialização de sementes de soja. Brasília; 2013.
- Centurion JF, Aparecida M, Centurion C, Nelson A, Rossini LA, Freddi S, Lucas E, Neto DS. Compactação do solo no desenvolvimento e na produção de cultivares de soja. *Científica*. 2006;34:203–209.
- Chen G, Weil RR, Hill RL. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil Tillage Res*. 2014;136:61–69.
- Chimungu JG, Loades KW, Lynch JP. Root anatomical phenes predict root penetration ability and biomechanical properties in maize (*Zea Mays*). *J Exp Bot*. 2015;66:3151–3162.
- Coelho Filho MA, Colebrook EH, Lloyd DPA, Webster CP, Mooney SJ, Phillips AL, Hedden P, Whalley WR. The involvement of gibberellin signalling in the effect of soil resistance to root penetration on leaf elongation and tiller number in wheat. *Plant Soil*. 2013a;371:81–94.
- Coelho Filho MA, Colebrook EH, Lloyd DPA, Webster CP, Mooney SJ, Phillips AL, Hedden P, Whalley WR. The involvement of gibberellin signalling in the effect of soil

resistance to root penetration on leaf elongation and tiller number in wheat. *Plant Soil*. 2013b;371:81–94.

Collis-George N, Yoganathan P. The effect of soil strength on germination and emergence of wheat (*Triticum aestivum* L.). II. High shear strength conditions. *Soil Res*. CSIRO PUBLISHING; 1985;23:589.

Colombi T, Kirchgessner N, Walter A, Keller T. Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength. *Plant Physiol*. 2017;174:2289–2301.

Colombi T, Walter A. Genetic diversity under soil compaction in wheat: root number as a promising trait for early plant vigor. *Front Plant Sci*. 2017;8:1–14.

Didier Demilly, Sylvie Ducournau M-HW. Digital imaging of seed germination. CRC Press. Gupta, S. D.; Ibaraki Y, organizador. *Plant image analysis: fundamentals and applications*; 2014.

Dutra AS, Daiton Vieira R. Accelerated aging as test of vigor for corn and soybean seeds. *Ciência Rural*. 2004;715–721.

EMBRAPA. Para a cultura da soja. 1993;

Farooq M, Basra SMA, Ahmad N, Hafeez K. Thermal Hardening: A new seed vigor enhancement tool in rice. *J Integr Plant Biol*. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111); 2005;47:187–193.

Ferreira EB, Cavalcanti PP, Nogueira DA, Ferreira MEB. *Pacote Experimental Designs* (Portuguese). 2018.

Finch-Savage WE, Bassel GW. Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. *J Exp Bot*. 2016;67:567–591.

Foloni JSS, De Lima SL, Büll LT. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Rev Bras Cienc do Solo*. 2006;30:49–57.

Giarola NFB, Brachtvogel EL, Fontaniva S, Pereira RA, Fioreze ESL. Cultivares de soja sob plantio direto em latossolo vermelho compactado. *Acta Sci - Agron*. 2009;31:641–646.

Groenevelt PH, Kay BD, Grant CD. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. *Geoderma*. 1984;34:101–114.

Grotta SC, Furlani CEA, Silva RP, Santos L, Cortez JW RG. Cultura da soja em função da profundidade de semeadura e da carga vertical sobre a fileira de semeadura. *Eng Agríc.* 2007;27:487–492.

Hernandez-Ramirez G, Lawrence-Smith EJ, Sinton SM, Tabley F, Schwen A, Beare MH, Brown HE. Root responses to alterations in macroporosity and penetrability in a silt loam soil. *Soil Sci Soc Am J.* 2014;78:1392.

ISTA. International Rules for Seed Testing 2015 Validated Seed Health Testing Methods Including changes and editorial corrections adopted at the Ordinary. 2015.

Jin K, Shen J, Ashton RW, White RP, Dodd IC, Phillips AL, Parry MAJ, Whalley WR. The effect of impedance to root growth on plant architecture in wheat. *Plant Soil.* 2015;392:323–332.

Kaspar TC, Taylor HM, Shibles RM. Taproot-elongation rates of soybean cultivars in the glasshouse and their relation to field rooting depth¹. *Crop Sci. Crop Science Society of America;* 1984;24:916.

Kuncoro PH, Koga K, Satta N, Muto Y. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. *Soil Tillage Res. Elsevier;* 2014;143:180–187.

Labouriau LG. Uma nova linha de pesquisa na fisiologia da germinação das sementes. *An. do XXXIV Congr. Nac. Botânica. Porto Alegre: SSB;* 1983.

Latif N, Khan MA, Ali T. Effects of soil compaction caused by tillage and seed covering techniques on soil physical properties and performance of wheat crop. *Water Resour Res.* 2008;27:185–192.

Lebert M, Horn R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage Res.* 1991;19:275–286.

Lipiec J, Hatano R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma. Elsevier;* 2003;116:107–136.

Maguire JD. Speed of germination—aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Sci.* 1962;2:176.

Manavalan LP, Guttikonda SK, Nguyen VT, Shannon JG, Nguyen HT. Evaluation of

diverse soybean germplasm for root growth and architecture. *Plant Soil*. 2010;330:503–514.

Marcos Filho J. Seed physiology of cultivated plants. ABRATES, organizador. Londrina; 2016.

Massa GD, Gilroy S. Touch modulates gravity sensing to regulate the growth of primary roots of *Arabidopsis thaliana*. *Plant J*. 2003;33:435–445.

Mazurana M, Levien R, Müller J, Conte O. Sistemas de preparo de solo: Alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. *Rev Bras Cienc do Solo*. 2011;35:1197–1206.

McKenzie BM, Bengough AG, Hallett PD, Thomas WTB, Forster B, McNicol JW. Deep rooting and drought screening of cereal crops: A novel field-based method and its application. *F Crop Res*. Elsevier; 2009;112:165–171.

Modolo AJ, Fernandes HC, Schaefer CEG, Silveira JCM da. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. *Ciência e Agrotecnologia*. 2008;32:1259–1265.

Nawaz MF, Bourrié G, Trolard F. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron Sustain Dev*. 2013;33:291–309.

Nichols, MA; Heydecker W. Two approaches to the study of germination data. *Proc Int Seed Test Assoc*. 1968;33:531–540.

Pacheco EP, Cantalice JRB. Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar. *Rev Bras Cienc do Solo*. 2011;35:417–428.

Primack RB. Variation in the phenology of natural populations of montane shrubs in new zealand. *J Ecol*. British Ecological Society; 1980;68:849.

Ramos JC, Ceccoli G, Panigo ES, Dellaferrera IM, Moras G, Vegetti AC, Gabriel Ribero G, Perreta MG. novel topological-architectural parameters of root growth in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) to determine the presence of soil mechanical impedance. *Indian J Sci Technol*. 2018;11:1–13.

Richart A, Tavares Filho J, Brito OR, Llanillo RF, Ferreira R. Compactação do solo: causas e efeitos. *Semin Ciências Agrárias*. 2005;26:321–344.

Romero EM, Ruiz HA, Fernandes RBA, Costa LM da. Condutividade hidráulica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em Latossolos artificialmente compactados. Rev Bras Eng Agrícola e Ambient. 2014;18:1003–1009.

Roque AA de O, de Souza ZM, Barbosa RS, de Souza GS. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. Pesqui Agropecu Bras. 2010;45:744–750.

Silva, L.; Medeiros, A. D.; Oliveira AMS. SeedCalc: Seed germination and seedling growth indexes. R package version 1.0.0. 2018.

Suzuki LEAS, Reichert JM, Reinert DJ, De Lima CLR. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. Pesqui Agropecu Bras. 2007;42:1159–1167.

Vieira RD. KFC. Vigor de sementes: conceitos e testes. ABRATES. 1999;

Whalley WR, Whalley WR, Finch-savage RE, Finch-savage RE, Cope RE, Cope RE, Rowse HR, Rowse HR, Bird NR a, Bird NR a. The response of carrot (*Daucus carota* L.) and onion (*Allium cepa* L.) seedlings to mechanical impedance and water stress at sub-optimal temperatures. Plant, Cell Environ. 1999;22:229–242.

CAPÍTULO II

EFEITO DO VIGOR DAS SEMENTES NA EMERGÊNCIA E NO CRESCIMENTO DE PLÂNTULAS DE SOJA EM RESPOSTA À IMPEDÂNCIA MECÂNICA DO SUBSTRATO

RESUMO

Solos compactados são cada vez mais comuns, em função do cultivo intensivo e do manejo incorreto em áreas agrícolas. A soja é sensível ao aumento da compactação dos solos, e os efeitos da elevada resistência à penetração das raízes na emergência das plântulas têm sido investigados em ambientes controlados, no entanto, o efeito da qualidade das sementes não tem sido incluído nessas avaliações. Diante do exposto, objetivou-se avaliar os efeitos do vigor de sementes na resposta ao aumento da impedância mecânica do substrato sobre a emergência e crescimento inicial de plântulas de duas cultivares de soja. Dois experimentos foram conduzidos em casa de vegetação climatizada, sendo que cada experimento envolveu uma cultivar de soja. O delineamento foi em blocos casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 2 x 3, sendo dois níveis de vigor de sementes (alto e baixo) e três níveis de resistência à penetração (0,15; 0,60 e 0,87 MPa). Duas cultivares de soja foram utilizadas, e a obtenção do lote de baixo vigor ocorreu por meio do envelhecimento artificial das sementes a 42°C por 24h. Após a caracterização fisiológica dos lotes de sementes pelos testes de germinação e vigor, os efeitos do vigor de sementes na tolerância à elevada resistência à penetração do substrato na emergência e crescimento de plântulas foram avaliados. Conclui-se que os lotes de sementes de alto vigor apresentam maior velocidade de emergência das plântulas, maior comprimento de raízes, área superficial e volume das raízes, além de menor espessamento radicular, independente dos níveis de impedância mecânica do substrato para ambas cultivares. Assim, sementes mais vigorosas proporcionam maior tolerância das plântulas à compactação do substrato.

ABSTRACT

Effect of seed effects on emergency and growth of soybean trees in response to the mechanical impedance of the substrate

Compacted soils are increasingly common because of intensive cultivation and poor management in agricultural areas. Soybean is sensitive to increased soil compaction, and the effects of high penetration resistance of roots on emergence of seedlings have been investigated in controlled environments, however, the effect of seed quality has not yet been included in these evaluations. The objective of this study was to evaluate the effects of seed vigour in the response to the increased mechanical impedance of the substrate on seedling emergence and initial growth of two soybean cultivars. Two experiments were conducted in a climatized greenhouse, being each experiment involving one soybean cultivar. The experiment was performed using randomized block design, with four replications. The treatments were arranged in a 2 x 3 factorial scheme, with two levels of seed vigour (high and low) and three levels of substrate resistance to penetration (0.15, 0.60 and 0.87 MPa). Two soybean cultivars were used. The low vigour lots were obtained by artificial aging of the seeds at 42°C for 24h. After the physiological characterization of the seed lots by the germination and vigour tests, the effects of seed vigour on tolerance to the high resistance penetration of the substrate on emergence and growth of seedlings were evaluated. It is concluded that the seed lots with high vigour present a higher seedling emergence speed, greater root length, surface area and root volume, besides lower root thickening, independent of the levels of mechanical impedance of the substrate for both cultivars. Thus, more vigorous seeds provide greater tolerance of the seedlings to the substrate compaction.

INTRODUÇÃO

A obtenção de altas produtividades está relacionada com o estabelecimento das plantas no campo após a semeadura. Dentre os fatores que influenciam a germinação das sementes, destacam-se os fatores físicos do solo. A umidade, temperatura e aeração do ambiente do solo devem ser adequadas à germinação das sementes, à emergência das plântulas e ao desenvolvimento da planta.

A soja é uma leguminosa sensível à elevada compactação do solo, o que reduz sua produtividade (Beutler et al., 2006). O impedimento físico do solo está associado, principalmente, ao uso de práticas de cultivo mecanizadas, amplamente difundidas na cultura da soja. No sistema convencional, o cultivo intenso do solo e seu preparo em condições inadequadas favorece a formação de camadas compactadas em subsuperfície, e crosta na superfície do solo. Em áreas cultivadas sob sistema de plantio direto, o intenso tráfego de máquinas agrícolas e a ausência de revolvimento do solo, estabelece maior densidade e impedância mecânica do solo. Estas condições podem propiciar maior resistência ao crescimento das raízes, por conseguinte, reduz a produtividade (Botta et al., 2010; Jin et al., 2013; Arvidsson e Håkansson, 2014). A resistência mecânica do solo à penetração das raízes, que altera o estado de compactação do solo em torno da semente (Finch-Savage e Bassel, 2016), provoca desuniformidade de emergência e crescimento desuniforme das plântulas. Assim, a decisão da época adequada de dessecação e colheita da soja é dificultada, o que influencia a logística do sistema produtivo e o manejo da cultura.

Em decorrência do impedimento físico do solo, as plantas apresentam mudanças morfológicas, fisiológicas e bioquímicas durante seu crescimento e desenvolvimento a fim de se adaptarem. Essas mudanças são específicas de cada espécie e cultivar (Materchera et al., 1992). Dentre as principais alterações, destacam-se características de comprimento, área, volume e diâmetro radicular (Fried et al., 2018), além de moléculas sinalizadoras, tais como hormônios e espécies reativas de oxigênio (Chehab et al., 2008; Colebrook et al., 2014).

Os problemas decorrentes da compactação somente serão detectados após a germinação das sementes e desenvolvimento das plântulas, quando a correção se torna difícil, onerosa, e compromete a produtividade (Da Silva Freddi et al., 2007; Valicheski et al., 2012).

Neste sentido, é importante destacar que os efeitos da impedância para o crescimento radicular e arquitetura da planta variam com o tipo de solo (Tracy et al., 2011); intensidade e frequência da carga aplicada, influenciados pela tensão, umidade, textura, estrutura e densidade inicial do solo (Lebert e Horn, 1991); genótipo (Tracy et al., 2011; Arvidsson e Håkansson, 2014); sistema de plantio (Roque et al., 2010; Silva et al., 2017), além do tamanho e vigor das sementes (Grzesiak et al., 2014; Nosalewicz e Lipiec, 2014; Finch-Savage e Bassel, 2016). Contudo, há necessidade de maiores pesquisas com o objetivo de analisar os efeitos do impedimento físico sobre a emergência e crescimento de plântulas de soja, e como o vigor da semente interfere no estabelecimento da cultura.

Lotes de sementes com alto vigor podem proporcionar adequada emergência de plântulas sob impedância mecânica (Hyatt et al., 2007). Os efeitos da resistência à penetração na emergência da soja têm sido investigados em ambientes controlados, no entanto, o efeito da qualidade das sementes não tem sido incluído nessas avaliações.

Diante do exposto, objetiva-se avaliar os efeitos do vigor de sementes na resposta ao aumento da impedância mecânica do substrato sobre a emergência e crescimento inicial de plântulas de duas cultivares de soja.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação climatizada, com controle de temperatura (25 °C), na área experimental Diogo Alves de Mello da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG. Sementes de duas cultivares de soja foram utilizadas. As cultivares foram escolhidas com base nos resultados obtidos no primeiro experimento (Capítulo I), as quais apresentaram, respectivamente, melhor e pior desempenho quanto a tolerância à compactação.

Obtenção dos níveis de vigor dos lotes

Para a obtenção de lotes de sementes com dois níveis de vigor, os lotes originais de ambas as cultivares foram divididos em dois, sendo um deles submetido ao envelhecimento artificial, a 42°C, por 24 horas, conforme metodologia descrita para o teste de envelhecimento acelerado (Dutra e Daiton Vieira, 2004). Após o envelhecimento,

as sementes foram secas naturalmente em condições de ambiente de laboratório antes do início dos testes. Assim, os lotes de sementes das cultivares 1 e 2 foram classificados em dois níveis de vigor, sendo que o lote não envelhecido foi considerado de alto vigor, e o lote envelhecido artificialmente correspondeu ao lote de baixo vigor.

Os lotes de sementes foram caracterizados quanto à qualidade fisiológica por meio da determinação do teor de água, germinação, primeira contagem de germinação, emergência de plântulas, índice de velocidade de emergência, envelhecimento acelerado e condutividade elétrica, conforme metodologia descrita no Capítulo I.

Avaliação da emergência e crescimento das plântulas sob impedância mecânica do substrato

O aumento da impedância mecânica do substrato foi simulado por meio do sistema proposto no Capítulo I. Três níveis de impedância mecânica do substrato foram avaliados de acordo com os tratamentos: 0 (controle), 13 e 26 kg que aplicaram, respectivamente, uma pressão de 0, 6 e 12 MPa sobre a areia. Para avaliar a resistência à penetração das raízes imposta pelos tratamentos, foi utilizado o Penetrômetro de Solos Automatizado – TE-096, da marca Tecnal[®]. Os tratamentos de 0 (controle), 6 e 12 MPa proporcionaram, respectivamente, uma resistência à penetração máxima de 0,15 MPa (baixa), 0,60 MPa (moderada) e 0,87 (alta) MPa, avaliadas no sétimo dia após a semeadura.

A porcentagem de emergência e os índices relacionados à emergência das plântulas de soja foram avaliados, como descritos no Capítulo I. Contagens diárias do número de plântulas foram realizadas até sete dias após a semeadura, quando ocorreu a estabilização do número de plântulas emergidas. Os dados foram analisados por meio do *SeedCalc*, pacote do software R (Silva et al., 2018). Ao final, o sistema foi desmontado e as plântulas foram coletadas para análise em laboratório.

As plântulas foram separadas em sistema radicular e parte aérea na altura do coleto. As raízes foram lavadas em água corrente e armazenadas em frascos contendo solução de etanol 40%, para evitar sua desidratação. Para a análise do comprimento total de raiz (cm), área superficial total de raiz (cm²), volume total de raiz (cm³) e diâmetro médio de raiz (mm), foi utilizado o sistema WinRHIZO Pro 2007a (Régent Instr. Inc.), acoplado a um scanner profissional Epson XL 10000, equipado com unidade de luz

adicional (TPU). A mensuração do comprimento total das plântulas, bem como da parte aérea e raiz principal, foi realizada por meio de análise de imagens, com a utilização do software ImageJ®.

Para determinação da matéria seca das plântulas, as raízes e a parte aérea foram acondicionadas em saco de papel e, em seguida, secas em estufa com circulação forçada de ar, regulada a 65 °C, onde permaneceram por aproximadamente 72 horas. A pesagem das amostras foi realizada em balança analítica, com precisão de quatro casas decimais. Os resultados foram expressos em mg plântula⁻¹.

Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 2x3, sendo dois níveis de vigor de sementes (alto e baixo) e três níveis de impedância mecânica do substrato (0,15; 0,60 e 0,87 MPa). Dois experimentos foram conduzidos, em duas etapas, sendo que o primeiro teve como material de estudo a cultivar 1, e o segundo experimento a cultivar 2. A primeira etapa de cada experimento consistiu na condução de duas repetições, sendo que cada repetição teve sua replicata. Na segunda etapa foram conduzidas as outras duas repetições e suas respectivas replicatas.

A análise estatística foi efetuada seguindo o modelo tradicional de esquema fatorial, utilizando o pacote “ExpDes.pt” do programa R (Ferreira et al., 2018). Quando a interação entre níveis de vigor e níveis de impedância foi significativa ($p < 0,05$), procedeu-se a análise de variância e a comparação das médias pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos na determinação do teor de água dos lotes de cada cultivar foram semelhantes, havendo uma variação de 1,2 e 0,9 pontos percentuais entre os lotes das cultivares 1 e 2, respectivamente (Tabela 1). A uniformidade deste parâmetro entre lotes de sementes é de suma importância, pois diferenças maiores que dois pontos percentuais podem afetar a confiabilidade dos resultados dos testes de vigor, visto que a umidade é uma característica que influencia a velocidade de absorção de água pelas sementes (Marcos-Filho, 2016) e, conseqüentemente, a velocidade de germinação.

Tabela 1. Avaliação das características dos lotes de sementes de duas cultivares de soja.

Cultivar 1							
Lote	TA	G	PC	EA	EP	IVE	CE
	-----%-----						$\mu\text{S.cm}^{-1} \text{g}^{-1}$
Alto vigor	12,9	95 a	89 a	89 a	96 a	1,13 a	61,56 b
Baixo vigor	11,7	88 b	81 b	68 b	92 a	0,89 b	80,55 a
CV (%)		3,44	4,90	3,87	4,60	5,85	7,77
Cultivar 2							
Lote	TA	G	PC	EA	EP	IVE	CE
	-----%-----						$\mu\text{S.cm}^{-1} \text{g}^{-1}$
Alto vigor	12,6	84 a	79 a	70 a	92 a	1,03 a	57,59 b
Baixo vigor	11,7	84 a	67 a	67 a	88 a	0,86 b	82,34 a
CV (%)		6,15	11,21	8,95	5,95	6,40	11,43

* Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste F a 5% de probabilidade. Teor de água (TA); Germinação (G); Primeira contagem do teste de germinação (PC); Envelhecimento acelerado (EA); Emergência de plântulas (EP); Índice de velocidade de emergência (IVE) e Condutividade elétrica (CE). CV = coeficiente de variação.

O teste de germinação possibilitou a diferenciação dos lotes de sementes da cultivar 1, sendo que o lote de baixo vigor apresentou menor percentual de germinação (88%). Já para a cultivar 2, a análise de variância dos dados de germinação não mostrou diferenças significativas atribuível aos efeitos dos lotes de sementes (Tabela 1).

Os testes de vigor, por sua vez, indicaram diferenças no potencial fisiológico dos lotes (Tabela 1). Para a cultivar 1, o lote não envelhecido, apresentou maiores valores nos testes de primeira contagem de germinação, envelhecimento acelerado e índice de velocidade de emergência, além de menor valor no teste de condutividade elétrica, sendo considerado de alto vigor. Já o lote envelhecido foi considerado de baixo vigor por apresentar, principalmente, menor índice de velocidade de emergência e maior valor de condutividade elétrica.

Para a cultivar 2, também foi observada diferença no vigor das sementes dos lotes quando avaliadas pelos testes de condutividade elétrica e pelo índice de velocidade de

emergência (Tabela 1). Foi obtido maior valor no teste de condutividade elétrica para o lote de baixo vigor, enquanto que para o índice de velocidade de emergência, maior valor foi obtido para o lote de alto vigor.

