

NAYARA PEREIRA CAPOBIANGO

**ESTRESSE POR COMPACTAÇÃO DO SOLO: SCREENING DE GENÓTIPOS DE
SOJA E RELAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO DE PLÂNTULAS E PRODUÇÃO DE
GRÃOS**

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

Orientador: Laércio Junio da Silva

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

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

T

C245e
2023
Capobiango, Nayara Pereira, 1994-
Estresse por compactação do solo: screening de genótipos
de soja e relação entre crescimento de plântulas e produção de
grãos / Nayara Pereira Capobiango. – Viçosa, MG, 2023.
1 tese eletrônica (75 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Laércio Junio da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Agronomia, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.180>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Soja. 2. Soja - Efeito do estresse. 3. Solos -
Compactação. 4. Adaptação (Fisiologia). 5. Plântulas -
Crescimento. 6. Raízes (Botânica). 7. Soja - Rendimento.
I. Silva, Laércio Junio da, 1984-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 633.34


NAYARA PEREIRA CAPOBIANGO

ESTRESSE POR COMPACTAÇÃO DO SOLO: SCREENING DE GENÓTIPOS DE SOJA E RELAÇÃO ENTRE CRESCIMENTO DE PLÂNTULAS E PRODUÇÃO DE GRÃOS


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

APROVADA: 02 de março de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 NAYARA PEREIRA CAPOBIANGO
Data: 17/04/2023 08:42:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Nayara Pereira Capobiango
Autora

Documento assinado digitalmente
 LAERCIO JUNIO DA SILVA
Data: 17/04/2023 06:54:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Laércio Junio da Silva
Orientador

Aos meus pais Darci e Maria José, ao meu irmão
Ronan e ao meu noivo Lucas Júnior, pessoas que
alegram a minha vida.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, meu salvador, por ter me conduzido por este caminho, e me dado saúde, força e perseverança em todos os momentos.

Aos meus pais, Darci e Maria José, pela educação que me proporcionaram e por sempre me apoiarem nesta jornada, desde o início de meus estudos.

Ao meu irmão Ronan, pelo companheirismo, carinho, apoio, pelas orações e alegrias diárias.

Ao meu noivo Lucas Júnior, pela força, cuidado, por me acompanhar e apoiar nesta caminhada e não deixar desistir nos momentos difíceis.

Aos meus cunhados Priscila e Mateus, ao concunhado Daniel e, a meus sogros, Lucas e Elenice, por todo carinho e incentivo.

À Igreja Batista Memorial em Viçosa pelas orações, acolhimento, convívio e aprendizados neste período.

Ao professor Laércio Junio, pela orientação, amizade, ensinamentos, oportunidades e pela confiança em mim depositada ao longo dos nossos seis anos de convivência.

Aos membros da banca de defesa: professora Denise, professor Felipe, professor Raphael, professora Martha, pelas correções e contribuições para este trabalho.

Aos amigos, professores, técnicos de laboratório, integrantes do grupo de estudo em sementes (GSem), pela amizade e auxílio nos trabalhos desenvolvidos nesta pesquisa.

Aos estagiários do GSem e funcionários do Vale da Agronomia, por toda ajuda na condução dos experimentos.

À Empresa GDM Seeds pelo auxílio na obtenção das sementes.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Centro de Ciências Agrárias e ao Departamento de Agronomia pela infraestrutura disponibilizada para a execução dos trabalhos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A todos os meus familiares, pelo incentivo.

A todos que torceram por minha vitória.

Muito obrigada!

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos”
(**BÍBLIA**, Provérbios, 16:3).

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.

Em março de 2012 iniciou o curso de graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa, obtendo o título de Engenheira Agrônoma em janeiro de 2017.

Em março de 2017, iniciou o curso de Mestrado em Fitotecnia pela UFV, submetendo-se à defesa em fevereiro de 2019.

Em março de 2019, iniciou o curso de Doutorado em Fitotecnia pela UFV, submetendo-se à defesa em março de 2023.

RESUMO

CAPOBIANGO, Nayara Pereira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2023. **Estresse por compactação do solo: Screening de genótipos de soja e relação entre crescimento de plântulas e produção de grãos.** Orientador: Laércio Junio da Silva.

A compactação do solo, causada pelo intenso trânsito de máquinas agrícolas e manejo inadequado do solo, restringe o crescimento radicular das plantas e, conseqüentemente a produção de grãos. No entanto, existem poucos estudos sobre a variabilidade de genótipos de soja quanto à suscetibilidade ao estresse de compactação do solo, informações importantes para selecionar precocemente genótipos tolerantes e acelerar o processo de desenvolvimento de materiais adaptados em programas de melhoramento. Efeitos de dois níveis de compactação do solo foram investigados em 60 genótipos de soja em experimento em campo. Em seguida, a suscetibilidade de 20 desses genótipos foi avaliada em casa de vegetação e campo, relacionando o desempenho de plântulas em sistema de impedância mecânica do substrato com o rendimento da cultura em solo compactado. E procurou-se validar o método de impedância mecânica do substrato para avaliação da suscetibilidade de genótipos de plantas à compactação do solo. A compactação do solo, nas condições apresentadas neste estudo, proporciona maior emergência de plântulas e crescimento vegetativo, mas perdas significativas no rendimento da soja. Em ambiente controlado, genótipos tolerantes à compactação do solo apresentam maior plasticidade de características radiculares e menores alterações na parte aérea de plântulas. No campo, esses genótipos apresentam menores reduções, comparados aos genótipos sensíveis, principalmente na taxa de crescimento, na altura, no número de vagens e na produção de grãos. A matéria seca da parte aérea e a matéria seca da raiz de plântulas de soja em sistema de impedância mecânica apresenta correlação positiva e negativa, respectivamente, com o rendimento da soja em solo compactado, indicando que a suscetibilidade geneticamente determinada ao estresse de compactação do solo foi semelhante ao longo da ontogênese. O sistema de impedância mecânica do substrato, utilizado para avaliar o desempenho de plântulas de soja sob estresse, é eficiente na classificação de genótipos de plantas tolerantes à compactação do solo.

Palavras-chave: *Glycine max* L. Merrill. Impedância mecânica. Metodologia. Plasticidade fenotípica. Raiz. Parte aérea. Produção.

ABSTRACT

CAPOBIANGO, Nayara Pereira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2023. **Soil compaction stress: Screening of soybean genotypes and the relationship between seedling growth and grain yield.** Adviser: Laércio Junio da Silva.

Soil compaction, caused by the intense traffic of agricultural machinery and inadequate soil management, restricts plant root growth and, consequently, grain production. However, there are few studies on the variability of soybean genotypes regarding susceptibility to soil compaction stress, important information for early selection of tolerant genotypes and accelerating the development process of adapted materials in breeding programs. Effects of two levels of soil compaction were investigated on 60 soybean genotypes in a field experiment. Then, the susceptibility of 20 of these genotypes was evaluated in the greenhouse and field, relating the performance of seedlings in a system of mechanical impedance of the substrates with the yield of the culture in compacted soil. And we sought to validate the method of mechanical impedance of substrates to assess the susceptibility of plant genotypes to soil compaction. Soil compaction, under the conditions approved in this study, provides greater seedling emergence and vegetative growth, but yield losses in soybean yield. In a controlled environment, genotypes tolerant to soil compaction show greater plasticity of root characteristics and minor alterations in the aerial part of seedlings. In the field, these genotypes show smaller reductions compared to sensitive genotypes, mainly in growth rate, height, number of pods and grain yield. The aerial part dry matter and the root dry matter of soybean plants in a mechanical impedance system is positive and negative, respectively, with the soybean yield in compacted soil, indicating that the genetically determined susceptibility to the compaction stress of the soil was similar throughout ontogeny. The substrate mechanical impedance system, used to evaluate the performance of soybean plants under stress, is efficient in classifying genotypes of plants tolerant to soil compaction.