No que diz respeito ao teste de condutividade elétrica, quanto maior o valor da condutividade maior é perda da integridade das membranas celulares (Vieira, 1999), que, conseqüentemente, pode levar a menor germinação e vigor das sementes. Os maiores valores de condutividade elétrica obtidos, para os lotes de baixo de vigor de ambas as cultivares, estão relacionados ao processo de deterioração das sementes (Fessel et al., 2010), que foram submetidas ao envelhecimento artificial.

Os lotes de sementes utilizados neste estudo, de ambas as cultivares, apesar de apresentarem diferenças no vigor, sendo classificados como de alto e baixo vigor a fim de facilitar o entendimento, atendem ao padrão para comercialização de sementes de soja no Brasil, que exige no mínimo 80% de germinação (BRASIL, 2013).

Na avaliação da emergência das plântulas da cultivar 1, não foi observada interação significativa entre os níveis de impedância mecânica e o vigor das sementes (Figura 1). A porcentagem final de emergência e o índice de velocidade de emergência não foram influenciados pelos níveis de resistência à penetração. No entanto, o coeficiente de velocidade de emergência reduziu nas resistências de 0,60 e 0,87 MPa, o que indica menor velocidade de emergência das plântulas nestas condições. Entre os níveis de vigor, o lote de sementes de alto vigor apresentou maior porcentagem de emergência, índice de velocidade de emergência e coeficiente de velocidade de emergência comparado ao lote de menor vigor.

Em relação ao tempo gasto para emergência de 10%, 50% e 90% das plântulas, observou-se que com o aumento da resistência à penetração, as plântulas demoram mais tempo para emergir (Figura 2). E, quanto menor o vigor das sementes, maior o tempo necessário para a emergência das plântulas.

A uniformidade de emergência não diferiu estatisticamente entre os níveis de resistência à penetração (Figura 3). O lote de alto vigor apresentou menor uniformidade de emergência em relação ao lote de baixo vigor de sementes. No entanto, a sincronia de emergência reduziu com a moderada (0,60 MPa) e alta resistência à penetração (0,87 MPa). Além disto, o lote de sementes de alto vigor apresentou maior sincronia de emergência em relação ao lote de baixo vigor. Por fim, quanto maior a resistência à

penetração, maior é o tempo médio de emergência das plântulas (Figura 3). Entre os níveis de vigor, o lote de baixo vigor apresentou maior tempo médio de emergência.

Tempo, velocidade, homogeneidade e sincronia são aspectos que informam a dinâmica do processo de germinação e emergência. Maior velocidade e uniformidade de emergência leva ao estabelecimento rápido da cultura e reduz a suscetibilidade das sementes e plântulas às condições de estresse (Finch-Savage e Bassel, 2016).

A impedância mecânica do solo apresenta influência sobre o crescimento inicial das plantas, atrasando a emergência e comprometendo o desenvolvimento e estabelecimento da cultura. O estresse físico do solo proporciona maior probabilidade de limitar a germinação e a emergência das plântulas (Whalley e Finch-Savage, 2006, 2010). Assim, maior resistência mecânica impede o crescimento precoce da radícula e o alongamento do hipocótilo e, conseqüentemente, reduz a taxa de emergência das plântulas (Kobodziejek e Patykowski, 2015).

A sincronia de emergência das plântulas permite rápido estabelecimento das plantas no campo (Oliveira et al., 2017), porém a resistência à penetração proporciona redução da uniformidade de emergência e pode comprometer a produtividade, qualidade e padronização do produto colhido (Nafziger et al., 1991). Neste sentido, aspectos do vigor das sementes são de grande importância, pois refere-se à capacidade de germinação e estabelecimento das plântulas de forma rápida e uniforme em diversas condições ambientais. Este é um componente determinante para o rendimento da cultura, pois define o estabelecimento das plantas no campo (Finch-Savage e Bassel, 2016).

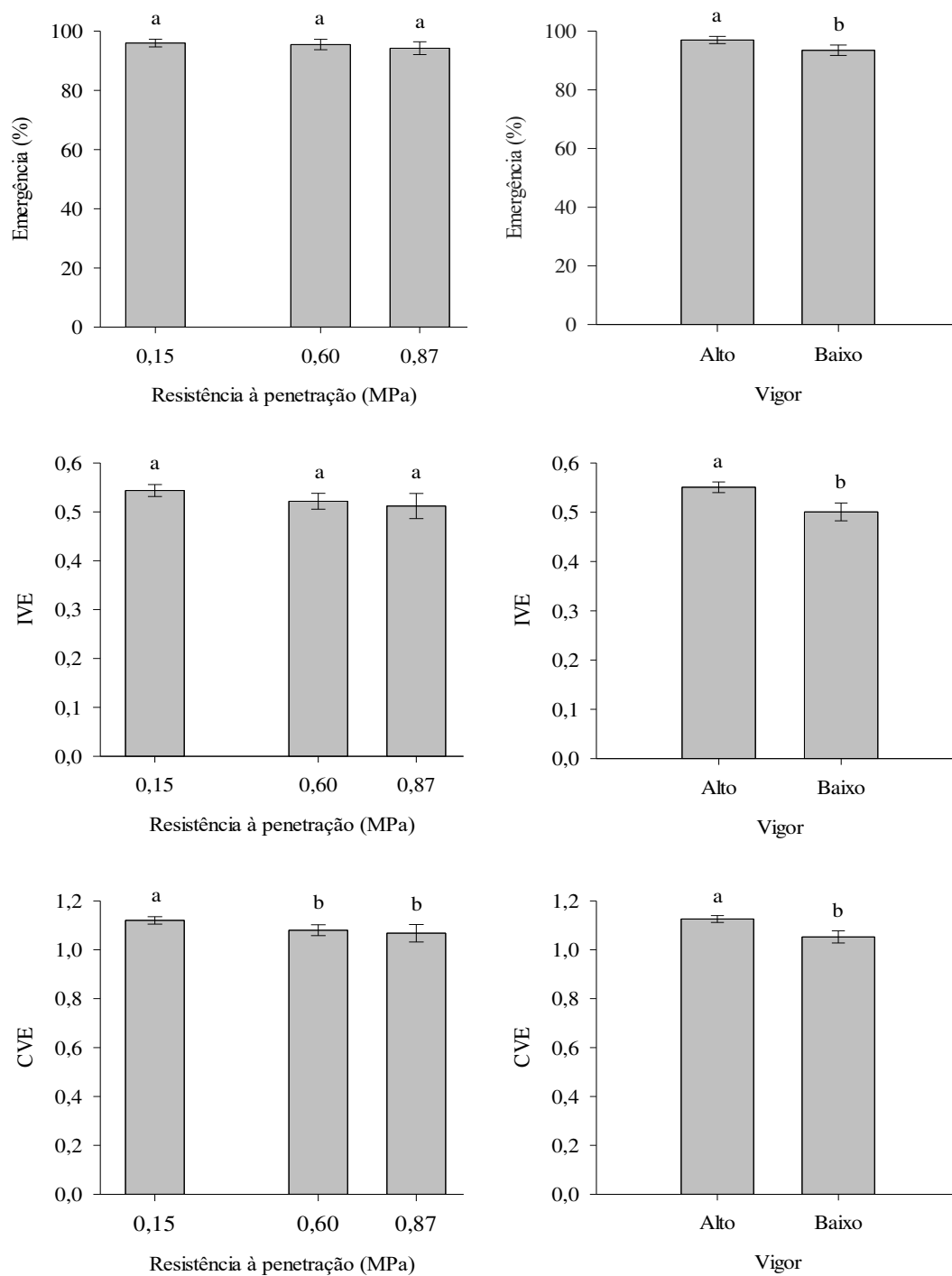


Figura 1. Emergência (%), Índice de velocidade de emergência (IVE) e Coeficiente de velocidade de emergência (CVE) de plântulas de soja da cultivar 1, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n=4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

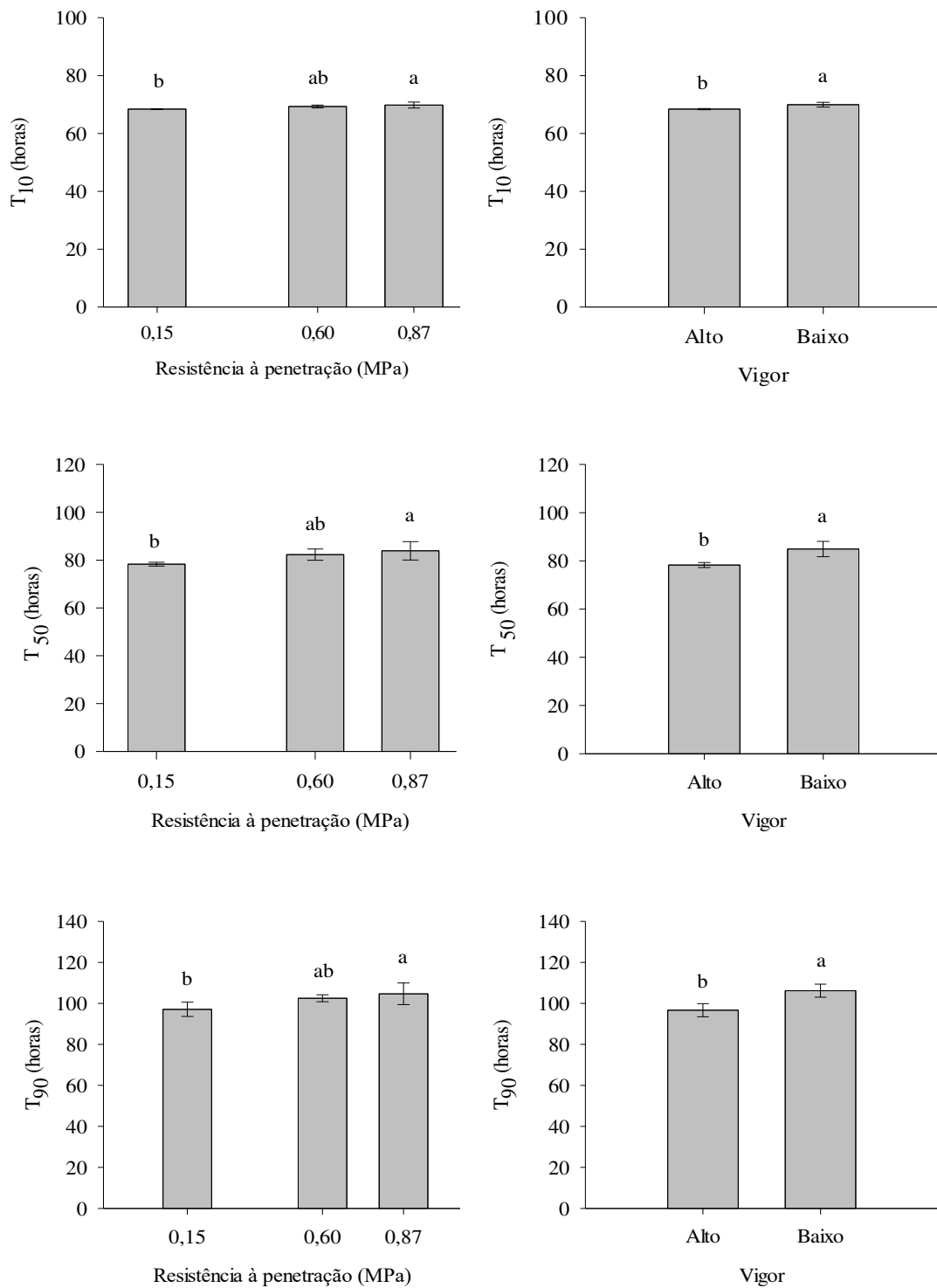


Figura 2. Tempo gasto para 10% de emergência (T₁₀), 50% de emergência (T₅₀) e 90% de emergência (T₉₀) de plântulas de soja da cultivar 1, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

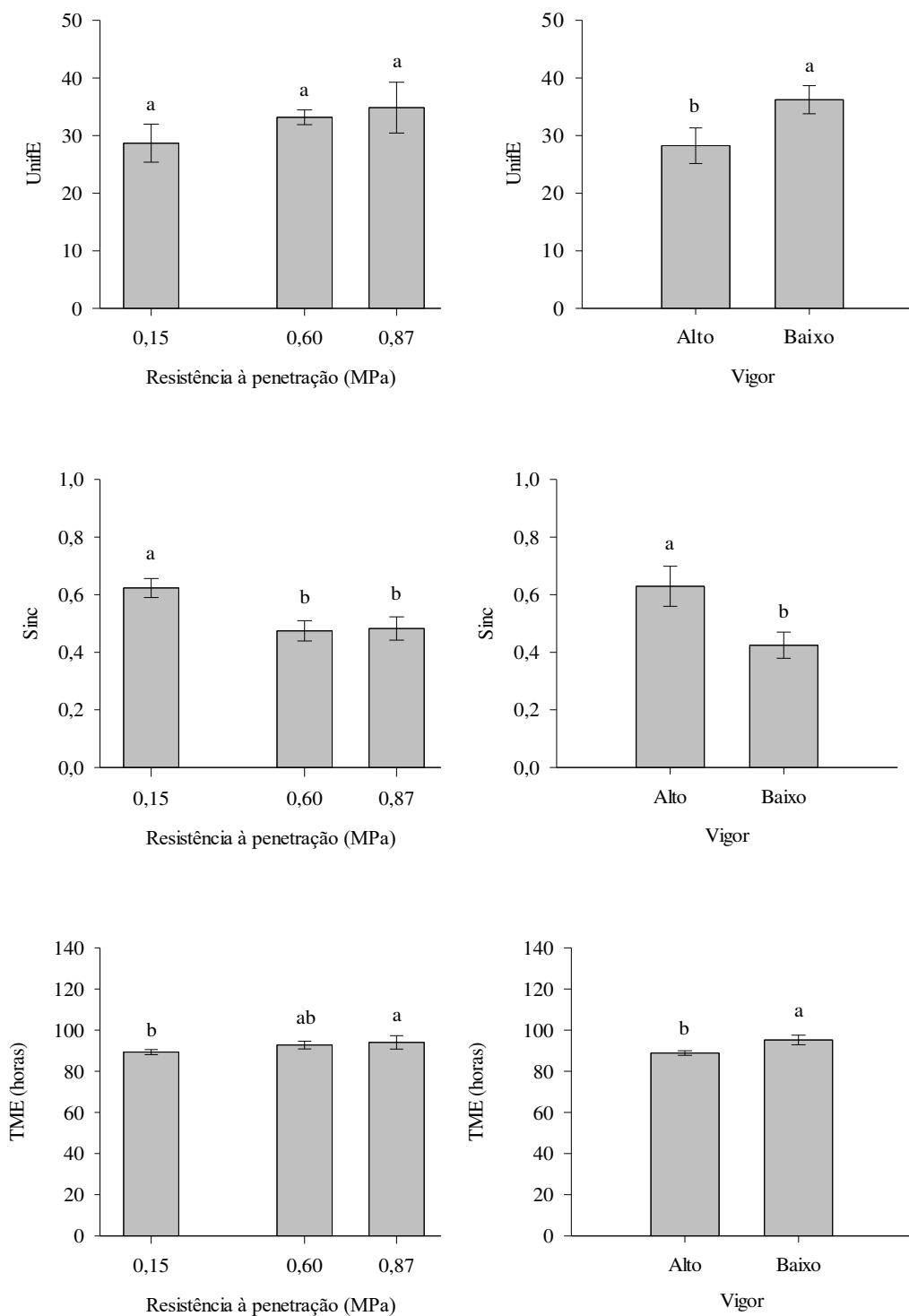


Figura 3. Índice de uniformidade de emergência (UnifE), Sincronia de emergência (Sinc) e Tempo médio de emergência (TME) de plântulas de soja da cultivar 1, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Na avaliação da emergência das plântulas da cultivar 2, também não se verificou interação significativa entre os níveis de impedância mecânica do substrato e os níveis de vigor das sementes (Figura 4). O aumento da resistência à penetração não ocasionou diferenças na porcentagem de emergência e no coeficiente de velocidade de emergência das plântulas, mas o índice de velocidade de emergência reduziu na condição de 0,87 MPa. Redução da porcentagem de emergência, do índice de velocidade de emergência e do coeficiente de velocidade de emergência foi verificada para o lote de sementes de baixo vigor em relação ao de alto vigor.

A cultivar 2, diferentemente da cultivar 1, não apresentou diferenças no tempo gasto para emergência de 10%, 50% e 90% das plântulas, com o aumento da resistência à penetração (Figura 5). No entanto, resultados semelhantes quanto ao vigor dos lotes foram observados para ambas as cultivares, pois o lote de baixo vigor apresentou maior tempo para emergência das plântulas.

O índice de uniformidade, sincronia e o tempo médio de emergência não foram influenciados pelos níveis de resistência à penetração (Figura 6). O lote de sementes de baixo vigor apresentou maior tempo médio de emergência.

Existe variação genética para a resposta ao estresse de compactação (Fried et al., 2018), como observado no presente trabalho verificando-se as diferentes respostas das cultivares avaliadas. Assim, pode-se selecionar genótipos tolerantes com base em seu desempenho para emergências em campo e características iniciais de crescimento sob condições de estresse (Gemtos et al., 2000; Colombi e Walter, 2017).

Ainda, o vigor das sementes é uma característica quantitativa influenciada pela complexa interação entre a genética e o meio ambiente. A germinação rápida e o crescimento subsequente em condição de elevada impedância mecânica são, portanto, fenótipos chave de sementes vigorosas. Conforme os resultados obtidos no presente trabalho, o vigor das sementes de ambas as cultivares foi determinante na velocidade e uniformidade de emergência das plântulas, independentemente dos níveis de impedância mecânica do substrato. No entanto, os mecanismos que controlam o vigor das sementes e o desempenho das plântulas oriundas dessas sementes permanecem pouco compreendidos (Finch-Savage e Bassel, 2016).

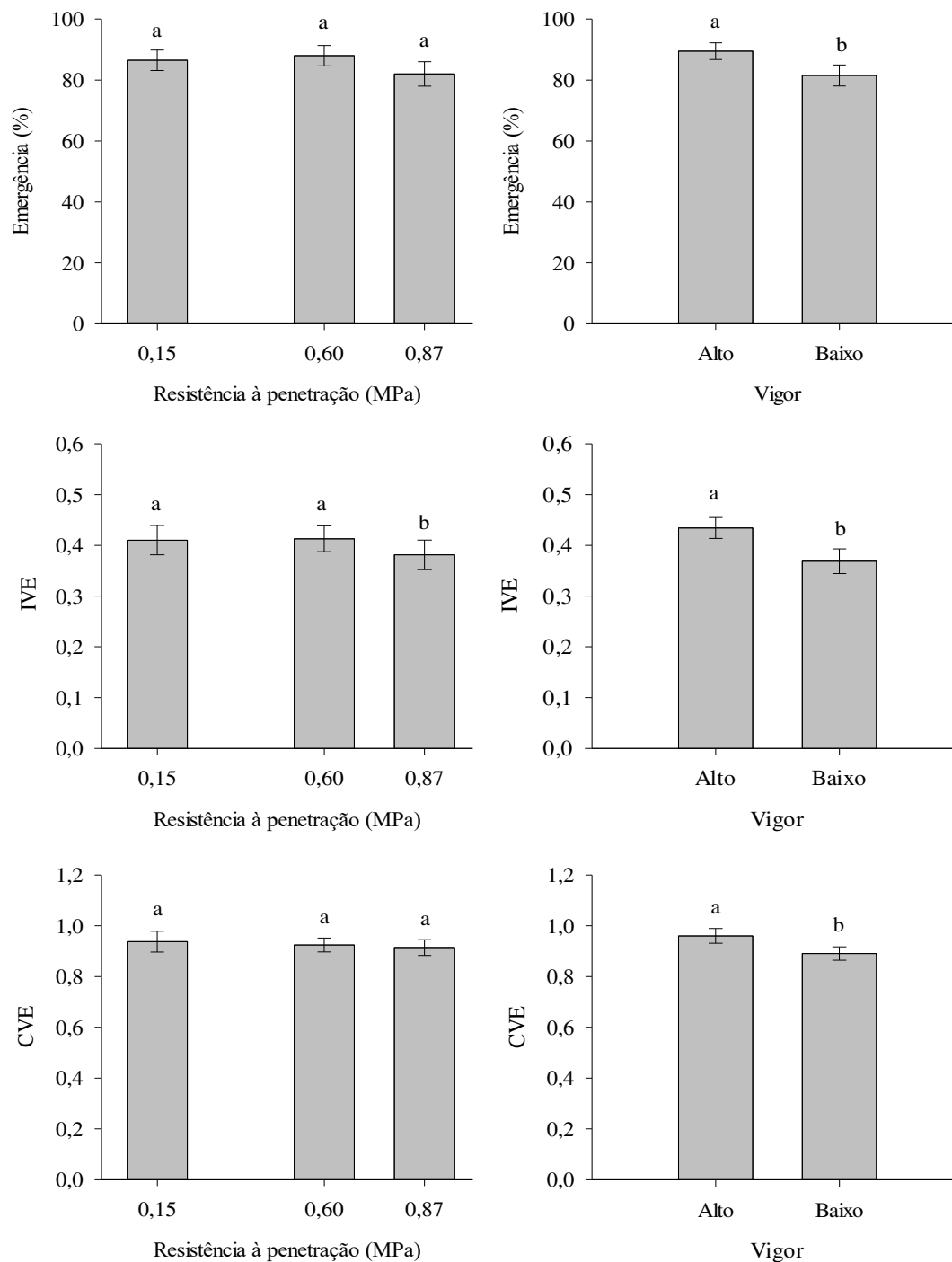


Figura 4. Emergência (%), Índice de velocidade de emergência (IVE) e Coeficiente de velocidade de emergência (CVE) de plântulas de soja da cultivar 2, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