Keywords: *Glycine max* L. Merrill. Mechanical impedance. Phenotypic plasticity. Methodology. Root. Shoots. Production.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
REFERÊNCIAS	13
CAPÍTULO I - AVALIAÇÃO DE GENÓTIPOS DE SOJA CULTIVADOS SOB COMPACTAÇÃO DO SOLO	
RESUMO	15
ABSTRACT	16
INTRODUÇÃO.....	17
MATERIAL E MÉTODOS.....	18
Preparo da área e compactação do solo	18
Material vegetal	19
Detalhes experimentais e características avaliadas	20
Análise estatística.....	21
Índices de suscetibilidade à compactação do solo.....	22
3. RESULTADOS	22
Condições ambientais e níveis de compactação do solo	22
Variabilidade de genótipos de soja em função da compactação do solo.....	23
Avaliação da suscetibilidade de genótipos à compactação do solo.....	29
4. DISCUSSÃO	33
5. CONCLUSÕES	36
6. REFERÊNCIAS	37
CAPÍTULO II - DESEMPENHO DE PLÂNTULAS E RENDIMENTO DE GENÓTIPOS DE SOJA SOB COMPACTAÇÃO DO SOLO	
RESUMO	45
ABSTRACT	46
INTRODUÇÃO.....	47
MATERIAL E MÉTODOS.....	48
Materiais vegetais	48
Detalhes experimentais.....	49
Níveis de impedância mecânica (MPa)	50
Avaliações	52
Índice de suscetibilidade à compactação do solo	52
Análise estatística	53

RESULTADOS	53
Desempenho de genótipos de soja em casa de vegetação e campo.....	53
Relações entre as características avaliadas.....	57
Avaliação da suscetibilidade de genótipos de soja à compactação	59
DISCUSSÃO.....	65
CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS	68
CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
APÊNDICES	73

INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine max* L. Merr.) é uma das *commodities* de maior destaque mundial em termos de produtividade. O Brasil é o maior produtor, com produção de mais de 134 milhões de toneladas, seguido pelos Estados Unidos, Argentina e China (FAO, 2021).

Para alcançar alta produção, as plantas precisam de ambiente adequado para seu crescimento e desenvolvimento, sem restrições ao sistema radicular. A arquitetura radicular desempenha papel importante no estabelecimento da soja, pois determina a exploração espacial do solo e a absorção de água e nutrientes (Koevoets et al., 2016). No entanto, muitos fatores ambientais limitam o crescimento das raízes. A tolerância de genótipos de soja ao estresse hídrico é muito explorada nos programas de melhoramento, mas a compactação do solo é uma degradação global que também reduz o crescimento radicular e tem causado baixos rendimentos das culturas. As perdas de rendimento por compactação são estimadas em torno de 20 e 25%, e quando associadas ao estresse hídrico, de 50 a 75% (Fried et al., 2018).

Sistemas de alta carga mecânica e preparo inadequado do solo são responsáveis pela compactação de áreas agrícolas. A compactação reduz a porosidade, a estabilidade e a condutividade hidráulica do solo e, conseqüentemente, a disponibilidade de nutrientes e o desempenho da cultura (Shah et al., 2017).

A capacidade de exploração espacial do sistema radicular em solos compactados é controlada por genes que proporcionam maior desempenho no estabelecimento das plantas. Os genótipos tolerantes apresentam respostas plásticas, como diâmetros radiculares aumentados (característica que lhes permite penetrar em camadas duras com maior comprimento radicular), raízes com ângulos mais acentuados (maior capacidade de exploração devido ao comprimento radicular mais longo), altos graus de tortuosidade radicular (ajuda a encontrar caminhos de menor resistência do solo à penetração), mais aerênquima cortical radicular (facilita o transporte de oxigênio) e mais pelos radiculares (melhora a ancoragem da raiz ao solo e a secreção de mucilagem para reduzir o atrito) (Correa et al., 2019).

O aumento do diâmetro associado à redução da taxa de alongamento radicular é uma das principais respostas de aclimação durante o estresse de impedância mecânica, pois evita a flambagem da raiz no substrato duro (Bengough et al., 2011; Bizet et al., 2016; Chimungu et al., 2015; Popova et al., 2016; Potocka & Szymanowska-Pułka, 2018). Esta plasticidade do sistema radicular em resposta à impedância mecânica deve ser investigada no melhoramento genético visando aumentar o desempenho da cultura em áreas compactadas, pois respostas

adaptativas podem tornar o genótipo tolerante, resistente ou resiliente (Correa et al., 2019; Colombi et al., 2019).

A combinação de fatores genéticos, fisiológicos e ambientais resulta em mudanças na arquitetura do sistema radicular, e o grau de suscetibilidade à impedância mecânica depende da intensidade e duração do estresse, bem como da espécie, variedade e idade das plantas (Grzesiak et al., 2021). No entanto, há poucas informações sobre a variabilidade de genótipos para plasticidade radicular de plântulas de soja sob impedância mecânica. Essas informações podem ser utilizadas para definir novas estratégias a serem utilizadas em programas de melhoramento para tolerância à compactação e/ou seca.

A avaliação de características de raízes em condições de campo é um desafio, por isso a tolerância à compactação do solo precisa ser associada ao fenótipo da planta e à plasticidade das raízes. Assim, procura-se relações entre tolerância e biomassa vegetal. De acordo com Correa et al. (2022), a estabilidade do crescimento da parte aérea enquanto ocorre modificações na arquitetura do sistema radicular pode ser um importante mecanismo de adaptação à compactação do solo. Os autores mostraram que a resposta fenotípica à impedância mecânica do solo varia entre os genótipos de sorgo e se correlaciona com o tamanho da planta. Genótipos tolerantes também são aqueles que apresentam reduções mínimas na produção de grãos, quando se compara plantas em condições de estresse e não-estresse (Negin & Moshelion, 2016).

Desta forma, a proposta deste trabalho foi avaliar as respostas das plantas afetadas pela compactação do solo e identificar as principais características dos genótipos de soja tolerantes ao estresse; avaliar a suscetibilidade de genótipos em casa de vegetação e campo, relacionando o desempenho de plântulas com o rendimento da cultura em solo compactado; verificar quais características das plântulas sob elevada resistência à penetração de raízes apresentam correlação com a produção da cultura em solo compactado; e validar o método de impedância mecânica do substrato para avaliação da suscetibilidade de genótipos de plantas à compactação do solo.

REFERÊNCIAS

- Bengough, A. G., McKenzie, B.M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62 (1), 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>
- Bizet, F., Bengough, A. G., Hummel, I., Bogeat-Triboulot, M. B. , & Dupuy, L. X. (2016). 3D deformation field in growing plant roots reveals both mechanical and biological responses to axial mechanical forces. *Journal of Experimental Botany*, 67 (19), 5605–5614. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw320>
- Chimungu, J. G., Loades, K. W., & Lynch, J. P. (2015). Root anatomical phenes predict root penetration ability and biomechanical properties in maize (*Zea Mays*). *Journal of Experimental Botany*, 66 (11), 3151–3162. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv121>
- Colombi, T., Herrmann, A. M., Vallenback, P., & Keller, T. (2019). Cortical cell diameter is key to energy costs of root growth in wheat. *Plant Physiology*, 180 (4), 2049–2060. <https://doi.org/10.1104/pp.19.00262>
- Correa, J., Postma, J. A., Watt, M., & Wojciechowski, T. (2019). Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Journal of Experimental Botany*, 70 (21), 6019–6034. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz383>
- Correa, J., Postma, J. A., & Wojciechowski, T. (2022). Phenotypic response to soil compaction varies among genotypes and correlates with plant size in sorghum. *Plant and Soil*, 472 (1–2), 59–76. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05160-z>
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). Rankings of countries by commodity. https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity. Accessed March 2023
- Fried, H. G., Narayanan, S., & Fallen, B. (2018). Characterization of a soybean (*Glycine max* L. Merr.) germplasm collection for root traits. *PLoS One* 13 (7), e0200463. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200463>
- Grzesiak, M. T., Maksymowicz, A., Jurczyk, B., Hura, T., Rut, G., Rzepka, A., & Grzesiak, S. (2021). Selection approaches to the variation of responses to soil compaction stress among maize hybrids (*Zea mays* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207 (3), 544–556. <https://doi.org/10.1111/jac.12491>

- Koevoets, I. T., Venema, J. H. , Elzenga, J. T. M., & Testerink, C. (2016). Roots withstanding their environment: Exploiting root system architecture responses to abiotic stress to improve crop tolerance. *Frontiers Plant Science*, 7, 1335. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01335>
- Negin, B., & Moshelion, M. (2016). The advantages of functional phenotyping in pre-field screening for drought-tolerant crops. *Functional Plant Biology*, 44 (1), 107. <https://doi.org/10.1071/FP16156>
- Popova, L., van Dusschoten, D. , Nagel, K. A., Fiorani, F., & Mazzolai, B. (2016). Plant root tortuosity: an indicator of root path formation in soil with different composition and density. *Annals of Botany*, 118 (4), 685–698. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw057>
- Potocka, I., & Szymanowska-Pułka, J. (2018). Morphological responses of plant roots to mechanical stress. *Annals of Botany*, 122 (5), 711–723. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy010>
- Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., Bukhari, M. A., Tung, S. A., Hafeez, A., & Souliyanonh, B. (2017). Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (11), 10056–10067. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>

AVALIAÇÃO DE GENÓTIPOS DE SOJA CULTIVADOS SOB COMPACTAÇÃO DO SOLO

RESUMO

A compactação do solo tem causado impactos negativos na produtividade da soja devido ao uso excessivo de máquinas e implementos agrícolas pesados nas áreas de cultivo. Efeitos de dois níveis de compactação do solo foram investigados em 60 genótipos de soja em experimento em campo. As propriedades do solo, as condições meteorológicas da região e as mudanças nas características agronômicas da cultura foram avaliadas. Os genótipos foram divididos em três grupos de acordo com o grupo de maturidade relativa (GMR) e classificados quanto à suscetibilidade ao estresse. A compactação aumentou a densidade do solo e a resistência mecânica do solo à penetração das raízes, variando conforme o regime de chuvas registrado. As respostas dos genótipos à compactação nos três grupos, em geral, foram aumento da emergência de plântulas (EME), altura inicial (AI), número de nós (NN), matéria seca da parte aérea (MSPA) e altura final (AF) das plantas. Porém, houve redução na taxa de crescimento relativo (TCR), no número de vagens (NV) e na produção de grãos (PROD). A partir do cálculo do índice de suscetibilidade ao estresse (SSI) foi possível identificar genótipos de soja tolerantes e sensíveis ao estresse de compactação do solo. SSI e o índice de mudança relativa de característica (RTC) indicaram as respostas que os genótipos tolerantes apresentam sob condição de elevada impedância mecânica. Portanto, a compactação do solo, nas condições apresentadas neste estudo, proporciona maior emergência de plântulas e crescimento vegetativo, mas perdas significativas no rendimento da soja. Genótipos tolerantes ao estresse apresentam menores reduções na taxa de crescimento relativo, taxa de crescimento absoluto, altura final, número de vagens e rendimento de grãos.

Palavras-chave: *Glycine max* L. Merrill. Densidade do solo. Resistência do solo à penetração. Estresse abiótico.

ABSTRACT

Soil compaction has caused negative impacts on soybean productivity due to the excessive use of machinery and heavy agricultural implements in the cultivation areas. Effects of two levels of soil compaction were investigated on 60 soybean genotypes in a field experiment. Soil properties, weather conditions in the region and changes in crop agronomic characteristics were evaluated. The genotypes were divided into three groups according to the relative maturity group (RMG) and classified according to their susceptibility to stress. Compaction increased soil bulk density and soil mechanical resistance to root penetration, varying according to the registered rainfall regime. The responses of the genotypes to compaction in the three groups, in general, were increased seedling emergence (EME), initial height (IH), number of nodes (NN), shoot dry matter (SDM) and final height (FH) of the plants. However, there was a reduction in the relative growth rate (RGR), number of pods (NP) and grain yield (GY). From the calculation of the stress susceptibility index (SSI) it was possible to identify soybean genotypes tolerant and sensitive to soil compaction stress. SSI and the relative trait change index (RTC) indicated the responses that tolerant genotypes present under high mechanical impedance conditions. Therefore, soil compaction, under the conditions presented in this study, provides greater seedling emergence and vegetative growth, but significant losses in soybean yield. Stress-tolerant genotypes show smaller reductions in relative growth rate, absolute growth rate, final height, number of pods and grain yield.

Keywords: *Glycine max* L. Merrill. Soil density. Soil penetration resistance. Abiotic stress.

INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L. Merr.) é a leguminosa mais cultivada no mundo, uma das culturas de maior importância em termos de produção e área colhida (FAO, 2021). O Brasil é o maior produtor e exportador, responsável por 50% do mercado global da soja (EMBRAPA, 2021). No entanto, a produtividade da cultura é amplamente afetada pela compactação do solo.

A compactação do solo é um estresse abiótico causado por processos naturais, bem como pelo uso excessivo de máquinas e implementos agrícolas pesados nas áreas de cultivo (Tracy et al., 2011). Elevados níveis de compactação provocam alterações na impedância mecânica do solo, resultando em maior densidade do solo, diminuição da porosidade (principalmente macroporos), redução da difusão de gases, além de baixa disponibilidade de água e nutrientes no solo (Valentine et al., 2012; Ozcoban et al., 2013; Chen et al., 2014b, 2014a; Hernandez-Ramirez et al., 2014; Kuncoro et al., 2014a, 2014b).