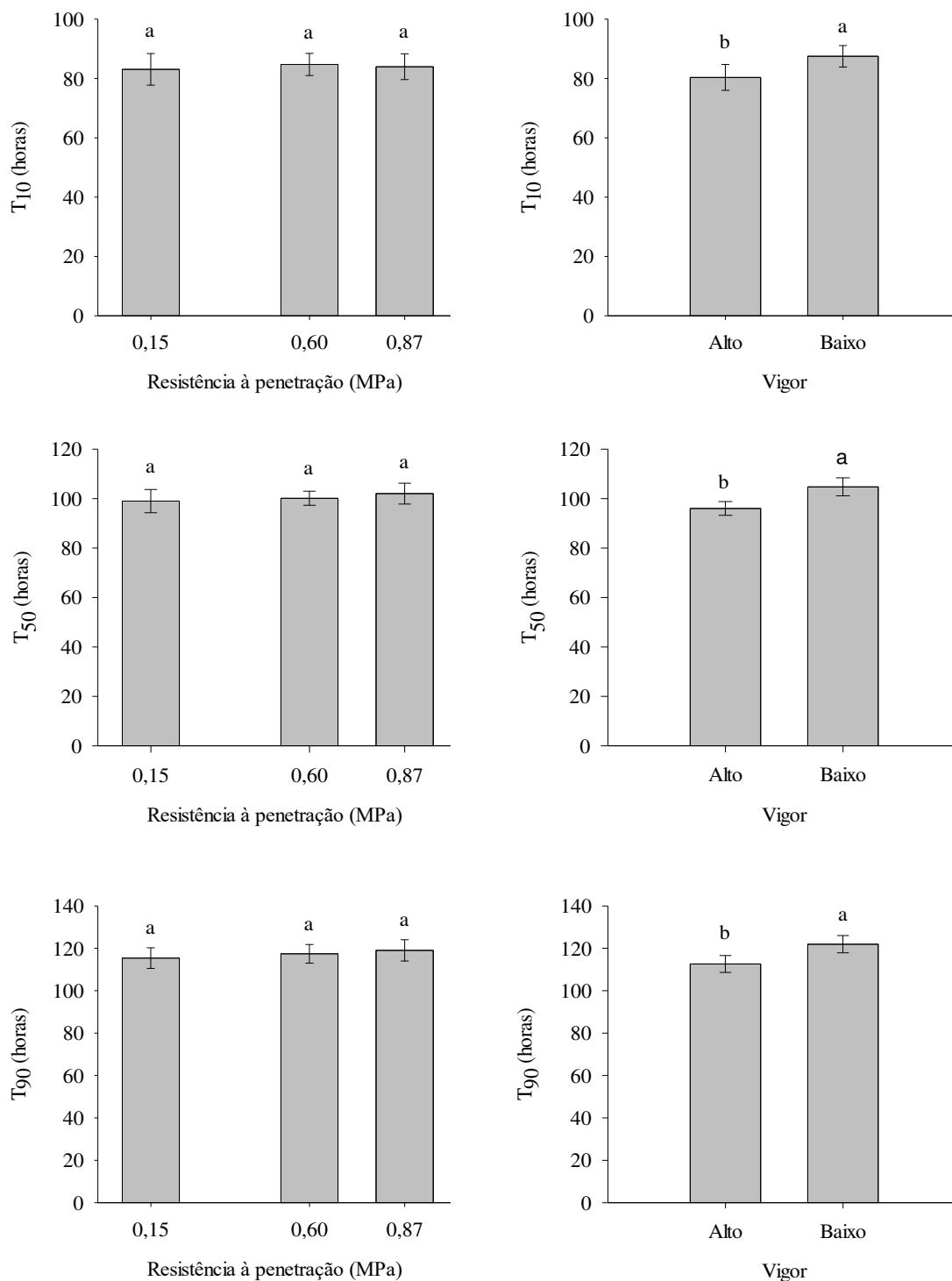


Figura 5. Tempo gasto para 10% de emergência (T₁₀), 50% de emergência (T₅₀) e 90% de emergência (T₉₀) de plântulas de soja da cultivar 2, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

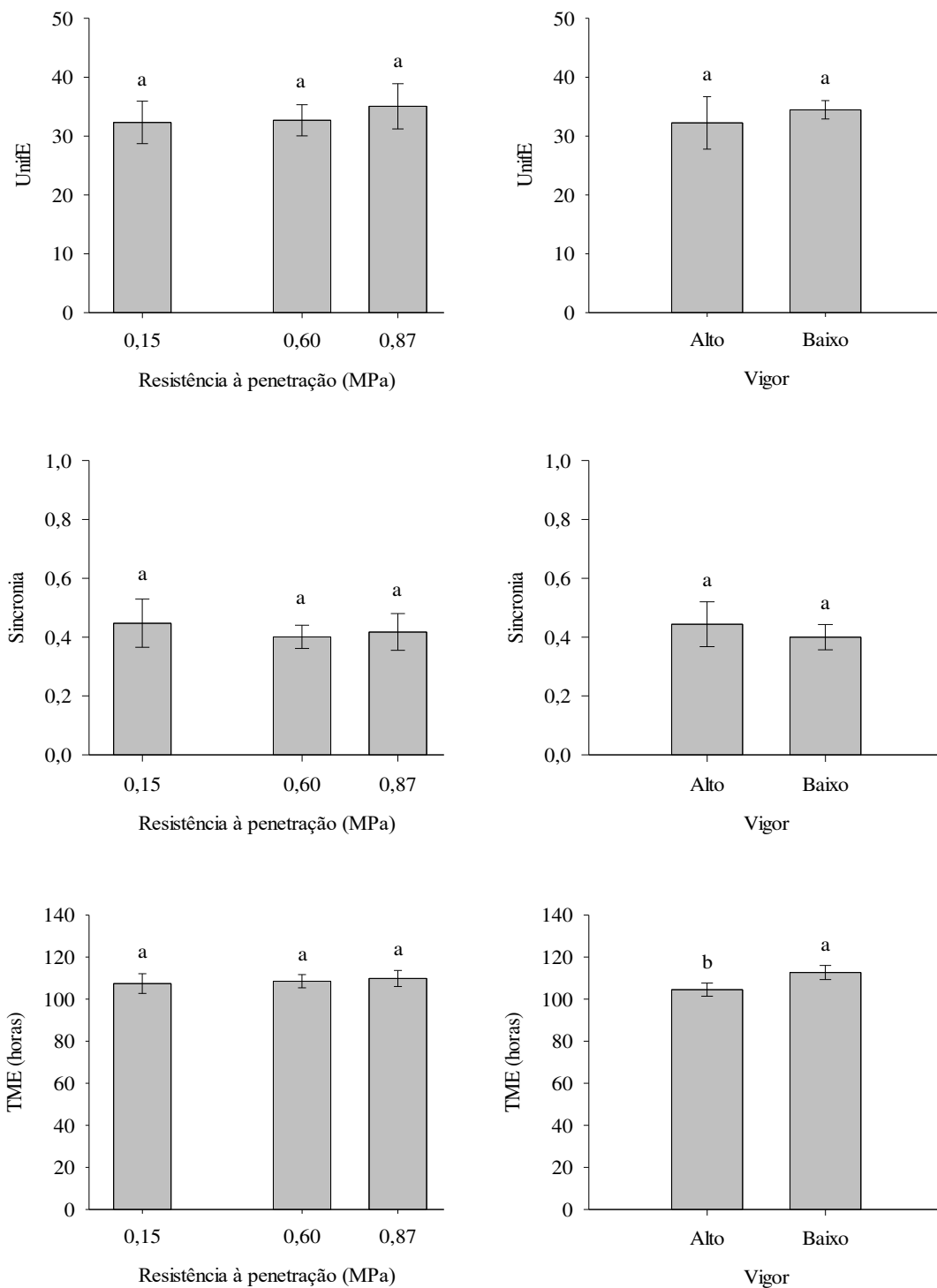


Figura 6. Índice de uniformidade de emergência (UnifE), Sincronia de emergência (Sinc) e Tempo médio de emergência (TME) de plântulas de soja da cultivar 2, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos para as características do sistema radicular da cultivar 1 apresentaram efeitos significativos tanto para resistência à penetração como para o vigor de sementes ($p < 0,05$). A interação entre os níveis dos fatores não foi significativa (Figura 7).

O comprimento total das raízes foi reduzido com o aumento da resistência à penetração (Figura 7). Em relação ao tratamento de 0,15 MPa, o comprimento foi reduzido em mais de 50% na resistência à penetração de 0,87 MPa. Nota-se, ainda, que as plântulas sob maior impedância mecânica (0,87 MPa) reduziram 46% da área superficial e 27% do volume de raízes, embora estes parâmetros não tenham diferido entre a moderada (0,60 MPa) e alta resistência à penetração (0,87 MPa). O aumento da impedância mecânica induziu o espessamento do diâmetro médio das raízes, com incremento de 43% em relação ao controle (Figura 7). Resultados semelhantes foram encontrados por Tracy et al. (2015) e Modolo et al. (2017), que observaram redução no volume, no comprimento, na área superficial das raízes e maior diâmetro radicular com o aumento da resistência à penetração.

Observou-se redução de aproximadamente 20% do comprimento, 14% da área superficial, 9% do volume e aumento de 9% do diâmetro das raízes provenientes do lote de baixo vigor de sementes. Assim, o lote de alto vigor, comparado ao de baixo vigor, apresentou maior comprimento, área superficial e volume das raízes, além de menor espessamento radicular.

O crescimento e desenvolvimento das plantas é comprometido em condição de elevada impedância mecânica, afetando negativamente a arquitetura do sistema radicular, influenciando a captura de recursos e limitando o volume de solo explorado (Tracy et al. 2012, 2013, 2015). A impedância mecânica interfere no crescimento das plantas, pois dificulta a absorção de água e nutrientes, interferindo significativamente nos parâmetros de crescimento radicular e de parte aérea (Szatanik-Kloc et al., 2018). Raízes mais finas (maior superfície específica) e de maior comprimento possuem vantagens em condição de impedimento físico do solo que geralmente está associado com estresse hídrico (Bengough et al., 2011).

O alongamento da raiz é reduzido à metade em resistência à penetração de 0,8 a 2 MPa, na ausência de estresse hídrico (Bengough et al., 2011). Isto ocorre por causa da redução da taxa de alongamento celular devido à redução na taxa de divisão celular do

meristema (Lipiec et al., 2012; Jin et al., 2013). Assim, o comprimento, a área superficial e o volume das raízes são reduzidos devido a alocação de fotoassimilados para aumento do diâmetro radicular (Whalley et al., 1999; Modolo et al., 2017). Assim, ocorre redistribuição das reservas das sementes para espessar as raízes tornando-as mais curtas e espessas (Finch-Savage e Bassel, 2016). Este espessamento radicular é devido ao aumento da área cortical, que reduz o risco de flambagem da raiz e diminui o estresse mecânico durante a penetração (Chimungu et al., 2015). Essa adaptação das plântulas pode ser considerada uma estratégia visando a superação das camadas mais compactadas do solo, sendo influenciada diretamente pela qualidade das sementes.

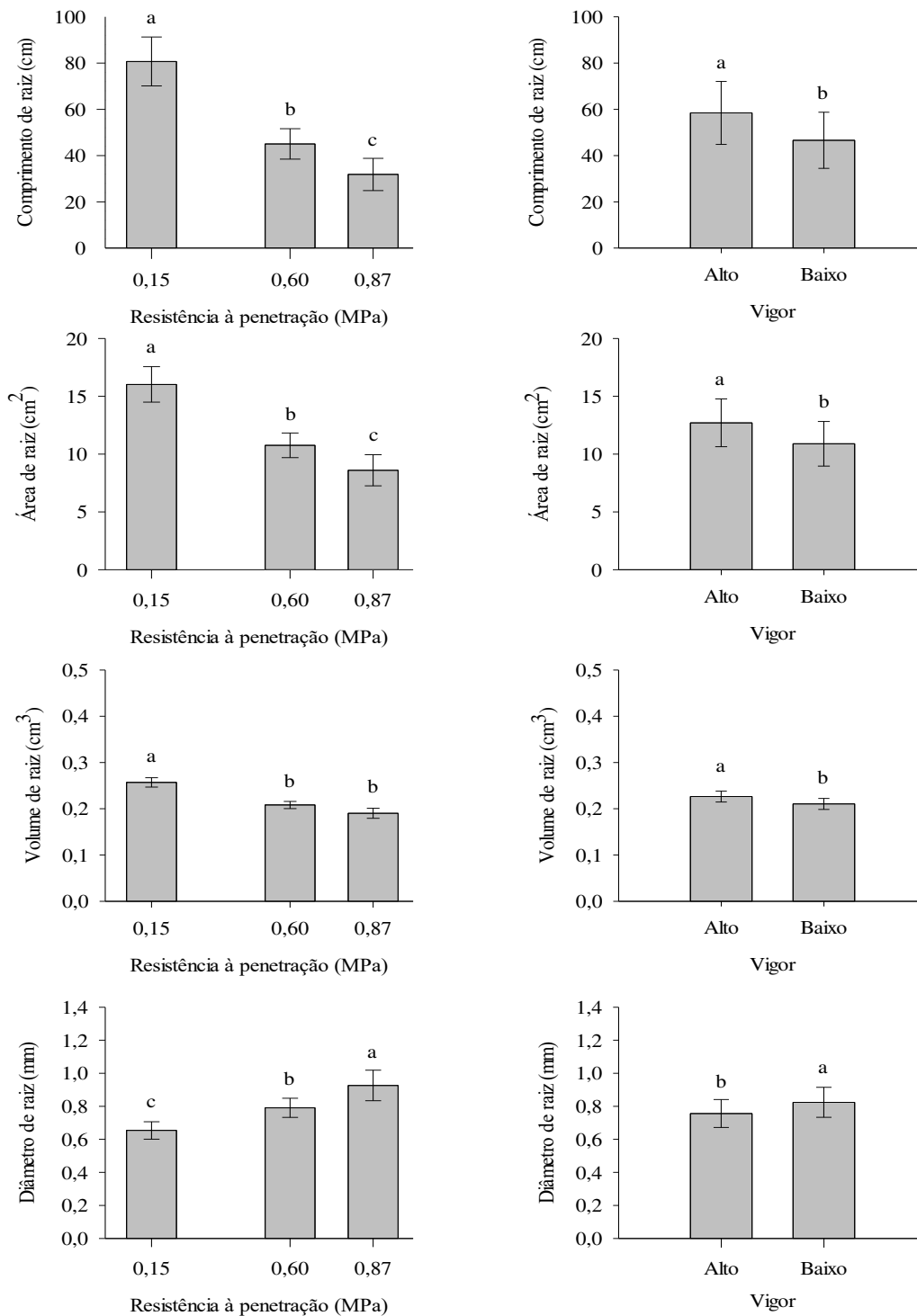


Figura 7. Comprimento total de raízes, área superficial total de raízes, volume total de raízes e diâmetro médio total de raízes por plântulas da cultivar 1, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

As características morfológicas do sistema radicular da cultivar 2 apresentaram resultados semelhantes aos obtidos para a cultivar 1 (Figura 8). Observou-se redução do comprimento total (57%), da área superficial total (44%) e do volume total das raízes (30%), além de maior espessamento do diâmetro radicular (34%) com o aumento da resistência à penetração. No entanto, não houve diferenças significativas entre a moderada (0,60 MPa) e alta (0,87 MPa) impedância mecânica.

O lote de baixo vigor da cultivar 2 também apresentou redução do comprimento (22%), área (19%) e volume total das raízes (17%) em relação ao lote de alto vigor de sementes. Porém, diferenças no diâmetro médio total das raízes entre os níveis de vigor não foram verificadas (Figura 8).

As alterações fenotípicas do sistema radicular e arquitetura de plântulas são influenciadas pelo genótipo (Chen et al., 2014; Colombi e Walter, 2017). Assim, é de grande importância a integração de características da raiz em programas de melhoramento para aumentar a tolerância das culturas ao estresse abiótico derivado do solo (York et al., 2013).

A transição de semente para plântula ocorre com a expansão celular, impulsionada por processos mecânicos que compreende, principalmente, a modificação da parede celular e turgor. O turgor é a força motriz da expansão, que juntamente com o enfraquecimento da parede celular promove o crescimento de células vegetais. De acordo com Bassel et al. (2014), quanto maior o tamanho das células, maior é sua capacidade de crescimento e geração de força em resposta à expressão gênica promotora do crescimento. Sementes vigorosas, apresentam maior capacidade de turgescência das células, o que possibilita melhor desempenho sob condição de estresse por impedância mecânica do substrato (Finch-Savage e Bassel, 2016).

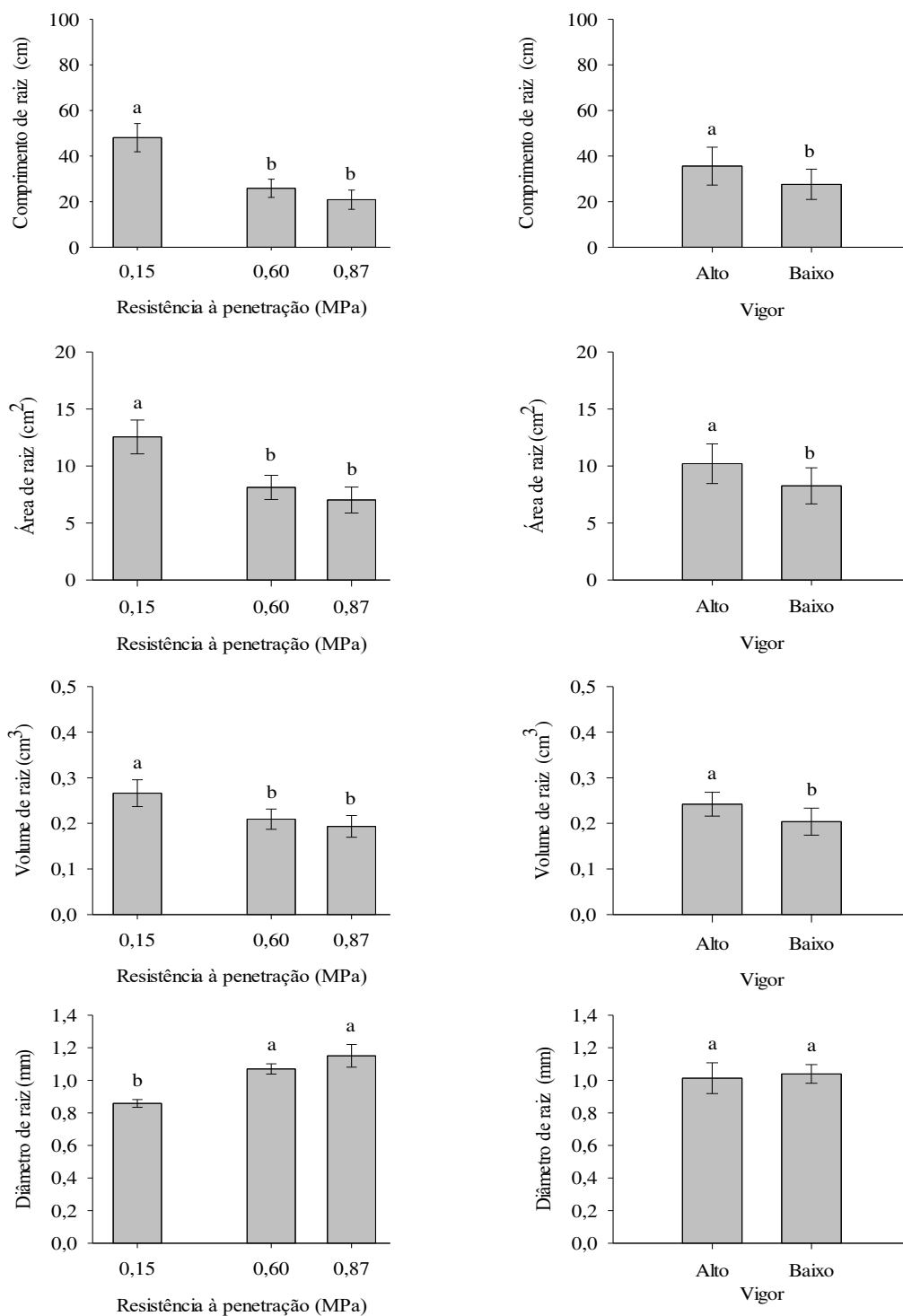


Figura 8. Comprimento total de raízes, área superficial total de raízes, volume total de raízes e diâmetro médio total de raízes por plântulas da cultivar 2, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Para a cultivar 1 observa-se que o aumento da resistência à penetração ocasionou redução do comprimento total das plântulas, de 22 cm (baixa impedância) para 16 cm (alta impedância). Entre os níveis de vigor, o lote de baixo vigor apresentou menor comprimento de plântula em relação ao lote de alto vigor (Figura 9).

O comprimento da parte aérea também foi influenciado pelos níveis de resistência à penetração (Figura 9). Maior comprimento foi observado na condição 0,60 MPa, seguido da alta e baixa resistência à penetração, respectivamente. O vigor também influenciou o crescimento das plântulas, que apresentaram maior comprimento no lote de alto vigor de sementes.

A raiz principal das plântulas de soja foi altamente sensível ao aumento da impedância mecânica, as quais apresentaram redução de 40% do comprimento na resistência à penetração de 0,87 MPa (Figura 9). Estes resultados foram coerentes com os encontrados na avaliação da morfologia do sistema radicular (Figura 7). No entanto, neste caso não se verificou diferenças significativas no comprimento radicular entre os níveis de vigor (Figura 9).

Para a cultivar 2, o comprimento total de plântulas também foi reduzido com aumento da impedância mecânica (27%), embora não se tenha observado diferenças significativas entre a moderada e alta resistência à penetração (Figura 10). O impedimento físico do substrato não comprometeu o crescimento da parte aérea, mas o comprimento radicular foi consideravelmente afetado, apresentando redução de 39%. Além disso, o vigor dos lotes de sementes interferiu no crescimento das plântulas. Maior comprimento total e de parte aérea foram verificados no lote de alto vigor, ainda que não tenha sido observado diferenças no comprimento das raízes.

De modo geral, a redução observada no comprimento das plântulas e de suas partes são devido à redução no alongamento das células por menor taxa na divisão celular do meristema, e maior redistribuição dos assimilados para espessamento radicular (Whalley et al., 1999). Além disso, em estudos prévios, mostrou-se que as respostas de plântulas ao impedimento físico são mais evidentes nas raízes (Colombi e Walter, 2017; Colombi et al., 2017).

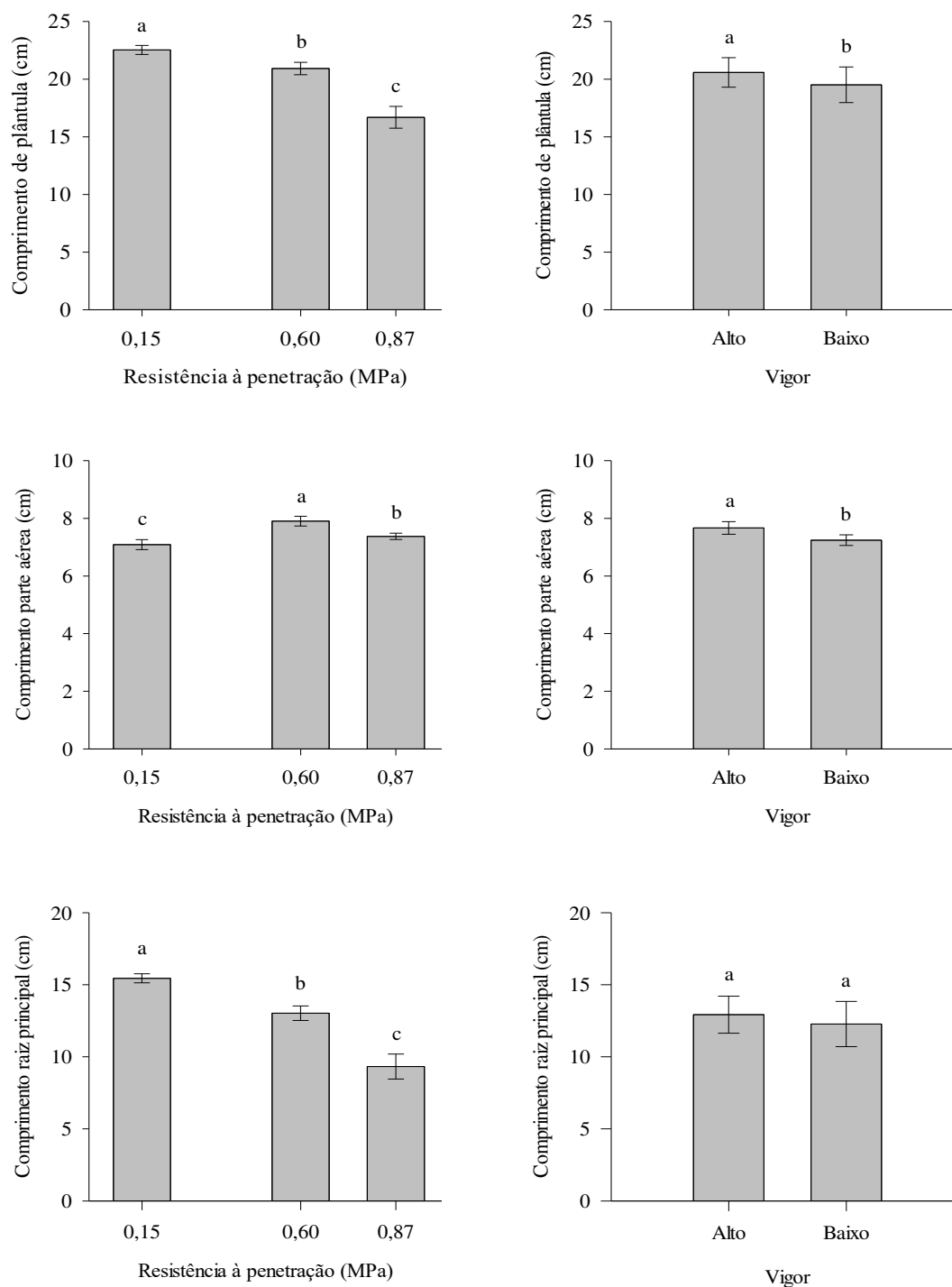


Figura 9. Comprimento total de plântulas, comprimento da parte aérea e comprimento de raiz principal por plântulas da cultivar 1, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

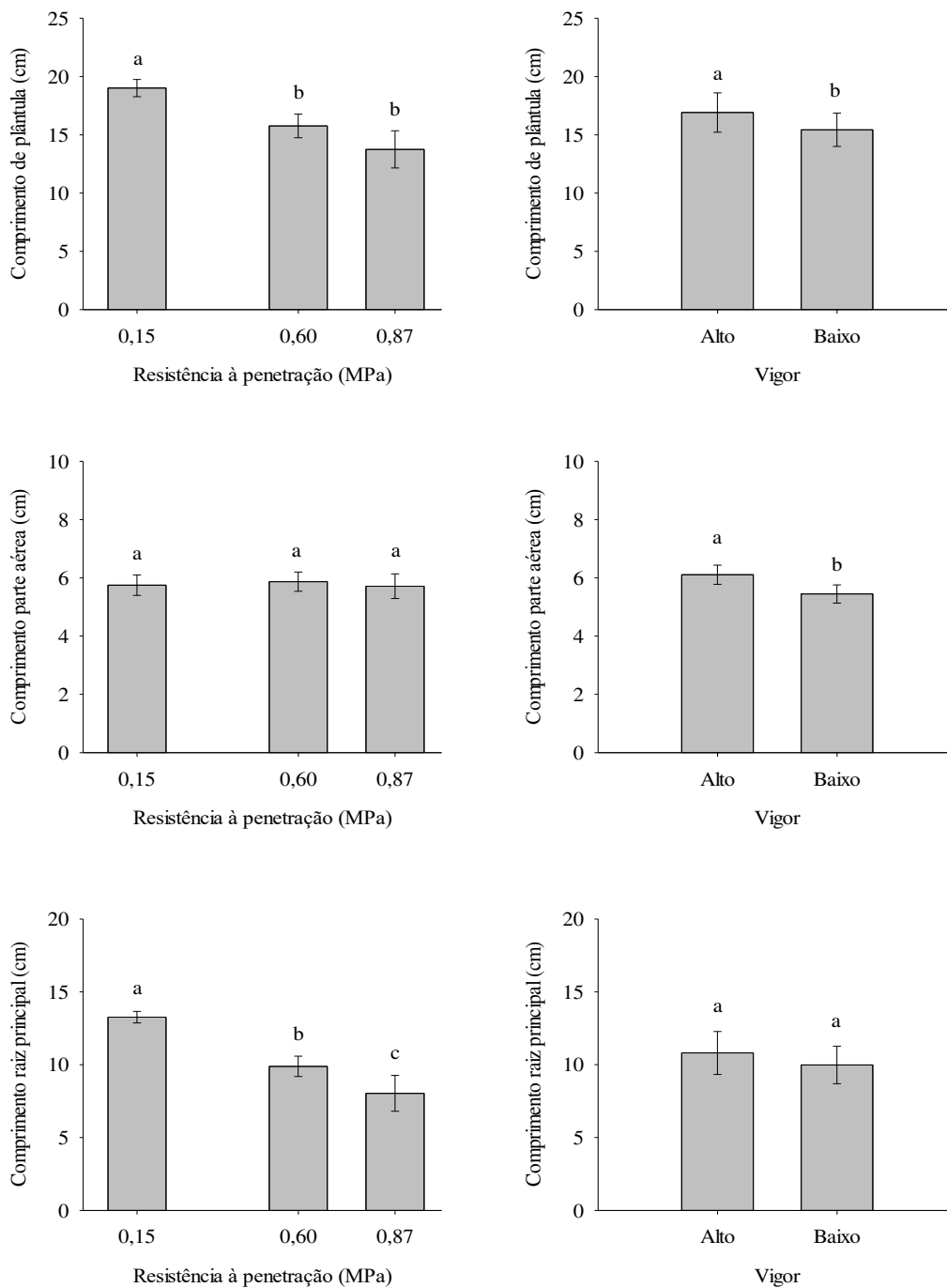


Figura 10. Médias do comprimento total de plântulas, comprimento da parte aérea e comprimento de raiz principal por plântulas da cultivar 2, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Em ambas as cultivares (cultivar 1 e cultivar 2) não se verificou diferenças na massa de matéria seca da parte aérea das plântulas com o aumento da resistência à penetração (Figura 11 e 12). No entanto, foi observado maior biomassa na parte aérea das plântulas oriundas do lote de alto vigor da cultivar 2, em relação ao lote de baixo vigor. Já a matéria seca de raiz foi substancialmente reduzida com o aumento da impedância mecânica para ambas as cultivares, redução de 35% para cultivar 1 e de 25% para cultivar 2.

Interação significativa foi verificada entre os níveis de resistência à penetração e níveis de vigor para matéria seca de raiz das plântulas da cultivar 1 (Figura 11). Entre os níveis de impedância, os lotes de alto e baixo vigor apresentaram redução da matéria seca de raiz com o aumento da resistência à penetração. E entre os níveis de vigor, a matéria seca de raiz do lote de baixo vigor reduziu na condição de 0,15 MPa, permaneceu constante em 0,60 MPa e aumentou em 0,87 MPa.

A redução da produção de raízes com o aumento da resistência à penetração pode ser explicada pelo menor comprimento das raízes crescidas em condição de impedimento físico do substrato. E sementes mais vigorosas possuem potencial para maior desempenho e produção de biomassa. Porém, sementes de menor vigor submetidas à elevada impedância mecânica apresentam maior espessamento de raiz em relação ao lote de alto vigor, que contribui significativamente para o incremento da matéria seca das plântulas (Finch-Savage e Bassel, 2016).

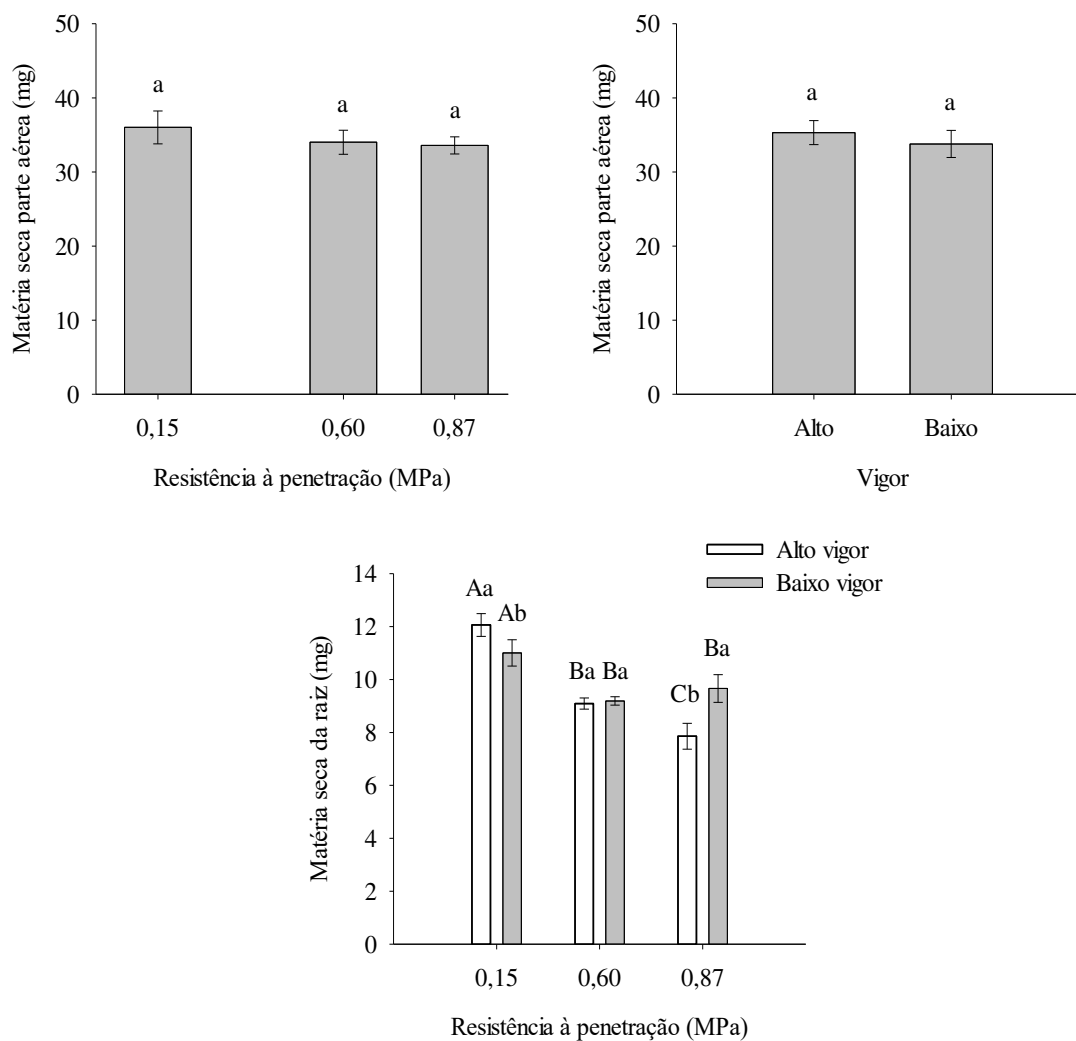


Figura 11. Massa de matéria seca da parte aérea e das raízes das plântulas de soja (15 plântulas) da cultivar 1, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Para interação significativa, letras maiúsculas comparam entre os níveis de resistência à penetração e letras minúsculas comparam entre os níveis de vigor.

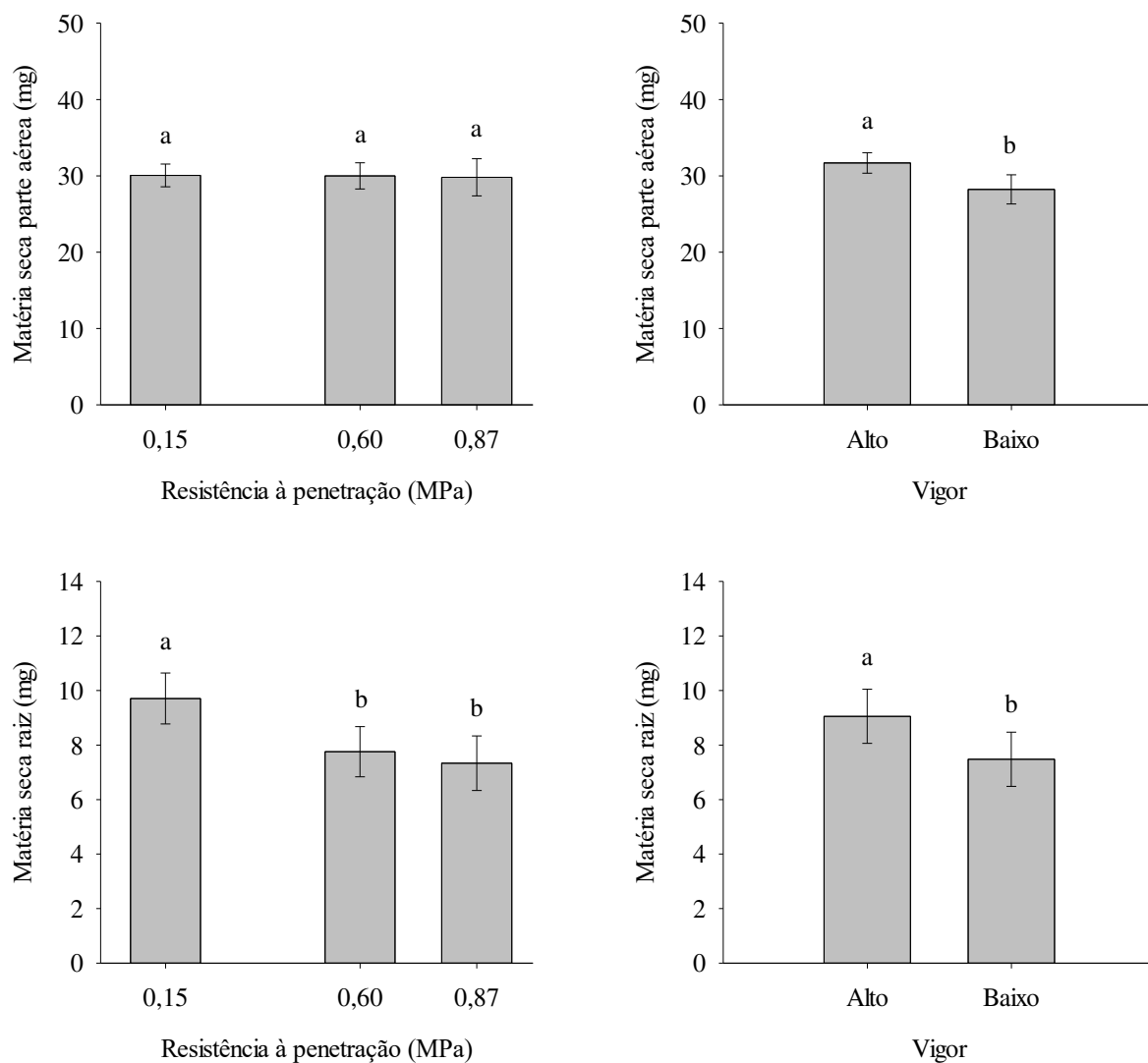


Figura 12. Massa de matéria seca da raiz e parte aérea de plântulas de soja da cultivar 2, oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor e submetidas a diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. As barras representam o erro padrão da média (n= 4). * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Em geral, houve redução da velocidade e uniformidade de emergência das plântulas com o aumento do nível de impedância mecânica do substrato, de ambas as cultivares (Figuras 1, 2, 3, 4, 5 e 6). Ainda, houve redução do comprimento da raiz principal, do volume radicular, da matéria seca de raiz e aumento do diâmetro radicular

com o aumento dos níveis de impedância mecânica do substrato (Figuras 7, 8, 9, 10, 11 e 12). A cultivar 2 apresenta ser mais sensível ao aumento da impedância mecânica do substrato, evidenciado pelos resultados de emergência e crescimento de plântulas. Mesmo com elevada resistência à penetração (0,87 MPa) a cultivar 1 apresentou maior comprimento e área superficial, além de menor diâmetro radicular (Figuras 7 e 8), características que favorecem o crescimento em solos compactados. Por fim, sementes de baixo vigor, de ambas as cultivares, apresentaram pior desempenho nos testes de emergência e de crescimento de plântulas.

CONCLUSÕES

O vigor das sementes de soja tem efeito sobre a tolerância das plântulas à compactação. Lotes de sementes de alto vigor apresentam maior velocidade de emergência das plântulas, maior comprimento, área superficial e volume das raízes, além de menor espessamento radicular, independente dos níveis de impedância mecânica do substrato.

REFERÊNCIAS

- Arvidsson J, Håkansson I. Response of different crops to soil compaction-Short-term effects in Swedish field experiments. *Soil Tillage Res.* 2014;138:56–63.
- Bassel GW, Stamm P, Mosca G, Barbier de Reuille P, Gibbs DJ, Winter R, Janka A, Holdsworth MJ, Smith RS. Mechanical constraints imposed by 3D cellular geometry and arrangement modulate growth patterns in the Arabidopsis embryo. *Proc Natl Acad Sci U S A. National Academy of Sciences*; 2014;111:8685–90.
- Bengough AG, McKenzie BM, Hallett PD, Valentine TA. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J Exp Bot.* 2011;62:59–68.
- Beutler AN, Centurion JF, Centurion MAPDC, Silva AP. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em latossolo vermelho. *Rev Bras Cienc do Solo.* 2006;30:787–794.
- Botta GF, Tolon-Becerra A, Lastra-Bravo X, Tourn M. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. *Soil Tillage Res. Elsevier B.V.*; 2010;110:167–174.
- BRASIL MDAPEA. Padrões para a produção e a comercialização de sementes de soja. Brasília; 2013.
- Chehab EW, Eich E, Braam J. Thigmomorphogenesis: a complex plant response to mechano-stimulation. *J Exp Bot. Oxford University Press*; 2008;60:43–56.
- Chen YL, Palta J, Clements J, Buirchell B, Siddique KHM, Rengel Z. Root architecture alteration of narrow-leafed lupin and wheat in response to soil compaction. *F Crop Res. Elsevier B.V.*; 2014;165:61–70.
- Chimungu JG, Loades KW, Lynch JP. Root anatomical phenes predict root penetration ability and biomechanical properties in maize (*Zea Mays*). *J Exp Bot.* 2015;66:3151–3162.
- Colebrook EH, Thomas SG, Phillips AL, Hedden P. The role of gibberellin signalling in plant responses to abiotic stress. *J Exp Biol.* 2014;217:67–75.
- Colombi T, Kirchgessner N, Walter A, Keller T. Root tip shape governs root elongation

rate under increased soil strength. *Plant Physiol.* 2017;174:2289–2301.

Colombi T, Walter A. Genetic diversity under soil compaction in wheat: root number as a promising trait for early plant vigor. *Front Plant Sci.* 2017;8:1–14.

Da Silva Freddi O, Centurion JF, Beutler AN, Aratani RG, Leonel CL. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. *Rev Bras Cienc do Solo.* 2007;31:627–636.

Dutra AS, Daiton Vieira R. Accelerated aging as test of vigor for corn and soybean seeds. *Ciência Rural.* 2004;715–721.

Ferreira EB, Cavalcanti PP, Nogueira DA, Ferreira MEB. Pacote experimental designs (Portuguese). 2018.

Fessel SA, Panobianco M, Souza CR de, Vieira RD. Teste de condutividade elétrica em sementes de soja armazenadas sob diferentes temperaturas. *Bragantia. Instituto Agrônômico;* 2010;69:207–214.

Finch-Savage WE, Bassel GW. Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. *J Exp Bot.* 2016;67:567–591.

Fried HG, Narayanan S, Fallen B. Characterization of a soybean (*Glycine max* L. Merr.) germplasm collection for root traits. *PLoS One. Public Library of Science;* 2018;13:e0200463.

Gemtos TA, Goulas C, Lellis T. Sugar beet genotype response to soil compaction stress. *Eur J Agron.* 2000;12:201–209.

Grzesiak MT, Ostrowska A, Hura K, Rut G, Janowiak F, Rzepka A, Hura T, Grzesiak S. Interspecific differences in root architecture among maize and triticale genotypes grown under drought, waterlogging and soil compaction. *Acta Physiol Plant.* 2014;36:3249–3261.

Hyatt J, Wendroth O, Egli DB, TeKrony DM. Soil compaction and soybean seedling emergence. *Crop Sci.* 2007;47:2495–2503.

Jin K, Shen J, Ashton RW, Dodd IC, Parry MAJ, Whalley WR. How do roots elongate in a structured soil? *J Exp Bot.* 2013;64:4761–4777.

Kobodziejek J, Patykowski J. Effect of environmental factors on germination and

emergence of invasive rumex confertus in Central Europe. 2015;

Lebert M, Horn R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage Res.* 1991;19:275–286.

Lipiec J, Horn R, Pietrusiewicz J, Siczek A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil Tillage Res. Elsevier B.V.*; 2012;121:74–81.

Marcos Filho J. Seed physiology of cultivated plants. ABRATES, organizador. Londrina; 2016.

Materechera SA, Alston AM, Kirby JM, Dexter AR. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant Soil.* 1992;144:297–303.

Modolo AJ, Dedordi GF, Vargas TDO, Baesso MM, Ricardo J, Gonçalves R, Andrade GS, Trogello E. Effect of seed-furrow openers on soybean root growth in compacted Oxisol. 2017;12:1067–1073.

Nafziger ED, Carter PR, Graham EE. Response of Corn to Uneven Emergence. *Crop Sci.* 1991;31:811–815.