O principal efeito da compactação do solo é o aumento da resistência à penetração das raízes (Kolb et al., 2017). Alterações na arquitetura do sistema radicular são observadas, tais como redução do comprimento, área e volume de raiz; redução do número de raízes laterais; presença de raízes com ângulos acentuados; aumento do grau de tortuosidade e do diâmetro radicular (Bengough et al., 2011b; Correa et al., 2019). Assim, plantas que crescem em ambiente compactado e seco possuem crescimento radicular reduzido, exploram menor volume de solo e, conseqüentemente, apresentam baixo rendimento. As perdas de produtividade devido à compactação do solo são estimadas em 25% (Bakken et al., 1987) e, em cerca de 50 a 75%, quando esse estresse está associado ao estresse hídrico (Hoque e Kobata, 2000).

Os processos que ocorrem no sistema radicular das plantas em condições de compactação do solo são conhecidos. No entanto, há pouca informação sobre os efeitos no crescimento da parte aérea da planta e a relação com a estabilidade do rendimento de genótipos de soja sob estresse. Isso porque outros fatores ambientais podem influenciar nos efeitos da compactação do solo e dificultar a compreensão das respostas das plantas, que é determinada por fatores genéticos, idade, bem como intensidade e duração do estresse (Grzesiak et al., 2021). Dessa forma, índices de suscetibilidade ao estresse são usados para compreender estratégias da planta (baseados na relação matemática das características avaliadas em condições de estresse e não estresse), com a intenção de remover ou aliviar a influência de fatores ambientais e classificar os genótipos de acordo com o seu desempenho e sensibilidade (Grzesiak et al., 2015).

O índice de suscetibilidade ao estresse (SSI), proposto por Fischer e Maurer (1978), avalia a estabilidade dos genótipos de acordo com o rendimento de grãos ou matéria seca da

parte aérea das plantas em condições de estresse e não estresse. O SSI é um dos índices mais úteis na discriminação de genótipos tolerantes, utilizado em várias abordagens de seleção, principalmente para variação das respostas de soja, milho e trigo sob estresses abióticos (Grzesiak et al., 2015, 2021; Purwaningrahayu et al., 2015; Yahoueian et al., 2018; Giordani et al., 2019; Rahi et al., 2019; Zhou et al., 2020; Mohammadi e Golkari, 2022).

A tolerância à compactação do solo é a capacidade do genótipo ter rendimento estável em locais com diferentes níveis do estresse (Correa et al., 2019). Dessa forma, o genótipo pode ser considerado tolerante quando apresenta reduções mínimas na produção (Negin e Moshelion, 2016; Grzesiak et al., 2021). Assim, informações sobre a variabilidade de genótipos de soja para componentes de aptidão agrícola em solos compactados são extremamente importantes.

A identificação de genótipos de soja tolerantes à compactação do solo é interessante para o cultivo em regiões secas e com solo compactado (Fried et al., 2018). Características relacionadas à plasticidade fenotípica das plantas sob estresse, associadas ao rendimento da cultura, podem ser incluídas em programas de melhoramento, contribuindo para o desenvolvimento de genótipos adaptados. Diante do exposto, os objetivos desta pesquisa foram avaliar as respostas das plantas de soja afetadas pela compactação do solo e identificar as principais características dos genótipos de soja tolerantes ao estresse.

MATERIAL E MÉTODOS

Preparo da área e compactação do solo

O experimento foi realizado durante o período de 1º de dezembro de 2020 a 28 de abril de 2021, no campo experimental Diogo Alves de Melo, da Universidade Federal de Viçosa, localizada em Viçosa-MG (20°45'14"S, 42°52'54"W, 650 m de altitude). O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, de textura muito argilosa (847 g kg⁻¹ de argila, 8 g kg⁻¹ de silte e 145 g kg⁻¹ de areia).

A área apresentava declividade abaixo de 5%, sendo previamente preparada por meio do sistema convencional, com aração e gradagem. A aplicação de fertilizantes foi realizada em área total com base na análise química do solo, seguindo recomendações adequadas para a cultura (Ribeiro et al., 1999).

Antes da semeadura, metade da área foi compactada com quatro passadas de trator, e a outra metade não compactada (controle). Para compactar o solo foi utilizado um trator John Deere 5600, 4 x 2 com TDA, com potência no motor de 53 kW, massa total de 3.835 kg (1.530 kg sobre eixo dianteiro e 2.305 kg sobre eixo traseiro), que possuía pneus dianteiros 12,4-24

R1 e traseiros 18,4-30 R1, com pressões de inflação de 95 e 110 kPa. O trator tinha uma área de contato pneu-solo de 514 cm² (dianteira) e 1.018 cm² (traseira). A pressão de contato dos pneus dianteiro e traseiro com o solo foi de 115 e 120 kPa, respectivamente.

A determinação da densidade do solo foi realizada no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Viçosa. Amostras de solo foram coletadas em profundidade entre 5 a 15 cm, pelo método do anel volumétrico com dimensões previamente conhecidas (Teixeira et al., 2017). Quatro amostras de solo indeformadas foram retiradas em cada área, compactada e não compactada, com anel de aço de Kopecky de bordas cortantes. A amostragem em pontos equidistantes foi realizada dois dias após uma chuva de 36 mm, e o solo foi considerado com umidade próximo da capacidade de campo.

A resistência do solo à penetração foi medida em campo com a utilização de penetrômetro de impacto modelo Stolf (massa de impacto de 4 kg), com área da base do cone de 1,29 cm² até a profundidade de 50 cm. As medidas foram realizadas em seis pontos para cada tratamento, controle e solo compactado, logo após a semeadura (dezembro) e na fase de florescimento da cultura (fevereiro).

Material vegetal

O experimento envolveu 60 genótipos de soja, que foram selecionados com base em informações sobre o desempenho em campo recebidas de empresa de melhoramento genético de soja. Três grupos de vinte genótipos cada foram formados com base no grupo de maturidade relativa (GMR): $5.0 < \text{GMR} < 6.4$; $6.5 < \text{GMR} < 7.5$; e $7.7 < \text{GMR} < 8.7$ (Tabela 1).

Tabela 1. Lista dos genótipos de soja avaliados.

Grupo 1 5.0 < GMR < 6.4		Grupo 2 6.5 < GMR < 7.5		Grupo 3 7.7 < GMR < 8.7	
Genótipo	GMR	Genótipo	GMR	Genótipo	GMR
1	5.0	21	6.5	41	7.7
2	5.5	22	6.5	42	7.9
3	5.6	23	6.6	43	7.9
4	5.7	24	6.6	44	7.9
5	5.7	25	6.6	45	7.9
6	5.8	26	6.7	46	7.9
7	5.8	27	6.8	47	8.0
8	5.9	28	6.8	48	8.0
9	5.9	29	6.8	49	8.0
10	6.0	30	6.9	50	8.0
11	6.0	31	7.0	51	8.1
12	6.1	32	7.1	52	8.2
13	6.1	33	7.2	53	8.2
14	6.1	34	7.3	54	8.3
15	6.1	35	7.3	55	8.3
16	6.3	36	7.4	56	8.3
17	6.3	37	7.4	57	8.4
18	6.4	38	7.5	58	8.6
19	6.4	39	7.5	59	8.7
20	6.4	40	7.5	60	8.7

Abreviaturas: ID, identificação; GMR, grupo de maturidade relativa.