Nosalewicz A, Lipiec J. The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat. *Plant Soil.* 2014;375:229–240.

Oliveira JD de, Silva JB da, Alves CZ. Treatments to increase, accelerate and synchronize emergence in seedlings of mucuna-preta. *Rev Ciência Agronômica.* 2017;48:531–539.

Roque AA de O, de Souza ZM, Barbosa RS, de Souza GS. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. *Pesqui Agropecu Bras.* 2010;45:744–750.

Silva L, Medeiros AD, Oliveira MAS. SeedCalc: seed germination and seedling growth indexes. R package version 1.0.0.2018.

Silva FJ da, Oliveira CAA de, Almeida L da S, Lima LP de, Guimarães EC. Variabilidade espacial da resistência do solos a penetração e produtividade do milho. *Rev da Agric Neotrop.* 2017;4:77–84.

Szatanik-Kloc A, Horn R, Lipiec J, Siczek A, Szerement J. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. *Soil Tillage Res. Elsevier*;

2018;175:226–233.

Tracy SR, Black CR, Roberts JA, Dodd IC, Mooney SJ. Using X-ray Computed Tomography to explore the role of abscisic acid in moderating the impact of soil compaction on root system architecture. *Environ Exp Bot.* Elsevier B.V.; 2015;110:11–18.

Tracy SR, Black CR, Roberts JA, Mooney SJ. Soil compaction: A review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *J Sci Food Agric.* 2011;91:1528–1537.

Tracy SR, Black CR, Roberts JA, Sturrock C, Mairhofer S, Craigon J, Mooney SJ. Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in tomato (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography. *Ann Bot.* 2012;110:511–519.

Valicheski RR, Grossklaus F, Stürmer SLK, Tramontin AL, Baade ESAS. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient.* 2012;16:969–977.

Vieira RD. KFC. Vigor de sementes: conceitos e testes. ABRATES. 1999;

WE WWrf-S. The encyclopaedia of seeds: science, technology and uses. *Ann Bot.* 2006;100:1379–1379.

Whalley WR, Finch-Savage WE. Crop emergence, the impact of mechanical impedance. 2010. p. 163–167.

Whalley WR, Whalley WR, Finch-savage RE, Finch-savage RE, Cope RE, Cope RE, Rowse HR, Rowse HR, Bird NR a, Bird NR a. The response of carrot (*Daucus carota* L.) and onion (*Allium cepa* L.) seedlings to mechanical impedance and water stress at sub-optimal temperatures. *Plant, Cell Environ.* 1999;22:229–242.

York LM, Nord EA, Lynch JP. Integration of root phenes for soil resource acquisition. *Front Plant Sci.* *Frontiers*; 2013;4:355.

CAPÍTULO III

EFEITO DO VIGOR DAS SEMENTES NAS RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE PLÂNTULAS DE SOJA À IMPEDÂNCIA MECÂNICA DO SUBSTRATO

RESUMO

Alterações no metabolismo envolvendo moléculas de sinalização, como as espécies reativas de oxigênio e hormônios, têm sido implicadas em respostas de plantas à compactação do solo. Assim, estudos que visem elucidar estes mecanismos durante a emergência das plântulas são importantes, visto que esta é uma das etapas críticas do estabelecimento da cultura e pode determinar os níveis de produtividade alcançados. Neste contexto, a influência do vigor das sementes na tolerância das sementes e plântulas, durante a germinação e emergência, à elevada impedância mecânica do substrato ainda é pouco compreendida. Assim, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito do vigor das sementes nas alterações fisiológicas e bioquímicas das plântulas de soja sob diferentes níveis de impedância mecânica do substrato. O experimento foi conduzido em casa de vegetação climatizada, no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 2x3, sendo dois níveis de vigor de sementes (alto e baixo) e três níveis de resistência à penetração do substrato (0,15; 0,60 e 0,87 MPa). Após a caracterização fisiológica dos lotes de sementes pelos testes tradicionais (germinação e vigor), foram avaliados os efeitos da impedância mecânica e do vigor de sementes na concentração de etileno nas plântulas, bem como os níveis de proteínas solúveis totais e a atividade das enzimas do sistema antioxidativo em duas cultivares de soja. Assim, o vigor das sementes não afetou a biossíntese de etileno e o conteúdo de proteína nas plântulas de soja sob impedância mecânica, aos sete dias após a semeadura. As respostas aos níveis elevados de impedância mecânica são dependentes do vigor das sementes e da cultivar em estudo. Aumento da atividade da CAT na raiz, aumento e redução da APX e SOD, respectivamente na parte aérea da cultivar 1 foram observados nas plântulas oriundas de sementes de alto vigor. Já a cultivar 2 apresenta maior atividade da SOD na raiz, sem alterações nas demais enzimas, independente do vigor das sementes.

ABSTRACT

Effect of seed vigour on physiological and biochemical responses of soybean seedlings to the mechanical impedance of the substrate

Changes in metabolism involving signalling molecules, such as reactive oxygen species and hormones, have been implicated in plant responses to soil compaction. Thus, studies aiming to elucidate these mechanisms during emergence of seedlings are important, since this is one of the critical stages of crop establishment and can determine the levels of productivity achieved. In this context, the influence of seed vigour on the tolerance of seeds and seedlings to the high mechanical impedance of the substrate during germination and emergence is still poorly understood. Thus, the objective of this study was to evaluate the effect of seed vigour on the physiological and biochemical changes of soybean seedlings under different levels of mechanical impedance of the substrate. The experiment was conducted in a greenhouse under a randomized complete block design with four replications. The treatments were arranged in a 2x3 factorial scheme, with two levels of seed vigour (high and low) and three levels of resistance to penetration of the substrate (0.15, 0.60 and 0.87 MPa). After the physiological characterization of seed lots by traditional tests (germination and vigour), it was evaluated the effects of mechanical impedance and seed vigour on ethylene concentration in the seedlings, as well as the total soluble protein levels and enzyme activity of the antioxidative system of two soybean cultivars. Thus, seed vigour did not affect the ethylene biosynthesis and protein content in soybean seedlings under mechanical impedance at seven days after sowing. Responses to high levels of mechanical impedance of the substrate are dependent on seed vigour and cultivar under study. Increased CAT activity in the root, increasing and reduction of APX and SOD, respectively in the seedling shoots of the cultivar 1 were observed in seedlings originated from high vigour seeds. Finally, the cultivar 2 showed higher SOD activity in the root, without alterations in the other enzymes' activity, regardless of the seed vigour.

INTRODUÇÃO

O intenso trânsito de máquinas agrícolas, a modernização da agricultura e o manejo incorreto do solo têm contribuído para o aumento de áreas compactadas (Jin et al., 2013). Este problema é frequente em áreas produtoras de soja (*Glycine max* (L.) Merrill), sendo que esta cultura é sensível a níveis elevados de compactação do solo, o que provoca desuniformidade no estabelecimento da cultura e no crescimento e desenvolvimento das plantas, além de reduzir a produtividade (Beutler et al., 2006).

Todas as plantas percebem e respondem a forças mecânicas, ainda que diferencialmente. As respostas das raízes à impedância mecânica podem ser críticas para processos fundamentais, tais como regulação do turgor, expansão celular e morfogênese (Okada et al., 1994). Moléculas de sinalização e hormônios, incluindo espécies reativas de oxigênio, atividade de enzimas, etileno, auxina e ácido abscísico, têm sido implicados em respostas mecânicas das plantas (Masle, 2002; Chehab et al., 2008).

O etileno promove alterações morfológicas no sistema radicular de plântulas sob condição de impedância mecânica do solo. O aumento na concentração deste hormônio aumenta a capacidade de penetração das raízes em camadas compactadas (Sarquis et al., 1991; Okamoto et al., 2008), devido à interação com a via de sinalização das auxinas (Santisree et al., 2011). Assim, o etileno é essencial para o sucesso da emergência das plântulas em condição de impedimento físico do substrato, sendo que sua biossíntese é estimulada pela impedância mecânica do solo (Zhong et al., 2014). Shi et al. (2016) demonstraram que o etileno é necessário para as plântulas responderem ao estresse mecânico imposto pelo solo. Além disto, o etileno é considerado um indicador bioquímico do vigor de sementes, para lotes com baixo vigor, mas alta capacidade de germinação (Siriwitayawan et al., 2003).

As espécies reativas de oxigênio (EROs) também desempenham um papel fundamental na regulação de numerosas respostas às tensões abióticas nas plantas, e são continuamente produzidas durante o desenvolvimento de sementes (Baxter et al., 2013). As EROs podem atuar nas vias de sinalização celular e como produtos tóxicos que se acumulam sob condições de estresse. Assim, a acumulação descontrolada de EROs ocasiona danos oxidativos nas biomoléculas e, em última análise, necrose e morte celular (Bailly et al., 2008). Contudo, este processo é mitigado nas células por vários mecanismos enzimáticos desintoxicantes, por meio da atividade das enzimas catalase (CAT),

peroxidases (POX), peroxidase do ascorbato (APX) e superóxido dismutase (SOD) presentes em quase todos os compartimentos subcelulares. O equilíbrio da atividade destas enzimas é crucial para suprimir os níveis de EROs tóxicos em uma célula, controlando a extensão dos danos (Mittler et al., 2004). Assim, as EROs são benéficas para as plântulas durante o estresse abiótico quando estas permitem ajustes no seu metabolismo e criam respostas de aclimação adequada. No entanto, isto só acontece enquanto as células mantêm reservas de energia suficientemente altas para controlar os níveis elevados destas moléculas (Choudhury et al., 2017).

O vigor é um fator importante que define a capacidade de boa performance das sementes durante a germinação e emergência das plântulas em condições de compactação do solo, o que pode afetar a uniformidade de estabelecimento da cultura e a produtividade. Diversos mecanismos fisiológicos e moleculares estão associados ao vigor de sementes (Finch-Savage e Bassel, 2016). Porém, apesar da importância central para a agricultura, este aspecto ainda é pouco compreendido e geralmente negligenciado na pesquisa acadêmica. Assim, novas abordagens são necessárias para a compreensão desses complexos processos metabólicos que atuam no estabelecimento da cultura em solos compactados.

Portanto, objetivou-se com este estudo avaliar o efeito do vigor das sementes nas alterações fisiológicas e bioquímicas das plântulas de soja sob diferentes níveis de impedância mecânica do substrato.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação climatizada, com controle de temperatura (25 °C), na área experimental Diogo Alves de Mello da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG. Sementes de duas cultivares de soja foram utilizadas. As cultivares foram escolhidas com base nos resultados obtidos no primeiro experimento (Capítulo I), as quais apresentaram, respectivamente, melhor e pior desempenho quanto a tolerância à compactação.

Obtenção dos níveis de vigor dos lotes

Para a obtenção de lotes de sementes com dois níveis de vigor, os lotes originais de ambas as cultivares foram divididos em dois, sendo um deles submetido ao envelhecimento artificial, a 42°C, por 24 horas, conforme metodologia descrita para o teste de envelhecimento acelerado (Dutra e Daiton Vieira, 2004). Após o envelhecimento, as sementes foram secas naturalmente em condições de ambiente de laboratório antes do início dos testes. Assim, os lotes de sementes das cultivares 1 e 2 foram classificados em dois níveis de vigor, sendo que o lote não envelhecido foi considerado de alto vigor, e o lote envelhecido artificialmente correspondeu ao lote de baixo vigor.

Os lotes de sementes foram caracterizados quanto à qualidade fisiológica por meio da determinação do teor de água, germinação, primeira contagem de germinação, emergência de plântulas, índice de velocidade de emergência, envelhecimento acelerado e condutividade elétrica, conforme metodologia descrita no capítulo I.

Impedância mecânica do substrato

O aumento da impedância mecânica do substrato foi simulado por meio do sistema proposto no Capítulo I. Três níveis de impedância mecânica do substrato foram avaliados de acordo com os tratamentos: 0 (controle), 13 e 26 kg que aplicaram, respectivamente, uma pressão de 0, 6 e 12 MPa sobre a areia. Para avaliar a resistência à penetração das raízes imposta pelos tratamentos, foi utilizado o Penetrômetro de Solos Automatizado – TE-096, da marca Tecnal[®]. Os tratamentos de 0 (controle), 6 e 12 MPa proporcionaram, respectivamente, uma resistência à penetração máxima de 0,15 MPa (baixa), 0,60 MPa (moderada) e 0,87 (alta) MPa.

Aos sete dias após a semeadura, o sistema foi desmontado e as plântulas foram coletadas e submetidas às avaliações para quantificação da concentração de etileno, do teor de proteínas e determinação da atividade de enzimas do sistema de defesa antioxidativo.

Quantificação do etileno

Para quantificação do hormônio etileno, foram coletadas três plântulas por repetição de cada tratamento. Após 24h, o etileno ficou acumulado na atmosfera dos frascos Erlenmeyer (60 ml) e foi quantificado de acordo com a técnica descrita por Silva et al. (2014). A atmosfera dos frascos foi homogeneizada utilizando-se uma seringa ultrafina (agulhas 29 G 1/2") de 1,0 ml, e foi coletada uma amostra de 1,0 ml desta atmosfera. A concentração de etileno (expressa em $\text{pmol ml}^{-1} \text{ g}^{-1}$ de matéria fresca) foi avaliada em cromatógrafo a gás Hewlett Packard 5890, serie II (USA), com um detector de ionização de chama com temperatura de 150 °C, um injetor à 110 °C e uma coluna de aço inoxidável (1,0 m x 6,0 mm), empacotada com Porapak-N (80-100 mesh) à 60 °C. Foi utilizado como gás de arraste o nitrogênio em fluxo de 30 ml min^{-1} . Os fluxos do hidrogênio e do ar sintético foram mantidos em 30 e 320 ml min^{-1} , respectivamente. O etileno foi determinado por meio da comparação entre as áreas das amostras obtidas no Software Peak-2 Simple® com as áreas de picos de uma mistura padrão de etileno de concentração conhecida.

Extração e determinação da atividade enzimática

Para a quantificação da atividade das enzimas do sistema de defesa antioxidativo, na parte aérea e sistema radicular das plântulas de soja, foram utilizadas quatro repetições de 15 plântulas cada. As amostras foram secadas por 8h em liofilizador (*Integrated Speed Vac System*). O material vegetal liofilizado foi armazenado em dessecador e, posteriormente, em freezer à -20 °C. Determinou-se o teor de proteínas e a atividade das enzimas do sistema 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 0,1 g do tecido vegetal liofilizado, em nitrogênio líquido e, então, adicionados 2 mL de meio de homogeneização, seguido de centrifugação a 12.000g por 15 min, a 4 °C. O meio de homogeneização utilizado foi composto por tampão fosfato de potássio 0,1 mol/L, pH 6,8, ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) 0,0001 mol/L, fluoreto de fenilmetilsulfônico (PMSF) 0,001 mol/L e polivinilpirrolidona (PVPP) 1% (p/v) (Peixoto et al., 1999).

Determinação do teor de proteínas

Os teores de proteínas foram determinados pelo método de Bradford (1976), utilizando BSA como solução padrão. Para isso, 100 µL do extrato enzimático foi adicionado a 1 mL do reagente de Bradford, seguido de agitação por 20 minutos. Posteriormente, foi realizada a leitura da absorbância da amostra em espectrofotômetro no comprimento de onda de 595 nm, utilizando cubeta de plástico.

Determinação da atividade enzimática

Catalase (CAT)

Para determinar a atividade da catalase (CAT), 100 µL do extrato enzimático bruto foi adicionado a 2,9 mL de meio de reação, constituído de tampão fosfato de potássio 0,05 mol L⁻¹, pH 7,0 e H₂O₂ 0,0125 mol L⁻¹ (Havir et al., 1987). A leitura da absorbância do meio de reação foi realizada utilizando-se o comprimento de onda de 240 nm, durante 1 min. A atividade enzimática foi calculada utilizando-se coeficiente de extinção molar de 36 mol L⁻¹ cm⁻¹ (Anderson et al., 1995) e expressa em µmol min⁻¹ mg⁻¹ de proteína.

Peroxidase do ascorbato (APX)

A atividade da peroxidase do ascorbato (APX) foi determinada pela adição de 100 µL do extrato enzimático bruto a 2,9 mL de meio de reação constituído de ácido ascórbico 0,000 25 mol L⁻¹, EDTA 0,0001 mol L⁻¹ e H₂O₂ 0,0003 mol L⁻¹ em tampão fosfato de potássio 0,05 mol L⁻¹, pH 7,8. A leitura da absorbância do meio de reação foi realizada utilizando-se o comprimento de onda de 290 nm, durante 1 min, a 25°C (Nakano et al., 1981). A atividade enzimática foi calculada utilizando-se o coeficiente de extinção molar de 0,0028 mol L⁻¹ cm⁻¹ e expressa em nmol min⁻¹ mg⁻¹ de proteína.

Peroxidase (POX)

A atividade da peroxidase (POX) 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 0,025 mol L⁻¹, pH 6,8, pirogalol 0,020 mol L⁻¹ e peróxido de hidrogênio 0,020 mol L⁻¹ (Kare, 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 0,00247 mol L⁻¹ cm⁻¹ (Chance et al., 1995) e expressa em μmol min⁻¹ mg⁻¹ de proteína.

Superóxido dismutase (SOD)

Para determinar a atividade da superóxido dismutase (SOD) foi utilizado 100 μL do extrato enzimático bruto a 2,97mL de meio de reação constituído de tampão fosfato de potássio 0,05 mol L⁻¹, pH 7,8, contendo metionina 0,013 mol L⁻¹, azul de p-nitro tetrazólio (NBT) 7,5×10⁻⁵ mol L⁻¹, EDTA 0,0001 mol L⁻¹ e riboflavina 2,0×10⁻⁶ mol L⁻¹ (Del Longo et al., 1993). A reação ocorreu à 25°C em câmara com iluminação de uma lâmpada fluorescente de 15 W, mantida no interior de uma caixa coberta com papel alumínio. Após 25 minutos de exposição à luz, a reação foi interrompida pelo desligamento das luzes e as leituras foram realizadas a 560 nm. O branco consistiu na leitura de um meio de reação idêntico, porém, sem a presença de luz (Giannopolitis et al., 1977). Uma unidade (U) da SOD foi considerada como a quantidade de enzima requerida para inibir 50 % da fotorredução do NBT em comparação com o meio de reação sem o extrato proteico (Beauchamp et al., 1971). A atividade da SOD foi expressa em U min⁻¹ mg⁻¹ de proteína.

Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 2x3, sendo dois níveis de vigor de sementes (alto e baixo) e três níveis de impedância mecânica do substrato (0,15; 0,60 e 0,87 MPa). Dois experimentos foram conduzidos, em duas etapas, sendo que o primeiro teve como material de estudo a cultivar 1, e o segundo experimento a cultivar 2. A primeira etapa de cada experimento consistiu na condução de duas repetições, sendo que cada repetição teve sua replicata. Na segunda etapa foram conduzidas as outras duas repetições e suas respectivas replicatas.

A análise estatística foi efetuada seguindo o modelo tradicional de esquema fatorial, utilizando o pacote “ExpDes.pt” do programa R (Ferreira et al., 2018). Quando a interação entre níveis de vigor e níveis de impedância foi significativa ($p < 0,05$), procedeu-se a análise de variância e a comparação das médias pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da caracterização fisiológica pelos testes de germinação e vigor das sementes, encontram-se na Tabela 1 do capítulo II. Estes resultados permitiram diferenciar os dois lotes de sementes, envelhecidos e não envelhecidos artificialmente, de ambas as cultivares, quanto ao nível de vigor. Assim, nas análises subsequentes foram utilizados dois lotes de sementes das cultivares com dois níveis de vigor.

Interação não-significativa ($p < 0,05$) foi observada para os níveis de etileno entre os tratamentos de resistência à penetração e os níveis de vigor das sementes (Figura 1). A produção de etileno pelas plântulas de soja não foi influenciada pelas condições de impedância mecânica para ambas as cultivares avaliadas. Os níveis de vigor dos lotes de sementes também não diferiram quanto à concentração do hormônio vegetal.

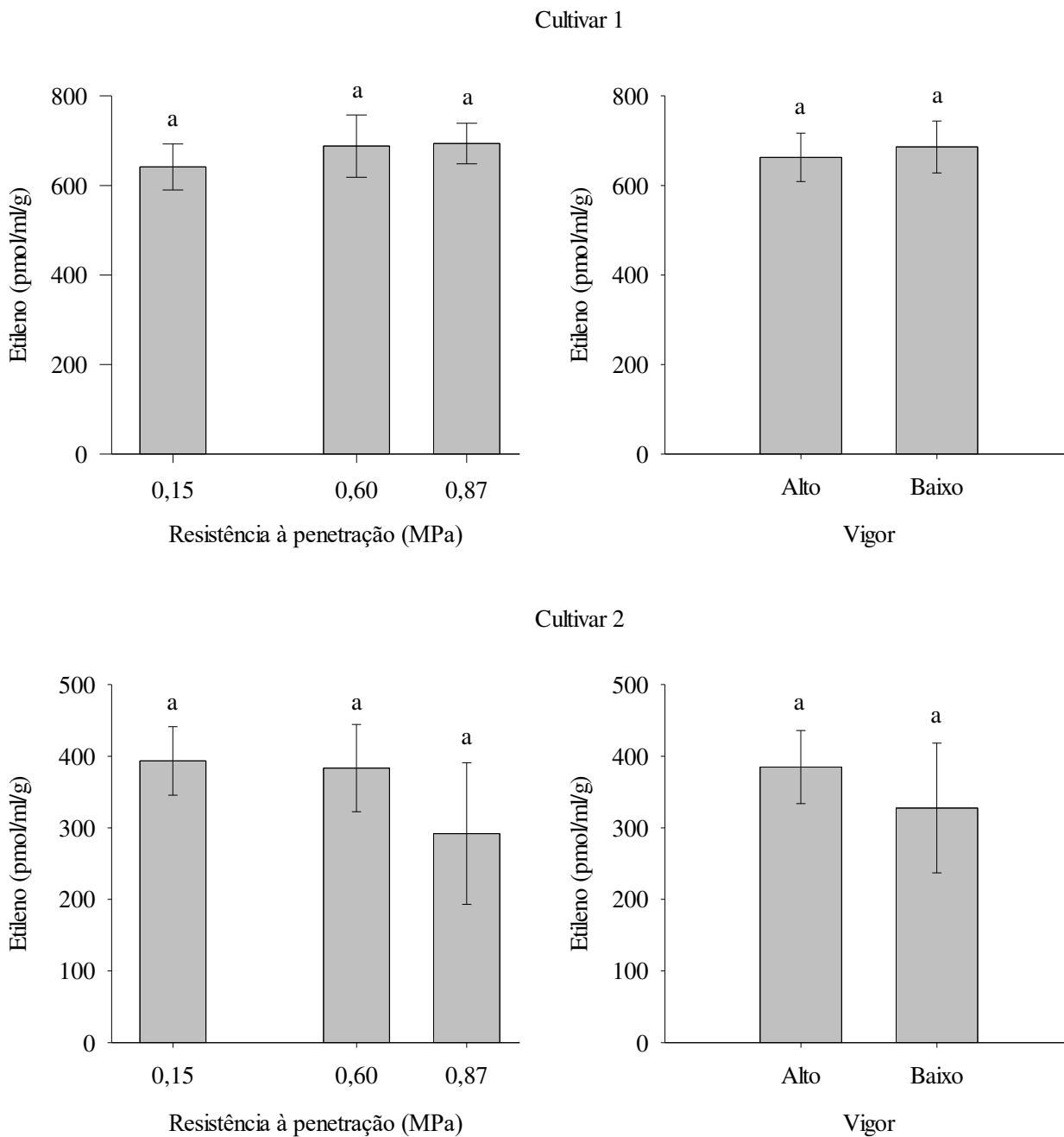


Figura 1. Produção de etileno por plântulas de duas cultivares de soja submetidas à diferentes impedâncias mecânicas do substrato e em resposta ao vigor das sementes. As barras representam o erro padrão da média. * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (níveis de resistência à penetração) e pelo teste F (níveis de vigor) a 5% de probabilidade.

Como resposta aos vários fatores de estresse, ocorrem mudanças rápidas nos níveis hormonais dos tecidos vegetais, decorrentes de alterações no equilíbrio entre a síntese, a degradação e o transporte destes hormônios. Algumas dessas mudanças podem ser respostas adaptativas às condições estressantes, enquanto outras podem ser uma expressão de distúrbios metabólicos (Taiz et al., 2006). Assim, existem evidências de que a impedância mecânica do substrato estimula a biossíntese do etileno em plântulas (Goeschl et al., 1966; Kays et al., 1974; Ecker, 1995). No entanto, este fato não foi confirmado no presente trabalho nas plântulas de soja aos sete dias após a emergência (Figura 1). Em condição de estresse, as respostas das plântulas envolvendo a produção de etileno são específicas da espécie e dependem de fatores intrínsecos e ambientais. Ainda, a produção de etileno pode ser afetada por outros fitohormônios, com os quais interage, como o ABA (Sharp, 2002), a síntese e sinalização das auxinas (Burg e Burg, 1966; Dugardeyn e Van Der Straeten, 2008; Alarcon et al., 2009) e as citocininas (Bertell e Eliasson, 1992). Além disso, a resposta ao estresse por compactação pode ser mais evidente para outros hormônios, como o ABA (Lachno et al., 1982; Hartung et al., 1994; Grzesiak et al., 2016), giberelina (Coelho Filho et al., 2013), auxina (Lachno et al., 1982), que apesar de não terem sido quantificados neste estudo, poderiam ter evidenciado as alterações metabólicas nas plântulas sob estresse por impedimento físico do substrato.

O melhor desempenho das sementes está relacionado com o alto vigor e, conseqüentemente, maior capacidade de produção de etileno (Huang e Khan, 1992). Assim, era esperado maior concentração deste fitohormônio nas plântulas oriundas de sementes de alto vigor, porém o efeito do etileno parece ser mais evidente durante o processo de germinação, com aumento na velocidade deste processo. O aumento na concentração de etileno proporciona aumento da atividade da endo- β -mananase, enzima da parede celular responsável pelo enfraquecimento do endosperma (Nascimento et al., 2004).

Nas Figuras 2 e 3 estão apresentados os dados de proteínas totais de raiz e de parte aérea de plântulas de soja das cultivares 1 e 2, respectivamente. Para a cultivar 1 (Figura 2), foi observada interação significativa entre os níveis de resistência à penetração e os níveis de vigor ($p < 0,05$) para conteúdo de proteína na raiz. Para esta cultivar, foi observada diferença apenas entre os níveis de vigor no tratamento com menor nível de impedimento físico do substrato (0,15 MPa), sendo que as plântulas oriundas de sementes de alto vigor apresentaram maior conteúdo de proteína. Em relação à parte aérea das

plântulas, o conteúdo de proteína não foi influenciado pelos níveis de resistência à penetração e pelos níveis de vigor. Já para a cultivar 2, não foi observado efeito dos tratamentos no conteúdo de proteínas solúveis totais das plântulas (Figura 3).

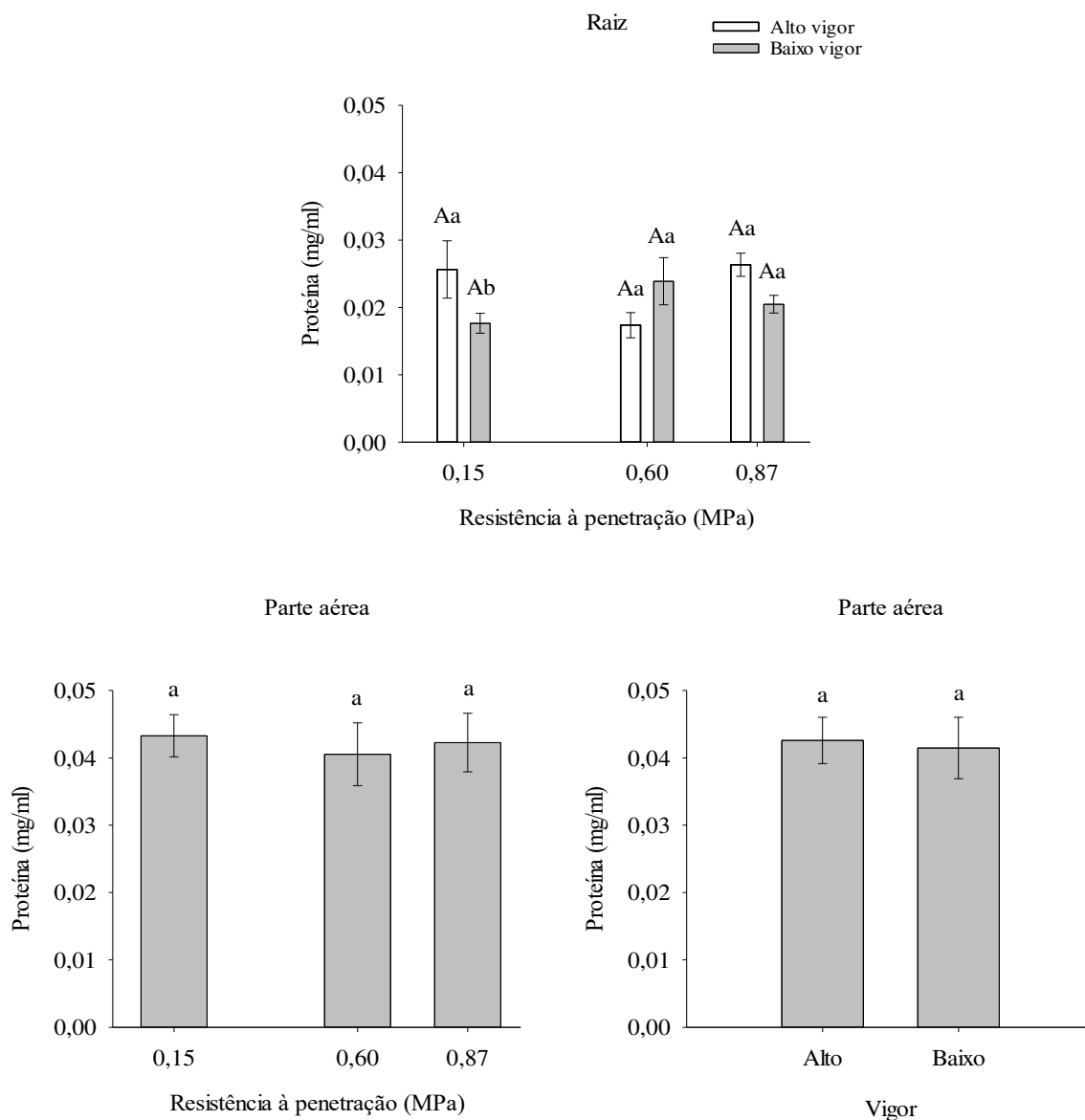


Figura 2. Conteúdo de proteína da raiz e da parte aérea de plântulas de soja da cultivar 1 submetidas à diferentes impedâncias mecânicas do substrato e oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor. As barras representam o erro padrão da média. * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (níveis de resistência à penetração) e pelo teste F (níveis de vigor) a 5% de probabilidade. Para os dados de raiz, as letras maiúsculas comparam os níveis de impedância do substrato e as letras minúsculas os diferentes níveis de vigor.

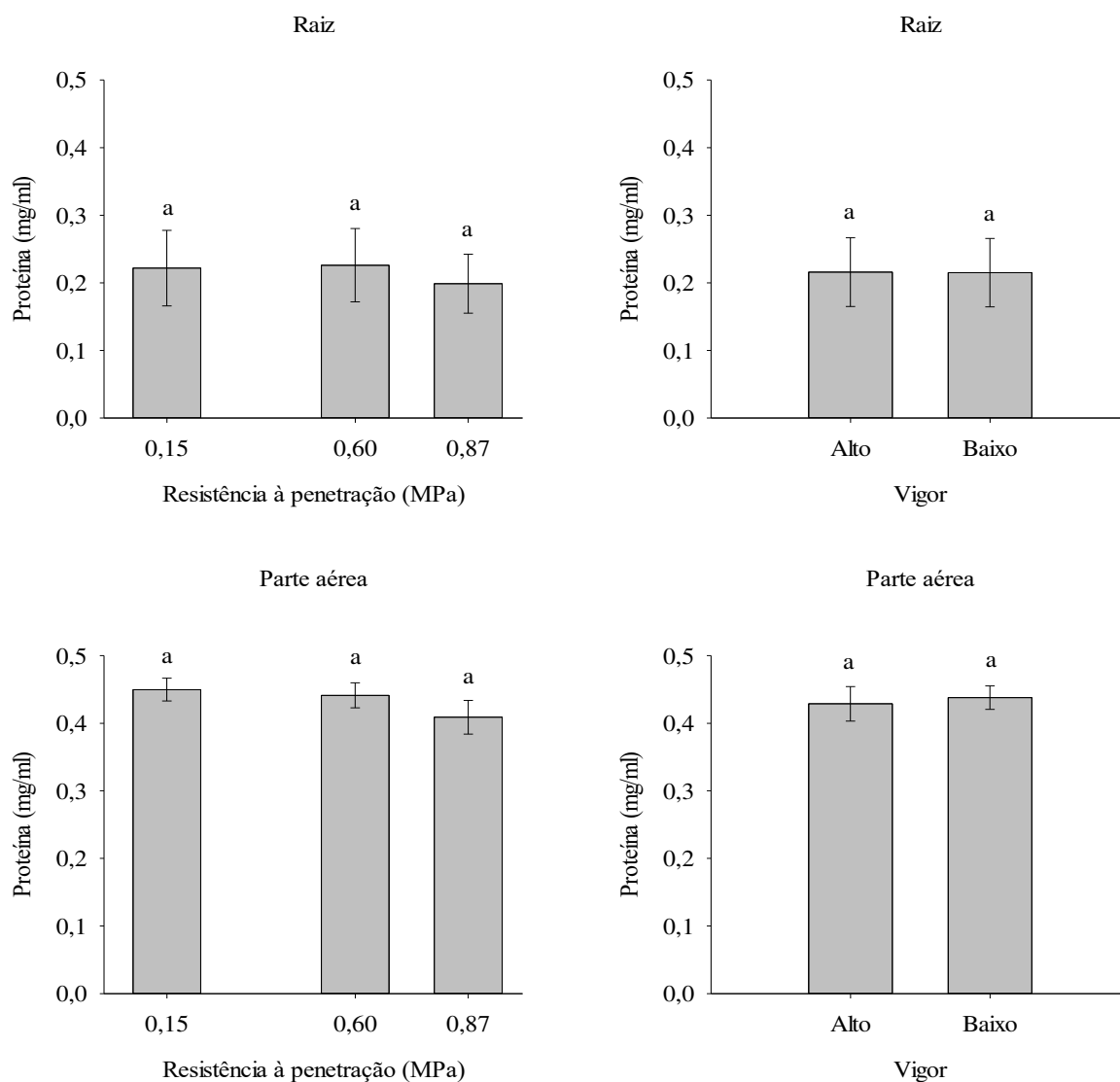


Figura 3. Conteúdo de proteína da raiz e da parte aérea de plântulas de soja da cultivar 2 submetidas à diferentes impedâncias mecânicas do substrato e oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor. As barras representam o erro padrão da média. * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (níveis de resistência à penetração) e pelo teste F (níveis de vigor) a 5% de probabilidade.

O aumento da resistência à penetração do substrato não alterou o conteúdo de proteína do sistema radicular e parte aérea das plântulas de soja das cultivares 1 (Figura 2) e 2 (Figura 3), porém muitos estudos comprovam que o estresse abiótico aumenta a produção de EROs e afeta diretamente o estado de oxidação das proteínas (Hippeli e Elstner, 1996; König et al., 2012; Truong e Carroll, 2013; Akter et al., 2015; Reczek e

Chandel, 2015; Waszczak et al., 2015), porém não necessariamente associado à redução no conteúdo, que seria mais expressivo em condições de estresse severo ou prolongado.

Já quanto aos níveis de vigor, foi observado maior nível de proteínas nas plântulas do tratamento com menor nível de impedância mecânica (0,15 MPa), sendo que os valores foram menores para o lote de baixo vigor (Figura 2). O conteúdo de proteínas nas plântulas está diretamente ligado ao teor de proteínas das sementes e depende do vigor (Ries e Everson, 1973; Henning et al., 2010), sendo que este efeito ainda pode ser observado nas plântulas com apenas sete dias. Assim, o lote classificado como de baixo vigor, que passou por um processo de envelhecimento artificial, pode ter tido parte das proteínas comprometidas pelo processo de degradação (Walters, 1998; McDonald, 1999), ou a mobilização das reservas armazenadas pode ter sido menos eficiente. A redução do conteúdo de proteínas causa perda da atividade de enzimas, como por exemplo, as enzimas do sistema antioxidativo, importantes para o processo de germinação das sementes e emergência das plântulas (Sun e Leopold, 1995).

Não houve alterações nos níveis de proteína do sistema radicular e da parte aérea das plântulas de soja entre os níveis de vigor, em todos os níveis de impedância mecânica do substrato para a cultivar 2 (Figura 3), e nos níveis 0,60 e 0,87 MPa, para a cultivar 1 (Figura 2), possivelmente pelo fato de as sementes apresentarem vigor ainda relativamente alto. Embora neste estudo os lotes foram classificados em alto e baixo vigor, os lotes de baixo vigor apresentaram porcentagem de germinação superior a 80% (valor mínimo para comercialização de soja no Brasil).

Para a cultivar 1, houve interação significativa entre os níveis dos fatores para a atividade da enzima CAT (Figura 4). Comparando entre os níveis de resistência à penetração, o lote de alto vigor apresentou aumento expressivo da atividade da enzima CAT nas raízes das plântulas sob elevada resistência à penetração (0,87 MPa), aproximadamente três vezes o que foi observado para o controle (0,15 MPa). No entanto, para o lote de baixo vigor não foi observado efeito dos níveis de impedância na atividade da enzima. Ainda, comparando-se os níveis de vigor, foi possível observar redução drástica da atividade da CAT no lote de menor vigor em condição de elevada resistência à penetração, de aproximadamente 94%, comparado ao de maior vigor. E, em relação à parte aérea das plântulas, não houve diferenças na atividade da enzima entre os níveis de resistência à penetração e níveis de vigor, exceto em 0,60 MPa, em que o lote de baixo vigor apresentou maior atividade da CAT. Possivelmente estes resultados estão

associados à maior concentração de proteína (Figura 2) que, apesar de não diferir estatisticamente, apresentou maior valor para o lote de alto vigor, no maior nível de estresse, e menor vigor, no nível moderado de impedância mecânica.

Para a cultivar 2, não foi observado efeito significativo dos níveis de impedância mecânica e do vigor das sementes na atividade da CAT (Figura 5).

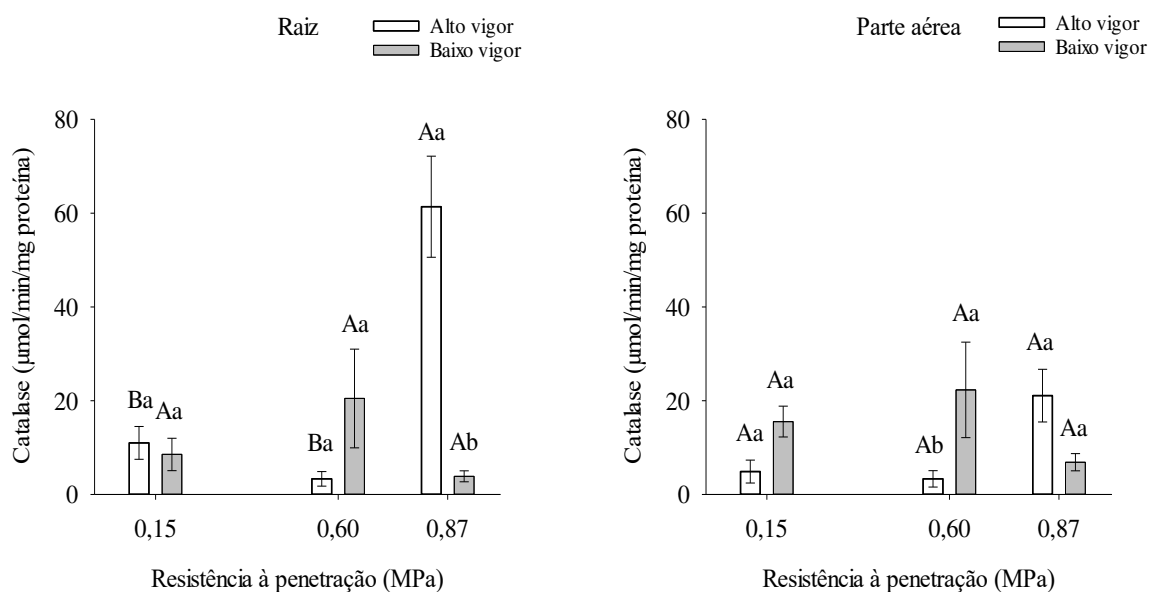


Figura 4. Atividade da enzima catalase (CAT) na raiz e na parte aérea de plântulas de soja da cultivar 1 submetidas à diferentes impedâncias mecânicas do substrato e oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor. As barras representam o erro padrão da média. * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (níveis de resistência à penetração) e pelo teste F (níveis de vigor) a 5% de probabilidade. Letras maiúsculas comparam os níveis de impedância do substrato e as letras minúsculas os diferentes níveis de vigor.

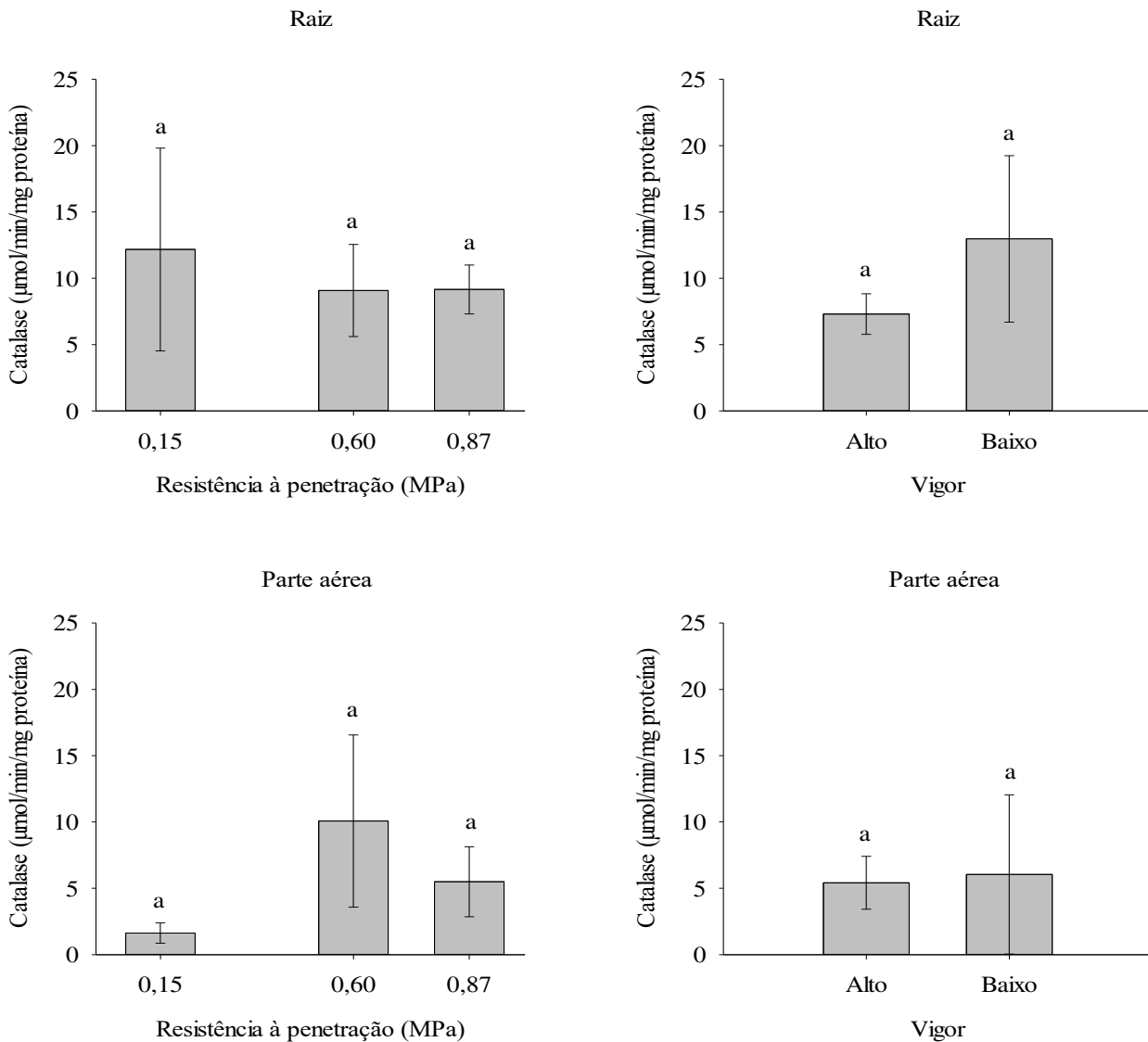


Figura 5. Atividade da enzima catalase (CAT) na raiz e na parte aérea de plântulas de soja da cultivar 2 submetidas à diferentes impedâncias mecânicas do substrato e oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor. As barras representam o erro padrão da média. * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (níveis de resistência à penetração) e pelo teste F (níveis de vigor) a 5% de probabilidade.