Detalhes experimentais e características avaliadas

O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, com arranjo fatorial 2 x 20 (níveis de compactação x genótipos de soja em cada grupo) em faixas e três repetições, totalizando 360 parcelas. Cada parcela tinha 2 m de comprimento e 0,5 m de espaçamento. A densidade de semeadura utilizada foi estabelecida de acordo com o grupo de maturidade relativa dos genótipos, ou seja, 20 sementes m⁻¹ (5.0 < GMR < 6.4), 16 sementes m⁻¹ (6.5 < GMR < 7.5) e 12 sementes m⁻¹ (7.7 < GMR < 8.7).

As sementes de todos os genótipos foram tratadas com o fungicida Derosal®, conforme a recomendação do fabricante, e semeadas manualmente em profundidade de cerca de 5 cm. A adubação de cobertura e aplicação de defensivos foram realizadas de acordo com a necessidade da cultura, em função da incidência de pragas, doenças e plantas daninhas.

As avaliações de campo foram realizadas nos estádios vegetativo (VE- emergência das plântulas) e reprodutivo (R1 - início do florescimento e R8 - maturação plena) de desenvolvimento da soja (Oliveira Junior et al., 2016). A colheita foi realizada manualmente, de forma gradativa, conforme o ciclo dos genótipos em estudo. Os dados meteorológicos (temperatura, umidade relativa do ar e precipitação) foram monitorados continuamente pela Estação Climatológica Principal de Viçosa (Universidade Federal de Viçosa, 2022).

A porcentagem de plântulas emergidas (EME) foi contabilizada quinze dias após a semeadura da soja. A altura inicial da planta (AI), o diâmetro da haste (DH), o número de nós (NN), o comprimento de entrenó (CE), o número de ramos laterais (RL) e a matéria seca da parte aérea (MSPA) foram avaliados no estágio de desenvolvimento R1 (início do florescimento). As extremidades das parcelas foram consideradas bordaduras e, por isso, foram avaliadas cinco plantas por parcela. Assim, a altura inicial da planta foi determinada como a distância da base da planta até a ponta do trifólio superior. O diâmetro da haste foi medido com auxílio de um paquímetro digital, na parte basal da planta. O comprimento de entrenó foi determinado pela razão entre a altura da planta e o número de nós. Em seguida, as plantas foram cortadas na base, embaladas em sacos de papel e mantidas em estufa de circulação de ar a 65°C por 72 h para a determinação da matéria seca da parte aérea.

No estágio de desenvolvimento R8 (maturação plena), determinou-se a altura final da planta (AF), a taxa de crescimento absoluto (TCA), a taxa de crescimento relativo (TCR), o número de vagens (NV), o peso de 100 sementes (PCS) e a produção de grãos (PROD) por planta. O número de dias entre a semeadura da soja até o florescimento das plantas (DF) e a colheita dos grãos (DC) foi registrado de acordo com o genótipo e nível de compactação do solo.

$$TCA = \frac{A_f - A_i}{T_f - T_i}$$

$$TCR = \frac{\ln(A_f) - \ln(A_i)}{(T_f - T_i) * \frac{1}{A_i}}$$

Em que: A_i e A_f indicam, respectivamente, a altura inicial e final das plantas. Enquanto que T_i e T_f indicam o tempo de crescimento das plantas entre os estádios R1 e R8.

Análise estatística

A análise de variância dos dados (ANOVA) foi realizada por meio do software R 3.6.0 (R Core Team, 2019). As médias obtidas para os genótipos foram agrupadas por meio do teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Análise de componentes principais foi utilizada para classificar os genótipos quanto ao desempenho no campo e a suscetibilidade ao estresse de compactação do solo.

Índices de suscetibilidade à compactação do solo

Os genótipos suscetíveis e tolerantes à compactação do solo foram identificados por meio do índice de suscetibilidade ao estresse (*Stress Susceptibility Index* - SSI) e o índice de mudança relativa de característica (*Relative Trait Change* - RTC), calculados usando as equações abaixo (Fischer & Maurer, 1978; Doorenbos & Kassam, 1986; Winter et al., 1988; Golbashy et al., 2010):

$$SSI_i = \frac{(1 - (GY_i^{CP}/GY_i^{NC}))}{(1 - (\bar{x} GY_i^{CP}/\bar{x} GY_i^{NC}))}$$

Em que: *i* representa o *i*-ésimo genótipo; *GY* (*grain yield*) corresponde à produtividade de grãos; os índices *CP* e *NC* indicam o tratamento compactado e não compactado, respectivamente; e \bar{x} indica a média da produtividade de grãos (*GY*) de todos os genótipos examinados.

$$RTC_i = \frac{(L - H)}{L}$$

Em que: *L* (*low*) e *H* (*high*) representam nível baixo ou alto de compactação do solo, respectivamente.

RESULTADOS

Condições ambientais e níveis de compactação do solo

Nas condições do campo, a temperatura média foi de 22°C e a umidade relativa do ar de aproximadamente 82%, durante os cinco meses de experimento. A precipitação foi maior em dezembro de 2020 e menor em fevereiro de 2021, sendo registrados valores de 198 e 4 mm, respectivamente (Apêndice 1). A densidade do solo após a semeadura foi de 1,16 g cm⁻³ no controle e 1,25 g cm⁻³ no tratamento com compactação. Em dezembro, a resistência do solo à penetração das raízes variou de 0,74 a 1,72 MPa no tratamento controle e 1,38 a 2,09 MPa no solo compactado (Figura 1A). Já em fevereiro, essa variação foi de 1,27 a 3,10 MPa no tratamento controle e 2,01 a 3,39 MPa no solo compactado (Figura 1B). As maiores diferenças entre os tratamentos foram observadas na profundidade do solo de 0 a 15 cm para ambas as avaliações.