Comparando-se os níveis de resistência à penetração não houve diferenças significativas na atividade da enzima APX para as raízes das plântulas, da cultivar 1 (Figura 6), e raízes e parte aérea, da cultivar 2 (Figura 7). Além disso, os níveis de vigor não influenciaram a atividade da enzima.

Já para a parte aérea das plântulas da cultivar 1, houve interação significativa entre os níveis dos fatores ($p < 0,05$). Comparando-se os níveis de resistência à penetração

observa-se aumento na atividade da APX na condição de 0,87 MPa, em relação à 0,15 MPa, para o lote de alto vigor. Porém, não houve diferença na atividade da enzima no nível moderado de impedância comparado à baixa e alta resistência à penetração. Para o lote de baixo vigor, maior atividade foi observada em 0,60 MPa, não diferindo da condição de 0,87 MPa (Figura 6).

Na comparação entre os níveis de vigor, não foi observada diferença entre o lote de alto e baixo vigor nas resistências à penetração de 0,15 e 0,87 MPa, porém o lote de menor vigor apresentou maior atividade da APX na condição de 0,60 MPa (Figura 6).

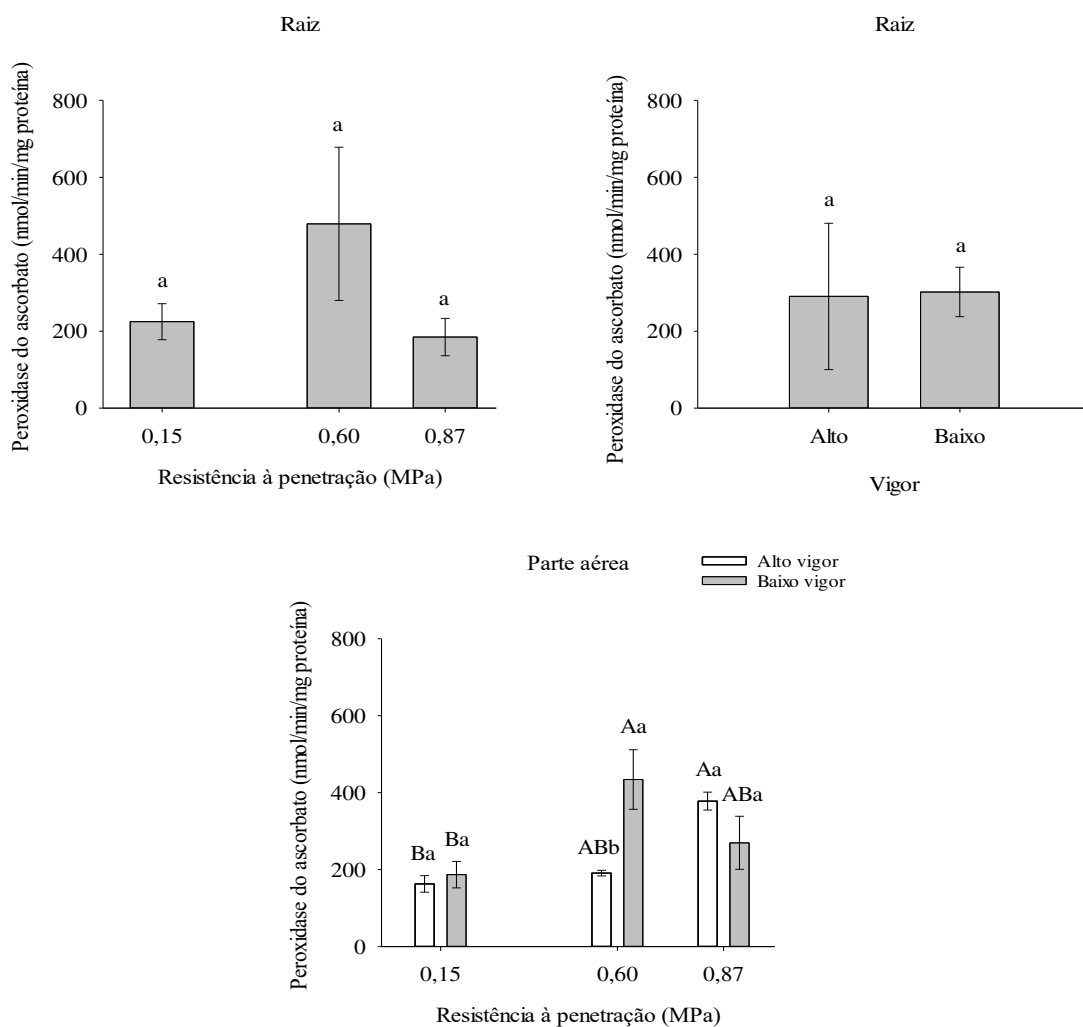


Figura 6. Atividade da enzima peroxidase do ascorbato (APX) na raiz e na parte aérea de plântulas de soja da cultivar 1 submetidas à diferentes impedâncias mecânicas do substrato e oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor. As barras representam o erro padrão da média. * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste

Tukey (níveis de resistência à penetração) e pelo teste F (níveis de vigor) a 5% de probabilidade. Para os dados de parte aérea, as letras maiúsculas comparam os níveis de impedância do substrato e as letras minúsculas os diferentes níveis de vigor.

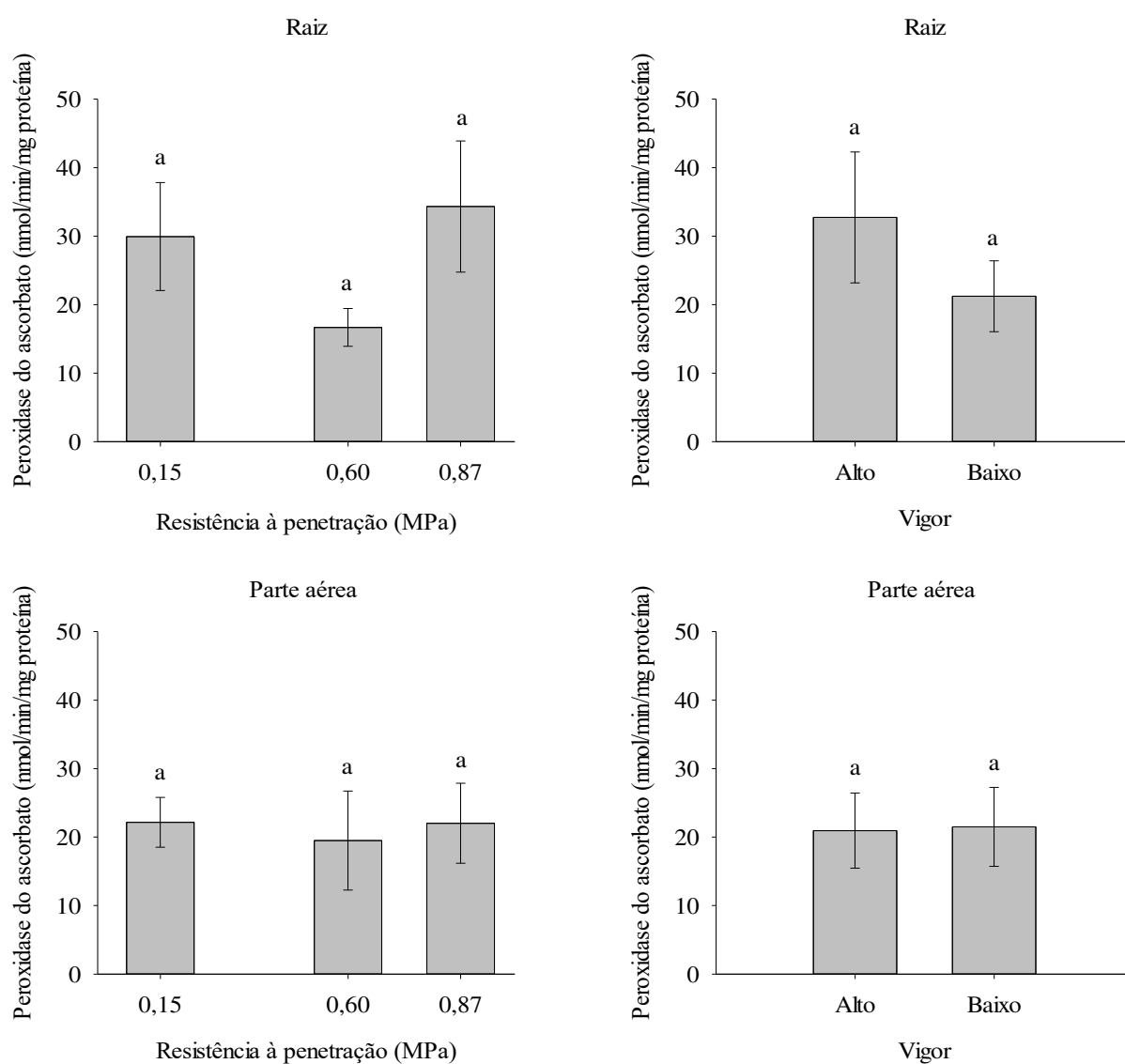


Figura 7. Atividade da enzima peroxidase do ascorbato (APX) na raiz e na parte aérea de plântulas de soja da cultivar 2 submetidas à diferentes impedâncias mecânicas do substrato e oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor. As barras representam o erro padrão da média. * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (níveis de resistência à penetração) e pelo teste F (níveis de vigor) a 5% de probabilidade.

A atividade da enzima POX na raiz e na parte aérea das plântulas de soja não foi influenciada pelos níveis de resistência à penetração e pelos níveis de vigor de sementes, para ambas as cultivares (Figuras 8 e 9).

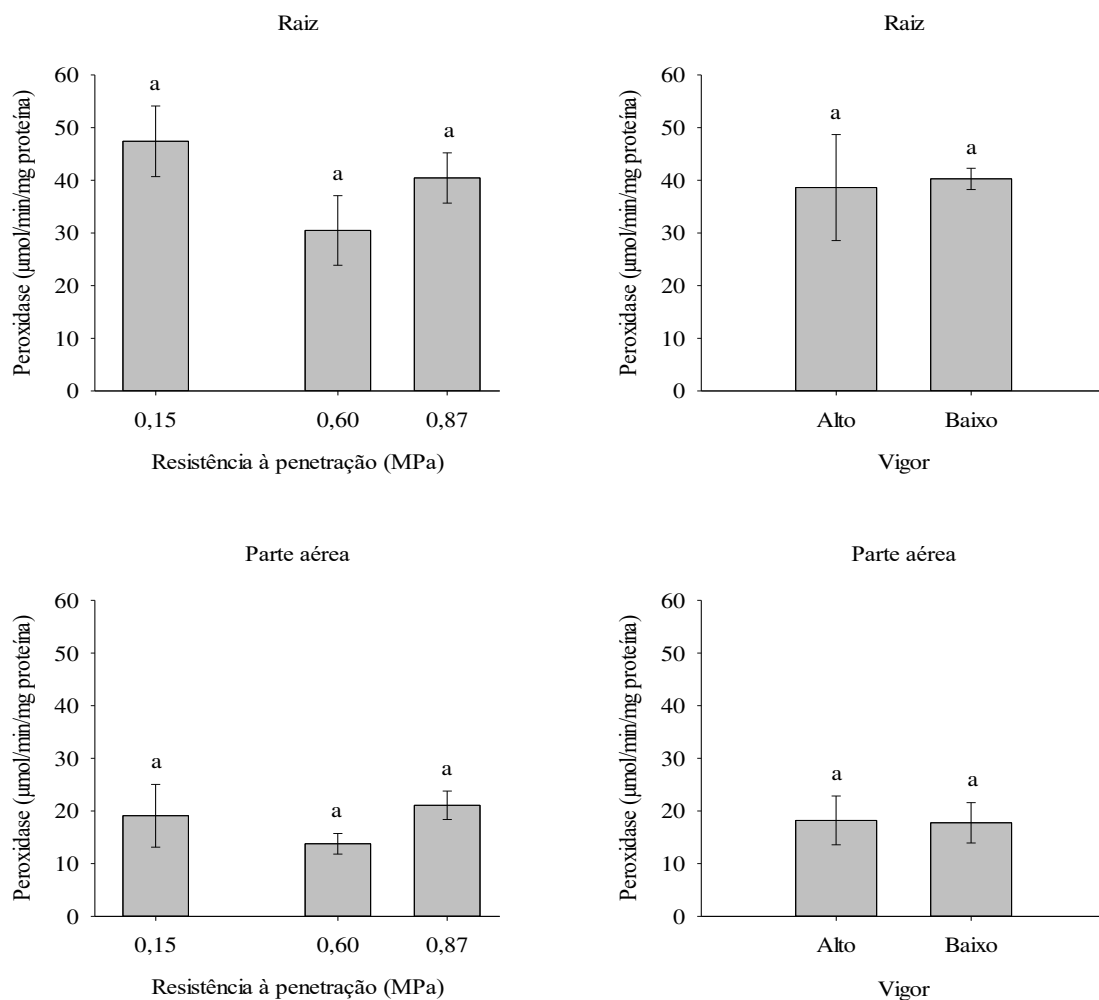


Figura 8. Atividade da enzima peroxidase (POX) na raiz e na parte aérea de plântulas de soja (cultivar 1) submetidas à diferentes impedâncias mecânicas do substrato e oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor. As barras representam o erro padrão da média. * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (níveis de resistência à penetração) e pelo teste F (níveis de vigor) a 5% de probabilidade.

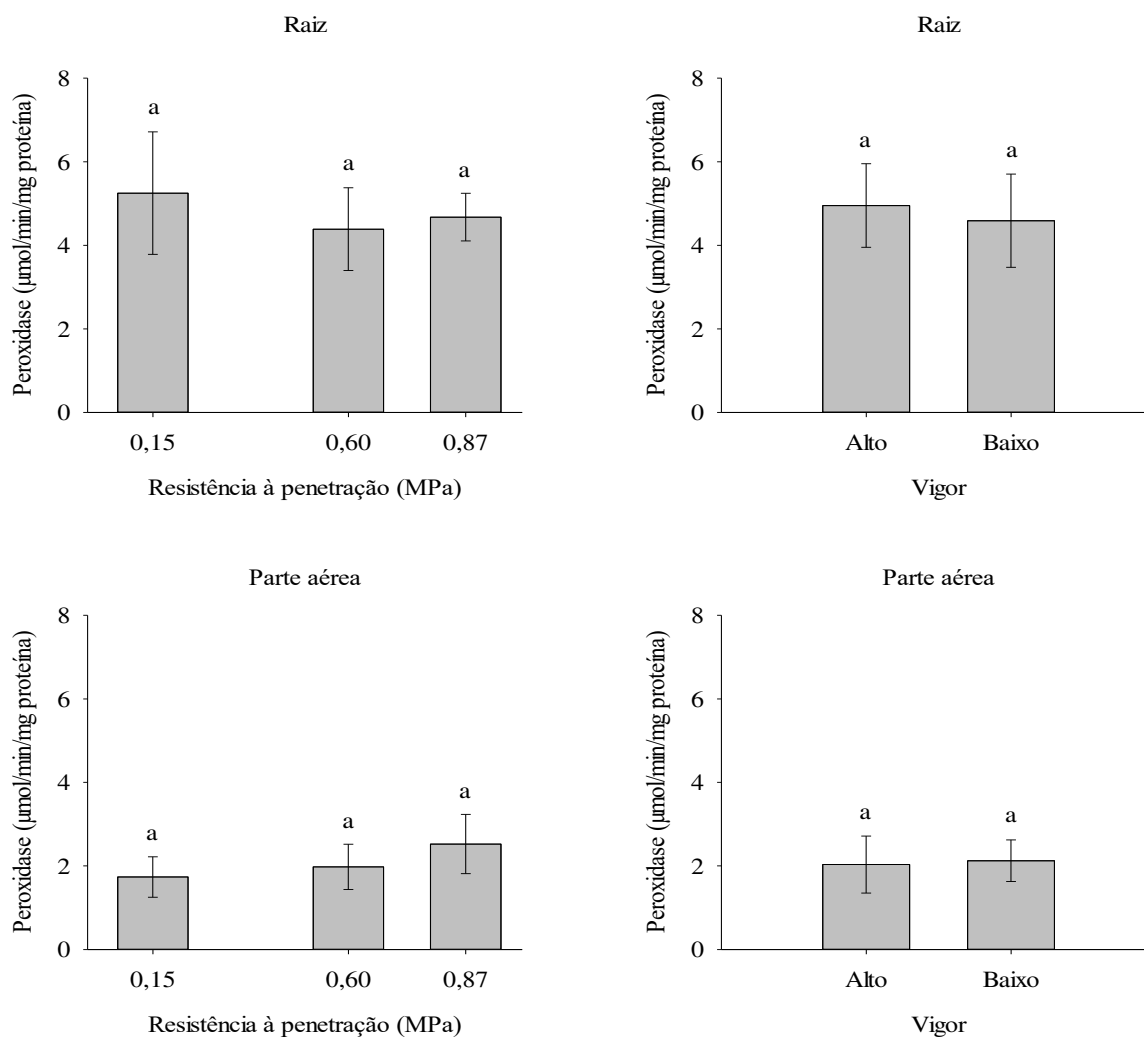


Figura 9. Atividade da enzima peroxidase (POX) na raiz e na parte aérea de plântulas de soja (cultivar 2) submetidas à diferentes impedâncias mecânicas do substrato e oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor. As barras representam o erro padrão da média. * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (níveis de resistência à penetração) e pelo teste F (níveis de vigor) a 5% de probabilidade.

Não houve alterações na atividade da SOD, nas raízes das plântulas, da cultivar 1 (Figura 10), e na parte aérea, da cultivar 2 (Figura 11), no que diz respeito aos níveis de resistência à penetração e vigor das sementes. Entretanto, houve interação significativa entre os níveis dos fatores ao se avaliar a parte aérea das plântulas da cultivar 1 (Figura 10). O lote de alto vigor não apresentou alterações na atividade da SOD, comparando-se os níveis de impedância mecânica do substrato. Já para o lote de baixo vigor, foi observado maior atividade da enzima na condição de 0,15 MPa em relação à 0,60 e 0,87 MPa. Os lotes de alto e baixo vigor não diferiram entre si na baixa e alta resistência à penetração, mas o lote de alto vigor apresentou maior atividade da SOD no tratamento de 0,60 MPa. Para a cultivar 2, nas raízes das plântulas, a atividade da SOD foi superior em condição de elevada impedância mecânica, independentemente do nível de vigor das sementes (Figura 11).

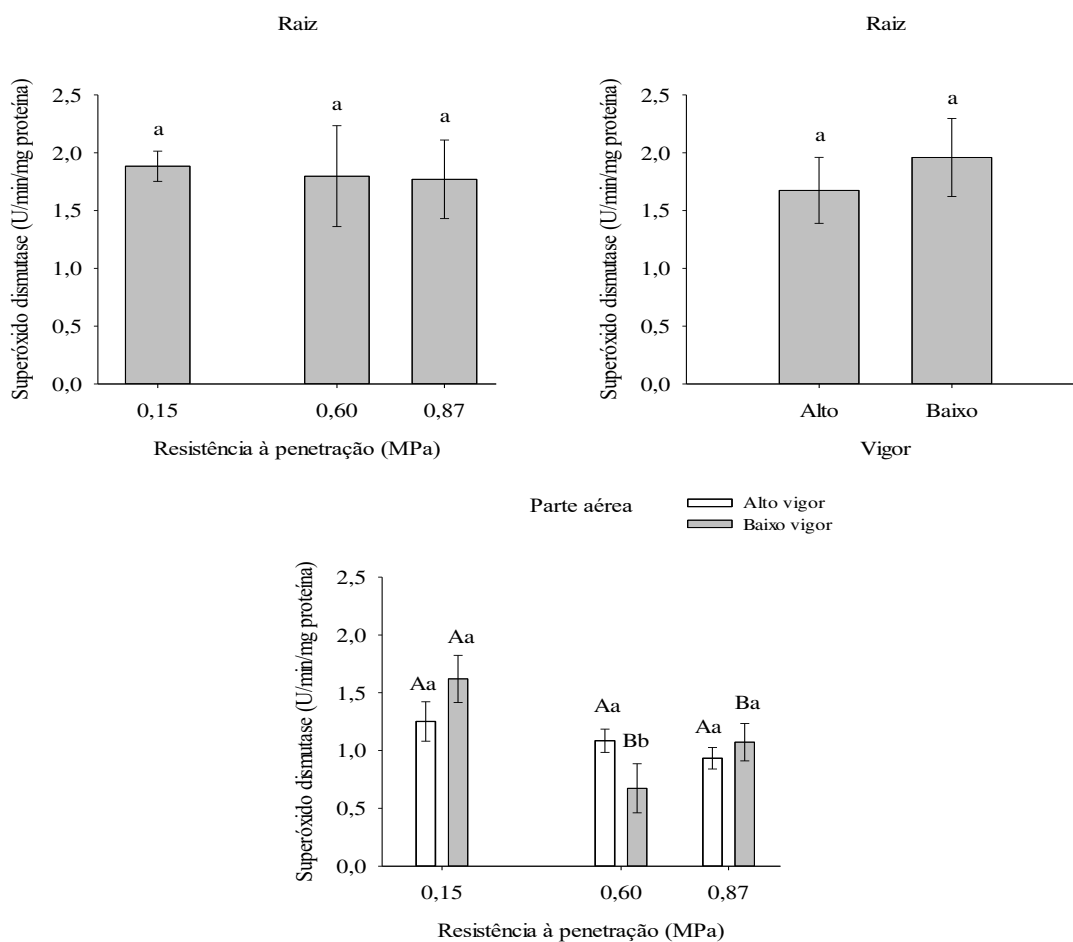


Figura 10. Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) na raiz e na parte aérea de plântulas de soja da cultivar 1 submetidas à diferentes impedâncias mecânicas do substrato e oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor. As barras representam o

erro padrão da média. * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (níveis de resistência à penetração) e pelo teste F (níveis de vigor) a 5% de probabilidade. Para os dados de parte aérea, as letras maiúsculas comparam os níveis de impedância do substrato e as letras minúsculas os diferentes níveis de vigor.

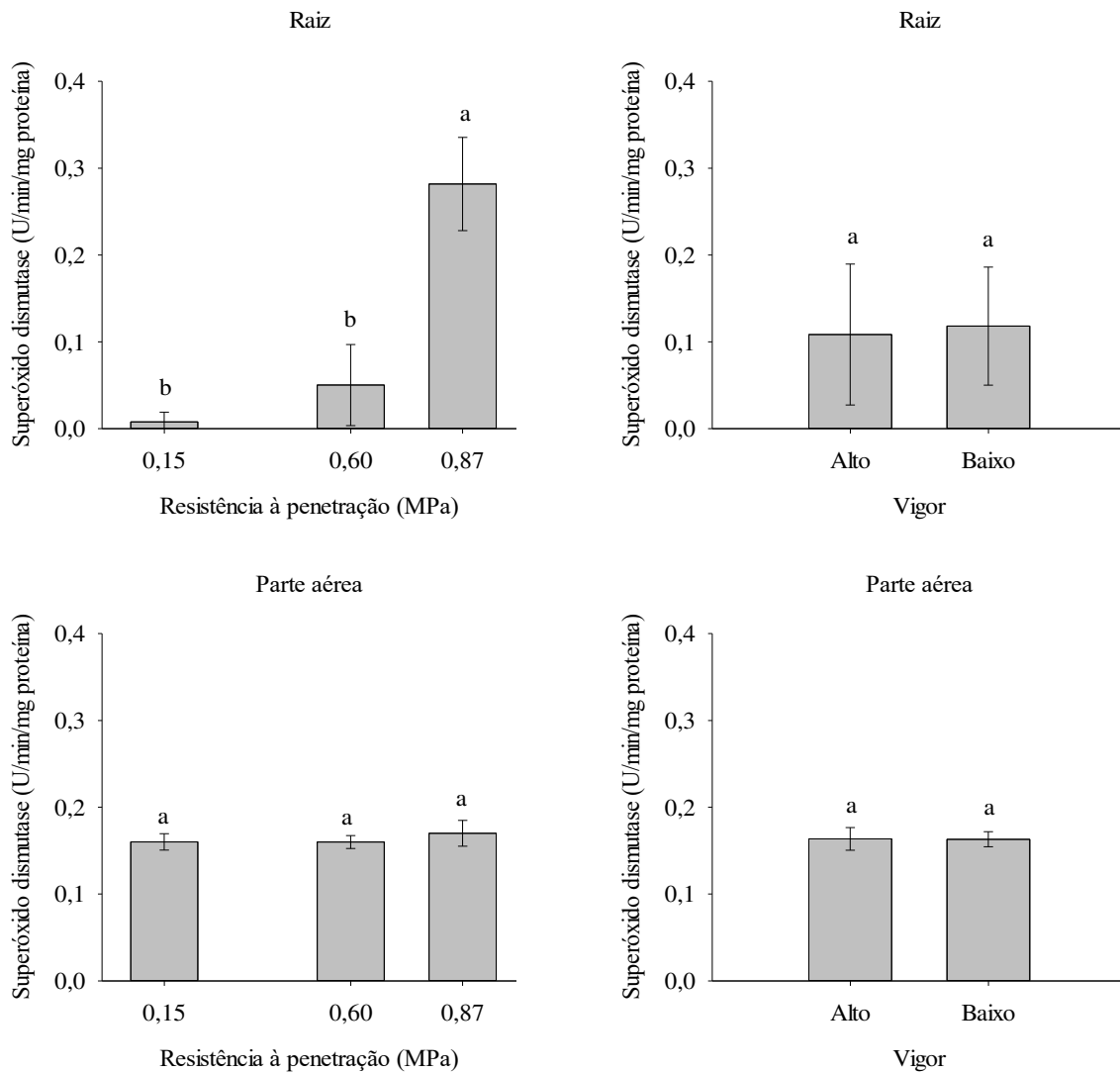


Figura 11. Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) na raiz e na parte aérea de plântulas de soja da cultivar 2 submetidas à diferentes impedâncias mecânicas do substrato e oriundas de sementes com diferentes níveis de vigor. As barras representam o erro padrão da média. * Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey (níveis de resistência à penetração) e pelo teste F (níveis de vigor) a 5% de probabilidade.

O estresse oxidativo é observado em plantas sob condições de elevada compactação do solo (Grzesiak et al., 2016), em decorrência das alterações metabólicas provocadas pelo estresse, que resulta em atraso na emergência e crescimento das plântulas. Assim, em geral, é observado aumento da atividade das enzimas do sistema de defesa antioxidativo nestas condições (Grzesiak et al., 2016), sendo responsável por reduzir os efeitos danosos das EROs.

O radical superóxido produzido sob condições de estresse é tóxico, mas rapidamente é dismutado pela SOD à H_2O_2 (produto relativamente estável) que pode ser detoxificado por catalases e peroxidases, dentre outras enzimas. Assim, o aumento na atividade da SOD é conhecido por conferir tolerância ao estresse oxidativo e reduzir a peroxidação de lipídios (Asada, 2006). Este efeito foi observado apenas para o lote de menor vigor da cultivar 2 (Figura 11).

A CAT possui alto potencial para decomposição direta do H_2O_2 em H_2O e O_2 , sendo uma enzima indispensável para a desintoxicação de EROs durante condições de alta produção de radicais tóxicos (Garg e Manchanda, 2009). A enzima APX também possui alta afinidade pelo H_2O_2 , sendo capaz de eliminar esse radical durante o estresse oxidativo (Hasanuzzaman et al., 2012). Isto explica o aumento observado na atividade das enzimas CAT (Figura 4) e APX (Figura 6), respectivamente na raiz e parte aérea das plântulas sob elevada impedância mecânica, observado para a cultivar 1. De acordo com Bhatt e Tripathi (2011), a APX e a CAT são as duas enzimas mais importantes dentre os componentes de desintoxicação do H_2O_2 .

Em condições de estresse, CAT, APX, POX e SOD trabalham em conjunto para reduzir a oxidação descontrolada e proteger células vegetais do dano oxidativo (Mittler et al., 2004). Embora não se tenha observado diferenças na atividade da POX em relação ao sistema radicular e parte aérea das plântulas de soja (Figuras 8 e 9), as demais enzimas tiveram maior expressão da atividade. Com a impedância mecânica, a SOD teve sua atividade reduzida na parte aérea, para o lote com baixo vigor da cultivar 1 (Figura 10). A atividade da CAT foi maior no sistema radicular (Figura 4), enquanto a APX foi mais expressiva na parte aérea das plântulas (Figura 6). É possível observar esta interrelação enzimática no trabalho descrito por Mandhania et al. (2006), em que observaram aumento da atividade da CAT, POX e APX com o aumento no estresse salino em cultivares de trigo, porém a SOD diminuiu sua atividade.

Em trabalhos onde as sementes não são submetidas a nenhum tipo de estresse, lotes com alto vigor apresentam menor produção EROs (como por exemplo, o H₂O₂) e, conseqüentemente, menor atividade das enzimas do sistema antioxidativo (Borba et al., 2014). Porém, quando se analisa a influência de estresses abióticos com a atividade das enzimas CAT, APX, POX e SOD, a menor atividade dessas enzimas podem remeter a sementes e plântulas de baixa viabilidade e vigor (Demirkaya et al., 2010). Isto justifica a menor atividade da CAT (em 0,87 MPa) na raiz e da SOD (em 0,60 MPa) na parte aérea das plântulas provenientes do lote de baixo vigor em relação ao de alto vigor (Figura 4 e 10). Contudo, até então não havia trabalhos que explorassem a relação entre a qualidade fisiológica das sementes e a atividade dessas enzimas em função da impedância mecânica durante a emergência das plântulas, o que evidencia o ineditismo do presente trabalho.

Em geral, ao analisar os dados obtidos para os níveis de etileno nas plântulas (Figura 1), a concentração de proteínas (Figuras 2 e 3) e as atividades enzimáticas (Figuras 4 – 11), observa-se que nem todas as partes da planta foram igualmente afetadas pela impedância mecânica. Ainda, houve efeito do vigor das sementes nas respostas à níveis elevados de impedância mecânica, e estas respostas dependeram do genótipo. Segundo Grzesiak et al. (2017), em geral, alterações em marcadores fisiológicos ligados às respostas ao estresse por elevada impedância mecânica são maiores para genótipos mais sensíveis, comparados aos resistentes. Assim, os resultados obtidos com o presente trabalho abrem novas perspectivas para o melhoramento de plantas para aumento de tolerância a este estresse.

CONCLUSÕES

O vigor das sementes não afeta a biossíntese de etileno e o conteúdo de proteína nas plântulas de soja sob impedância mecânica, avaliadas aos sete dias após a semeadura.

As respostas na atividade enzimática foram dependentes do genótipo e do vigor das sementes. Assim, níveis elevados de impedância mecânica proporcionam aumento da atividade da CAT na raiz, aumento e redução da atividade da APX e da SOD, respectivamente, na parte aérea das plântulas da cultivar 1. Já a cultivar 2 apresenta maior atividade da SOD na raiz, sem alterações nas demais enzimas, independentemente do vigor das sementes.

REFERÊNCIAS

- Akter S, Huang J, Waszczak C, Jacques S, Gevaert K, Van Breusegem F, Messens J. Cysteines under ROS attack in plants: a proteomics view. *J Exp Bot. Oxford University Press*; 2015;66:2935–2944.
- Alarcon M V., Lloret PG, Iglesias DJ, Talon M, Salguero J. Response of maize seedling roots to changing ethylene concentrations. *Russ J Plant Physiol. SP MAIK Nauka/Interperiodica*; 2009;56:488–494.
- Anderson, M.D.; Prasad, T.K.; Stewart CR. Changes in isozyme profiles of catalase, peroxidase, and glutathione reductase during acclimation to chilling in mesocotylus of maize seedlings. *Plant Physiol.* 1995;109:1247–1257.
- Asada K. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Plant Physiol. American Society of Plant Biologists*; 2006;141:391–6.
- Bailly C, El-Maarouf-Bouteau H, Corbineau F. From intracellular signaling networks to cell death: the dual role of reactive oxygen species in seed physiology. *C R Biol. Elsevier Masson*; 2008;331:806–814.
- Baxter A, Mittler R, Suzuki N. ROS as key players in plant stress signalling. *J Exp Bot.* 2013;65:1229–1240.
- Beauchamp, C.; Fridovich I. Superoxide Dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Anal Biochem.* 1971;44:276–287.
- Bertell G, Eliasson L. Cytokinin effects on root growth and possible interactions with ethylene and indole-3-acetic acid. *Physiol Plant.* 1992;84:255–261.
- Beutler AN, Centurion JF, Centurion MAPDC, Silva AP. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em latossolo vermelho. *Rev Bras Cienc do Solo.* 2006;30:787–794.
- Bhatt I, Tripathi BN. Plant peroxiredoxins: Catalytic mechanisms, functional significance and future perspectives. *Biotechnol Adv. Elsevier*; 2011;29:850–859.
- Borba ICG de, Bandeira J de M, Marini P, Martins ABN, Moraes DM de. Metabolismo antioxidativo para separação de lotes de sementes de diferentes graus de homogeneidade. *Brazilian J Biosci.* 2014;12:20–26.

Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.* 1976.

Burg SP, Burg EA. The interaction between auxin and ethylene and its role in plant growth. 1966.

Chance, B.; Maehley AC. Assay of catalases and peroxidases. *Methods Enzymol.* 1995;2:764–775.

Chehab EW, Eich E, Braam J. Thigmomorphogenesis: a complex plant response to mechano-stimulation. *J Exp Bot.* Oxford University Press; 2008;60:43–56.

Choudhury FK, Rivero RM, Blumwald E, Mittler R. Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *Plant J.* 2017;90:856–867.

Coelho Filho MA, Colebrook EH, Lloyd DPA, Webster CP, Mooney SJ, Phillips AL, Hedden P, Whalley WR. The involvement of gibberellin signalling in the effect of soil resistance to root penetration on leaf elongation and tiller number in wheat. *Plant Soil.* 2013;371:81–94.

Del Longo, O.T.; González, A.; Pastori, G.M.; Trippi VS. Antioxidant defenses under hyperoxygenic and hyperosmotic conditions in leaves of two lines of maize with differential sensitivity to drought. *Plant Cell Physiol.* 1993;34:1023–1028.

Demirkaya M, Dietz, Karl Josef; Sivritepe HO. Changes in antioxidant enzymes during ageing of onion seeds. *Not Bot Horti Agrobot Cluj-Napoca.* 2010;38:49–52.

Dugardeyn J, Van Der Straeten D. Ethylene: Fine-tuning plant growth and development by stimulation and inhibition of elongation. *Plant Sci.* 2008;175:59–70.

Dutra AS, Daiton Vieira R. Accelerated aging as test of vigor for corn and soybean seeds. *Ciência Rural.* 2004;715–721.

Ecker JR. The ethylene signal transduction pathway in plants. *Science.* 1995;268:667–75.

Ferreira EB, Cavalcanti PP, Nogueira DA, Ferreira MEB. *Pacote Experimental Designs (Portuguese).* 2018.

Finch-Savage WE, Bassel GW. Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. *J Exp Bot.* 2016;67:567–591.

Garg N, Manchanda G. ROS generation in plants: Boon or bane? *Plant Biosyst - An Int J Deal with all Asp Plant Biol.* Taylor & Francis ; 2009;143:81–96.

Giannopolitis, C.N.; RIES S. Superoxide dismutases. *Plant Physiol.* 1977;59:309–314.

Goeschl JD, Rappaport L, Pratt HK. Ethylene as a factor regulating the growth of pea epicotyls subjected to physical stress. *Plant Physiol. American Society of Plant Biologists;* 1966;41:877–84.

Grzesiak MT, Hura K, Jurczyk B, Hura T, Rut G, Szczyrek P, Grzesiak S. Physiological markers of stress susceptibility in maize and triticale under different soil compactions and/or soil water contents. *J Plant Interact.* Taylor & Francis; 2017;12:355–372.

Grzesiak MT, Janowiak F, Szczyrek P, Kaczanowska K, Ostrowska A, Rut G, Hura T, Rzepka A, Grzesiak S. Impact of soil compaction stress combined with drought or waterlogging on physiological and biochemical markers in two maize hybrids. *Acta Physiol Plant.* Springer Berlin Heidelberg; 2016;38:109.

Hartung W, Zhang J, Davies WJ. Does abscisic acid play a stress physiological role in maize plants growing in heavily compacted soil? *J Exp Bot.* Oxford University Press; 1994;45:221–226.

Hasanuzzaman M, Hossain MA, da Silva JAT, Fujita M. Plant response and tolerance to abiotic oxidative stress: antioxidant defense is a key factor. *Crop Stress its Manag Perspect Strateg.* Dordrecht: Springer Netherlands; 2012. p. 261–315.

Havir, E.A.; Mchale NA. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. *Plant Physiol.* 1987;84:450–455.

Henning FA, Mertz LM, Jacob Junior EA, Machado RD, Fiss G, Zimmer PD. Composição química e mobilização de reservas em sementes de soja de alto e baixo vigor. *Bragantia.* Instituto Agronômico; 2010;69:727–734.

Hippeli S, Elstner EF. Mechanisms of oxygen activation during plant stress: biochemical effects of air pollutants. *J Plant Physiol.* Urban & Fischer; 1996;148:249–257.

Huang X, Khan A a. Alleviation of thermoinhibition in preconditioned lettuce seeds involves ethylene , not polyamine biosynthesis. 1992;117:841–845.

Jin K, Shen J, Ashton RW, Dodd IC, Parry MAJ, Whalley WR. How do roots elongate in

a structured soil? J Exp Bot. 2013;64:4761–4777.

Kar, M.; Mishra D. Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. Plant Physiol. 1976;57:315–319.

Kays SJ, Nicklow CW, Simons DH. Ethylene in relation to the response of roots to physical impedance. Plant Soil. Kluwer Academic Publishers; 1974;40:565–571.

König J, Muthuramalingam M, Dietz K-J. Mechanisms and dynamics in the thiol/disulfide redox regulatory network: transmitters, sensors and targets. Curr Opin Plant Biol. 2012;15:261–268.

Lachno DR, Harrison-Murray RS, Audus LJ. The effects of mechanical impedance to growth on the levels of ABA and IAA in root tips of *Zea mays* L. J Exp Bot. Oxford University Press; 1982;33:943–951.

Mandhania S, Madan S, Sawhney V. Antioxidant defense mechanism under salt stress in wheat seedlings. Biol Plant. Kluwer Academic Publishers-Consultants Bureau; 2006;50:227–231.

Masle J. High Soil Strength: Mechanical forces at play on root morphogenesis and in root. Plant Roots. CRC Press; 2002. p. 807–819.

McDonald MB. Seed deterioration: physiology, repair and assessment. Seed Sci Technol. 1999;27:177–237.

Mittler R, Vanderauwera S, Gollery M, Breusegem F Van. Abiotic stress series reactive oxygen gene network of plants. 2004;

Nakano, Y.; Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant Cell Physiol. 1981;22:867–880.

Nascimento WM, Cantliffe DJ, Huber DJ. Ethylene evolution and endo-beta-mannanase activity during lettuce seed germination at high temperature. Sci Agric. Scientia Agricola; 2004;61:156–163.

Okada K SY. Modulation of root growth by physical stimuli. Arabidopsi. Meyerowitz CS, organizador. NY: Cold Spring Harbor Laboratory Press, Cold Spring Harbor; 1994.

Okamoto T, Tsurumi S, Shibasaki K, Obana Y, Takaji H, Oono Y, Rahman A. Genetic dissection of hormonal responses in the roots of Arabidopsis grown under continuous

mechanical impedance. *Plant Physiol.* 2008;146:1651–1662.

Peixoto PHP, Cambraia J, Sant'Anna R, Mosquim PR, Moreira MA. Aluminum effects on lipid peroxidation and on the activities of enzymes of oxidative metabolism in sorghum. *Rev Bras Fisiol Veg.* 1999;11:137–143.

Reczek CR, Chandel NS. ROS-dependent signal transduction. *Curr Opin Cell Biol. Elsevier Current Trends;* 2015;33:8–13.

Ries SK, Everson EH. Protein content and seed size relationships with seedling vigor of wheat cultivars. *Agron J.* 1973;65:884.

Santisree P, Nongmaithem S, Vasuki H, Sreelakshmi Y, Ivanchenko MG, Sharma R. Tomato root penetration in soil requires a coaction between ethylene and auxin signaling. *Plant Physiol.* 2011;156:1424–1438.

Sarquis J 1, Jordan WR, Morgan PW. Ethylene evolution from maize (*Zea mays* L.) seedling roots and shoots in response to mechanical impedance. *Plant Physiol.* 1991.

Sharp RE. Interaction with ethylene: Changing views on the role of abscisic acid in root and shoot growth responses to water stress. *Plant, Cell Environ.* 2002;25:211–222.

Shi H, Liu R, Xue C, Shen X, Wei N, Deng XW, Zhong S. Seedlings transduce the depth and mechanical pressure of covering soil using COP1 and ethylene to regulate EBF1/EBF2 for soil emergence. *Curr Biol. Elsevier;* 2016;26:139–149.

Silva PO, Medina EF, Barros RS, Ribeiro DM. Germination of salt-stressed seeds as related to the ethylene biosynthesis ability in three *Stylosanthes* species. *J Plant Physiol.* 2014;171:14–22.

Siriwitayawan G, Downie AB, Geneve RL. Ethylene evolution is positively correlated with seed vigor in sweet corn and tomato seed lots with differing vigor levels but similar germination capacity. *J. AMER. SOC. HORT. SCI.* 2003.

Sun WQ, Leopold AC. The Maillard reaction and oxidative stress during aging of soybean seeds. *Physiol Plant. John Wiley & Sons, Ltd (10.1111);* 1995;94:94–104.

Taiz L, Zeiger E, Universitat Jaume I. Publicacions. Fisiología vegetal. Universitat Jaume I; 2006.

Truong TH, Carroll KS. Redox regulation of protein kinases. *Crit Rev Biochem Mol Biol.*

Taylor & Francis; 2013;48:332–356.

Walters C. Understanding the mechanisms and kinetics of seed aging. *Seed Sci Res.* Cambridge University Press; 1998;8:223–244.

Waszczak C, Akter S, Jacques S, Huang J, Messens J, Van Breusegem F. Oxidative post-translational modifications of cysteine residues in plant signal transduction. *J Exp Bot.* 2015;66:2923–2934.

Zhong S, Shi H, Xue C, Wei N, Guo H, Deng XW. Ethylene-orchestrated circuitry coordinates a seedling's response to soil cover and etiolated growth. *Proc Natl Acad Sci.* 2014;111:3913–3920.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa permitiu a avaliação das alterações fisiológicas e bioquímicas em plântulas de soja em resposta à impedância mecânica do substrato e ao vigor das sementes. A metodologia desenvolvida permitiu verificar os efeitos da impedância mecânica na emergência e crescimento de plântulas, e encontra-se sob pedido de patente junto ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Intelectual), processo número: BR 10 2018 073102 5.

As avaliações realizadas neste estudo, principalmente quanto a caracteres do sistema radicular, são promissoras para fins de pesquisa em melhoramento de plantas, visando verificar a variabilidade genotípica e a seleção de genótipos mais tolerantes à compactação do solo, e em estudos para avaliação das respostas das plantas ao aumento da impedância mecânica. No entanto, são necessárias mais pesquisas que possam relacionar estes resultados com a produtividade da cultura em campo, além de maior número de cultivares e lotes de sementes com diferentes níveis de vigor.

Esta dissertação comprovou que lote de alto vigor de sementes apresenta maior velocidade de emergência das plântulas de soja, maior comprimento, área superficial e volume das raízes, além de menor espessamento radicular, sob maiores níveis de impedância mecânica do substrato.

Entretanto, o vigor das sementes não afeta a biossíntese de etileno e o conteúdo de proteína nas plântulas de soja sob impedância mecânica, aos sete dias após a semeadura. Dependendo do vigor das sementes, níveis elevados de impedância mecânica proporcionam alterações nas atividades das enzimas do estresse antioxidativo na parte aérea e sistema radicular das plântulas.

Assim, os dados desta pesquisa permitem entender os relatos de falhas de estande, desuniformidade de plantas, baixo crescimento e perdas de produtividade das culturas em solos compactados. Os resultados obtidos abrem, portanto, novas perspectivas para o melhoramento de plantas para aumento de tolerância a este estresse.