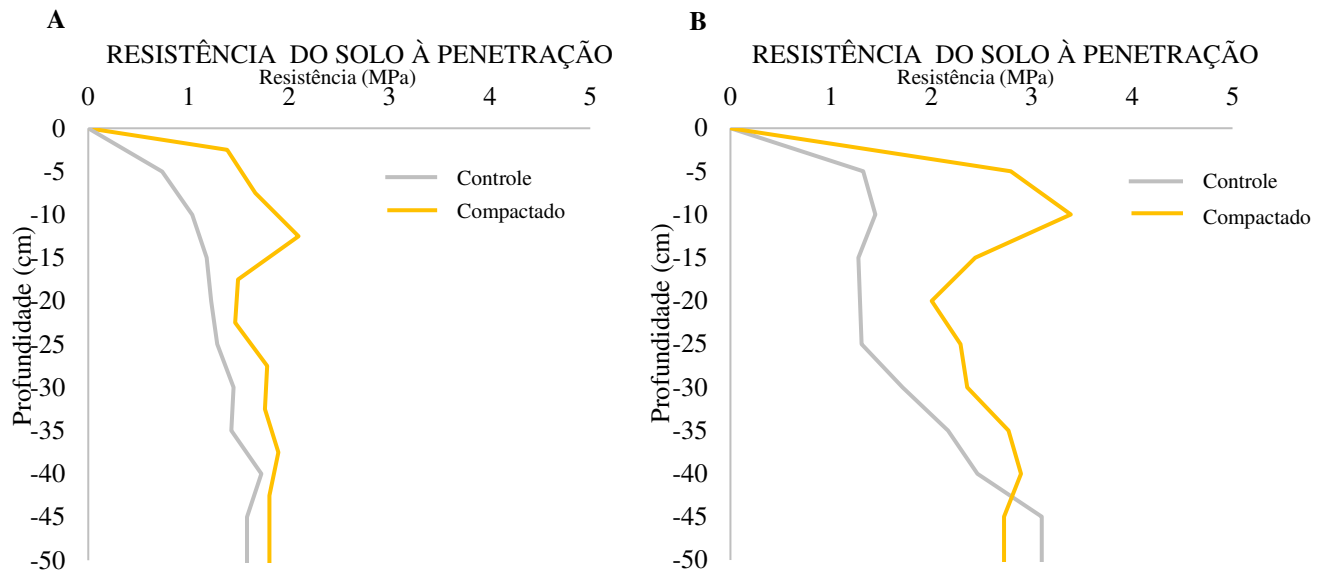


Figura 1. Resistência do solo à penetração (MPa) para os tratamentos controle e solo compactado em dezembro de 2020 (A) e fevereiro de 2021 (B), avaliada na camada de 0,0 a 0,50 m de profundidade.

Variabilidade de genótipos de soja em função da compactação do solo

Os genótipos de soja foram separados de acordo com o padrão de crescimento de plantas e produção de grãos, determinado pelo GMR (Apêndice 2). Nos três grupos não foi observada interação significativa entre genótipos e níveis de compactação para a maioria das características avaliadas (Tabelas 2, 3 e 4), com exceção para emergência de plântulas, número de nós e matéria seca da parte aérea no grupo 2 (Tabela 5).

Independentemente dos níveis de compactação do solo, os genótipos 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19 e 20 (grupo 1), 21, 33, 34, 36, 37, 38, 39 e 40 (grupo 2) e 41, 54, 55, 58, 59 e 60 (grupo 3) apresentaram maior crescimento de plantas, de acordo com as características fenotípicas, os quais também se destacaram pela alta produção de grãos e número de vagens por planta. No entanto, a compactação do solo aumentou a emergência de plântulas, a altura inicial, o número de nós, a matéria seca da parte aérea, a altura final das plantas, mas reduziu significativamente a taxa de crescimento relativo, o número de vagens e a produção de grãos nos três grupos (Tabelas 2, 3, 4 e Apêndice 3).

Interação significativa foi observada entre genótipos e níveis de compactação do solo para emergência de plântulas, número de nós e matéria seca da parte aérea no grupo 2 (Tabela 5). Assim, a compactação do solo aumentou a porcentagem de emergência de plântulas, exceto para os genótipos 24, 26, 29, 31 e 35; o número de nós por planta para os genótipos 21, 28, 33, 34, 36 e 37; e a matéria seca da parte aérea para os genótipos 21, 30, 33, 34, 35, 36 e 37. No tratamento com compactação, não houve diferença significativa entre genótipos para

emergência de plântulas e número de nós, mas a matéria seca da parte aérea foi maior para os genótipos 21, 33, 34, 35, 37, 38, 39 e 40. Já no tratamento controle, os genótipos 24, 26, 31 e 35 apresentaram maior emergência de plântulas, os genótipos 23, 29, 31, 32, 35, 38, 39 e 40 apresentaram maior número de nós, e os genótipos 23, 27, 29, 31, 32, 38, 39 e 40 apresentaram maior matéria seca da parte aérea.

Tabela 2. Influência dos níveis de compactação do solo nas características agrônômicas dos genótipos de soja do grupo 1.

5.0 < GMR < 6.4																
Genótipo	EME (%)	AI (cm)	DH (mm)	RL	NN	CE (cm)	MSPA (g)	DF	AF (cm)	TCA (cm/semana)	TCR (cm/cm/semana)	DC	NV	PCS (g)	PROD (g)	
1	68 a	28,07 b	5,05 a	7 b	9 b	3,19 b	4,98 a	42 b	54,96 c	2,75 b	0,0025 b	116 b	43 b	20,41 a	20,58 a	
2	73 a	29,37 b	5,39 a	7 b	10 a	3,01 b	5,10 a	42 b	56,67 c	2,77 b	0,0023 b	118 b	32 b	21,06 a	17,15 b	
3	76 a	25,13 b	5,24 a	6 b	8 b	3,04 b	3,98 a	42 b	53,75 c	3,00 b	0,0031 a	118 b	26 b	19,52 a	12,82 b	
4	78 a	25,40 b	5,37 a	8 a	10 a	2,66 b	4,11 a	42 b	53,96 c	2,86 b	0,0030 a	113 b	33 b	17,54 b	14,24 b	
5	72 a	26,53 b	4,92 a	7 b	8 b	3,25 b	3,88 a	42 b	55,88 c	2,78 b	0,0027 b	120 b	29 b	17,52 b	12,21 b	
6	80 a	28,33 b	4,91 a	8 b	10 a	2,80 b	5,10 a	42 b	60,38 c	3,12 b	0,0026 b	120 b	36 b	17,84 b	14,53 b	
7	80 a	27,27 b	5,13 a	8 b	9 a	2,90 b	3,87 a	42 b	66,00 c	3,67 a	0,0032 a	121 b	45 b	16,26 b	14,30 b	
8	80 a	24,97 b	4,74 a	7 b	9 b	2,95 b	3,21 a	42 b	68,71 b	4,24 a	0,0040 a	123 a	44 b	15,52 b	14,76 b	
9	74 a	26,90 b	5,52 a	7 b	9 b	3,18 b	3,54 a	42 b	70,29 b	4,05 a	0,0033 a	126 a	31 b	17,74 b	13,09 b	
10	63 a	33,27 a	5,28 a	7 b	9 b	3,63 a	4,30 a	42 b	78,25 a	4,21 a	0,0025 b	123 a	41 b	19,22 a	17,29 b	
11	67 a	29,20 b	5,14 a	10 a	11 a	2,67 b	5,49 a	44 a	75,17 b	4,24 a	0,0031 a	126 a	58 a	16,30 b	17,14 b	
12	56 a	30,40 a	5,02 a	10 a	9 b	3,30 b	3,88 a	41 b	71,50 b	3,83 a	0,0028 b	125 a	46 b	18,98 a	17,81 b	
13	76 a	28,17 b	4,67 a	7 b	9 b	3,11 b	4,39 a	42 b	69,92 b	3,67 a	0,0029 a	122 a	41 b	14,85 b	13,42 b	
14	77 a	28,10 b	4,72 a	7 b	9 b	3,15 b	3,86 a	42 b	57,42 c	2,94 b	0,0026 b	121 b	25 b	16,91 b	11,16 b	
15	81 a	30,87 a	5,22 a	9 a	10 a	3,07 b	5,21 a	42 b	74,71 b	4,23 a	0,0028 b	121 b	49 a	16,27 b	18,84 a	
16	75 a	28,67 b	5,03 a	9 a	9 b	3,18 b	4,90 a	42 b	86,88 a	4,80 a	0,0033 a	128 a	58 a	16,37 b	19,09 a	
17	71 a	29,93 a	5,26 a	9 a	10 a	3,06 b	3,93 a	42 b	80,54 a	4,56 a	0,0031 a	121 b	38 b	19,08 a	16,02 b	
18	70 a	33,57 a	4,94 a	9 a	10 a	3,48 a	5,25 a	42 b	85,50 a	4,32 a	0,0024 b	128 a	70 a	17,41 b	26,77 a	
19	68 a	32,03 a	4,82 a	11 a	8 b	3,92 a	2,78 a	41 b	82,67 a	4,33 a	0,0027 b	125 a	63 a	15,43 b	21,72 a	
20	64 a	32,33 a	5,01 a	9 a	10 a	3,26 b	3,95 a	42 b	81,25 a	4,34 a	0,0026 b	125 a	58 a	16,06 b	21,97 a	
Compactado	81 a	31,30 a	5,28 a	8 a	10 a	3,17 a	4,70 a	42 a	71,09 a	3,68 a	0,0024 b	122 a	36 b	17,50 a	13,91 b	
Controle	64 b	26,55 b	4,86 b	8 a	9 b	3,11 a	3,87 b	42 a	67,35 b	3,79 a	0,0033 a	122 a	50 a	17,53 a	19,58 a	
CV (%)	18,94	9,91	13,07	18,24	10,4	11,87	33,29	2,24	11,78	18,84	20,65	4,71	31,52	10,74	32,46	

Emergência de plântulas (EME), altura inicial (AI), diâmetro da haste (DH), número de ramos laterais (RL), número de nós (NN), comprimento de entrenó (CE), matéria seca da parte aérea (MSPA), dias até o florescimento (DF), altura final (AF), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), dias até a colheita (DC), número de vagens (NV), peso de 100 sementes (PCS) e produção (PROD). Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott ($P < 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Tabela 3. Influência dos níveis de compactação do solo nas características agrônômicas dos genótipos de soja do grupo 2.

6.5 < GMR < 7.5																											
Genótipo	EME (%)	AI (cm)	DH (mm)	RL	NN	CE (cm)	MSPA (g)	DF	AF (cm)	TCA (cm/semana)	TCR (cm/cm/semana)	DC	NV	PCS (g)	PROD (g)												
21	55	31,50	a	5,26	a	11	a	10	3,31	a	4,84	48	a	68,33	c	3,27	b	0,0022	b	125	b	68	a	15,92	c	25,14	a
22	69	24,07	b	5,91	a	10	b	10	2,52	b	4,11	43	b	58,54	d	3,25	b	0,0034	b	125	b	48	b	17,43	b	18,42	b
23	67	31,57	a	5,27	a	9	b	9	3,50	a	4,53	43	b	82,42	b	5,10	a	0,0030	b	121	c	42	b	19,97	a	17,97	b
24	75	32,43	a	5,94	a	11	a	9	3,53	a	4,35	43	b	79,38	c	4,36	b	0,0026	b	125	b	67	a	19,71	a	25,49	a
25	72	32,93	a	5,15	a	9	b	9	3,87	a	3,43	46	a	77,25	c	4,16	b	0,0024	b	125	b	41	b	17,80	b	18,02	b
26	77	29,27	a	4,78	b	8	b	9	3,22	a	3,41	42	b	73,21	c	4,63	a	0,0033	b	119	c	45	b	17,85	b	18,18	b
27	66	24,80	b	5,04	a	7	b	10	2,61	b	4,52	42	b	86,25	b	5,46	a	0,0046	a	126	b	54	b	18,58	b	18,71	b
28	43	27,23	b	4,04	b	8	b	9	3,05	b	3,41	42	b	71,38	c	3,90	b	0,0033	b	123	c	48	b	17,50	b	18,38	b
29	64	32,50	a	5,31	a	9	b	10	3,28	a	4,62	43	b	87,46	b	4,98	a	0,0028	b	121	c	61	a	15,65	c	21,13	b
30	56	29,87	a	5,42	a	10	a	10	3,12	b	4,59	44	b	75,17	c	3,86	b	0,0027	b	128	a	47	b	18,76	b	19,92	b
31	79	36,40	a	5,72	a	9	b	11	3,51	a	5,45	43	b	93,25	a	5,12	a	0,0024	b	128	a	53	b	19,82	a	21,61	b
32	60	28,87	a	5,60	a	9	b	10	2,93	b	5,16	42	b	89,58	b	5,68	a	0,0038	a	126	b	70	a	17,70	b	25,44	a
33	69	30,67	a	5,36	a	10	b	10	3,05	b	5,47	44	b	86,88	b	5,35	a	0,0035	b	126	b	56	b	16,34	c	19,71	b
34	48	29,43	a	5,68	a	10	b	9	3,21	a	4,66	42	b	97,29	a	5,93	a	0,0039	a	129	a	56	b	18,59	b	24,86	a
35	74	32,67	a	5,70	a	9	b	10	3,24	a	4,88	42	b	95,92	a	5,82	a	0,0032	b	126	b	52	b	16,81	c	20,40	b
36	49	26,13	b	5,82	a	8	b	9	2,88	b	3,77	41	b	83,42	b	5,05	a	0,0043	a	129	a	63	a	16,81	c	22,93	a
37	49	24,97	b	5,75	a	8	b	9	2,67	b	5,47	43	b	82,54	b	5,02	a	0,0045	a	130	a	76	a	15,18	c	23,86	a
38	61	32,77	a	5,47	a	12	a	11	3,07	b	6,19	47	a	87,75	b	4,73	a	0,0027	b	130	a	80	a	15,78	c	27,31	a
39	60	33,97	a	5,25	a	11	a	10	3,29	a	5,71	45	a	92,96	a	4,97	a	0,0028	b	132	a	85	a	17,62	b	31,21	a
40	51	31,33	a	5,54	a	11	a	11	2,85	b	5,55	44	b	91,92	a	4,96	a	0,0030	b	132	a	63	a	18,20	b	27,15	a
Compactado	77	33,43	a	5,88	a	10	a	10	3,29	a	5,37	43	b	89,47	a	5,12	a	0,0027	b	126	a	54	b	17,60	a	20,54	b
Controle	47	26,91	b	4,92	b	9	b	9	2,98	b	4,04	44	a	76,62	b	4,44	b	0,0037	a	126	a	64	a	17,60	a	24,05	a
CV (%)		11,61		12,63		15,20			13,33			6,95		9,83		19,64		27,6200		3,03		28,52		7,33		29,25	

Emergência de plântulas (EME), altura inicial (AI), diâmetro da haste (DH), número de ramos laterais (RL), número de nós (NN), comprimento de entrenó (CE), matéria seca da parte aérea (MSPA), dias até o florescimento (DF), altura final (AF), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), dias até a colheita (DC), número de vagens (NV), peso de 100 sementes (PCS) e produção (PROD). Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott ($P < 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Tabela 4. Influência dos níveis de compactação do solo nas características agrônômicas dos genótipos de soja do grupo 3.

7.7 < GMR < 8.7																
Genótipo	EME (%)	AI (cm)	DH (mm)	RL	NN	CE (cm)	MSPA (g)	DF	AF (cm)	TCA (cm/semana)	TCR (cm/cm/semana)	DC	NV	PCS (g)	PROD (g)	
41	42 a	49,33 d	9,04 a	17 c	14 b	3,63 c	16,61 b	57 a	75,33 e	2,05 c	0,0007 e	133 b	122 b	17,22 a	43,77 a	
42	38 a	35,50 f	7,72 a	13 d	11 c	3,21 d	7,54 c	52 b	89,29 d	4,05 a	0,0020 b	139 b	129 b	17,97 a	48,71 a	
43	62 a	41,70 e	6,71 b	15 d	12 c	3,55 c	11,50 c	60 a	101,83 c	4,61 a	0,0017 c	139 b	110 b	19,06 a	34,85 a	
44	61 a	41,93 e	6,95 b	15 d	12 c	3,64 c	8,34 c	60 a	98,21 c	4,33 a	0,0016 c	136 b	121 b	18,35 a	35,07 a	
45	61 a	40,90 e	6,40 b	13 d	11 c	3,67 c	8,15 c	54 a	94,88 c	4,24 a	0,0017 c	137 b	111 b	16,07 b	32,92 a	
46	50 a	31,03 f	6,64 b	11 e	10 c	3,11 d	6,11 c	45 c	88,63 d	4,43 a	0,0027 a	141 b	120 b	17,93 a	46,10 a	
47	60 a	39,33 e	6,24 b	13 d	11 c	3,58 c	9,05 c	52 b	94,96 c	4,32 a	0,0018 c	136 b	149 a	16,51 b	45,14 a	
48	51 a	43,10 e	7,54 b	14 d	11 c	3,96 c	10,48 c	60 a	101,63 c	4,31 a	0,0015 c	143 a	92 b	15,90 b	33,61 a	
49	65 a	45,67 e	8,06 a	17 c	15 a	3,06 d	15,44 b	60 a	106,04 b	4,47 a	0,0014 c	143 a	116 b	18,34 a	41,14 a	
50	44 a	34,73 f	7,03 b	12 e	10 c	3,32 d	7,35 c	45 c	103,79 c	4,99 a	0,0023 b	146 a	132 b	18,18 a	50,87 a	
51	63 a	41,00 e	8,80 a	13 d	12 c	3,48 c	12,60 b	62 a	118,17 b	5,35 a	0,0019 c	148 a	102 b	15,90 b	30,63 a	
52	62 a	40,73 e	8,20 a	14 d	13 c	3,20 d	13,58 b	62 a	113,33 b	4,77 a	0,0017 c	148 a	103 b	18,19 a	37,05 a	
53	70 a	43,17 e	8,01 a	17 c	14 b	3,20 d	13,92 b	59 a	106,54 b	4,22 a	0,0014 c	148 a	111 b	16,90 a	36,22 a	
54	57 a	55,10 c	7,52 b	19 b	15 a	3,81 c	17,42 b	50 b	110,77 b	3,86 a	0,0009 d	148 a	137 b	13,51 c	33,40 a	
55	69 a	68,00 b	8,73 a	18 b	14 b	4,85 b	19,03 b	53 b	115,54 b	3,30 b	0,0006 e	148 a	100 b	15,17 b	28,36 a	
56	69 a	43,23 e	8,03 a	16 c	14 b	3,20 d	12,52 b	57 a	108,00 b	4,46 a	0,0015 c	148 a	104 b	18,18 a	42,05 a	
57	59 a	45,30 e	8,97 a	13 d	13 b	3,56 c	12,83 b	59 a	118,29 b	5,11 a	0,0015 c	148 a	96 b	17,66 a	35,94 a	
58	73 a	91,00 a	8,74 a	21 a	16 a	5,64 a	35,18 a	41 c	141,75 a	3,69 a	0,0004 e	148 a	188 a	14,49 c	46,91 a	
59	70 a	58,57 c	8,54 a	17 c	14 b	4,12 c	20,42 b	55 a	94,58 c	2,49 c	0,0006 e	148 a	133 b	18,83 a	41,93 a	
60	67 a	48,53 d	8,74 a	16 c	15 a	3,29 d	16,74 b	57 a	106,67 b	4,09 a	0,0012 d	148 a	163 a	15,56 b	50,30 a	
Compactado	71 a	50,43 a	7,89 a	15 a	13 a	3,80 a	15,20 a	55 a	108,13 a	4,20 a	0,0013 b	144 a	100 b	17,04 a	33,14 b	
Controle	48 b	43,35 b	7,77 a	15 a	12 b	3,50 b	12,28 b	55 a	100,69 b	4,12 a	0,0016 a	143 a	144 a	16,96 a	46,36 a	
CV (%)	32,48	15,12	14,81	11,66	8,34	12,35	46,73	9,14	9,89	20,71	23,39	3,85	32,11	7,15	35,09	

Emergência de plântulas (EME), altura inicial (AI), diâmetro da haste (DH), número de ramos laterais (RL), número de nós (NN), comprimento de entrenó (CE), matéria seca da parte aérea (MSPA), dias até o florescimento (DF), altura final (AF), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), dias até a colheita (DC), número de vagens (NV), peso de 100 sementes (PCS) e produção (PROD). Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott ($P < 0,05$). CV: coeficiente de variação.

Tabela 5. Interações entre níveis de compactação do solo e genótipos de soja do grupo 2 para emergência, número de nós e matéria seca da parte aérea.

6.5 < GMR < 7.5											
EME (%)				NN				MSPA (g)			
Genótipos	Controle	Compactado	Médias	Genótipos	Controle	Compactado	Médias	Genótipos	Controle	Compactado	Médias
21	26 Bc	83 Aa	55	21	8 Bb	11 Aa	10	21	2,68 Bb	7,00 Aa	4,84
22	51 Bb	86 Aa	69	22	9 Ab	10 Aa	10	22	3,70 Ab	4,53 Ab	4,11
23	51 Bb	82 Aa	67	23	9 Aa	9 Aa	9	23	4,74 Aa	4,31 Ab	4,53
24	71 Aa	79 Aa	75	24	9 Ab	10 Aa	9	24	3,96 Ab	4,73 Ab	4,35
25	60 Bb	83 Aa	72	25	8 Ab	9 Aa	9	25	2,64 Ab	4,22 Ab	3,43
26	71 Aa	83 Aa	77	26	9 Ab	10 Aa	9	26	2,99 Ab	3,82 Ab	3,41
27	50 Bb	81 Aa	66	27	9 Ab	10 Aa	10	27	4,80 Aa	4,24 Ab	4,52
28	19 Bc	67 Aa	43	28	8 Bb	10 Aa	9	28	2,58 Ab	4,23 Ab	3,41
29	59 Ab	68 Aa	64	29	10 Aa	10 Aa	10	29	5,35 Aa	3,89 Ab	4,62
30	43 Bc	69 Aa	56	30	9 Ab	10 Aa	10	30	3,42 Bb	5,75 Ab	4,59
31	71 Aa	86 Aa	79	31	11 Aa	10 Aa	11	31	6,38 Aa	4,51 Ab	5,45
32	36 Bc	84 Aa	60	32	10 Aa	10 Aa	10	32	5,04 Aa	5,28 Ab	5,16
33	58 Bb	80 Aa	69	33	9 Bb	11 Aa	10	33	3,41 Bb	7,53 Aa	5,47
34	26 Bc	71 Aa	48	34	8 Bb	11 Aa	9	34	2,66 Bb	6,65 Aa	4,66
35	71 Aa	78 Aa	74	35	9 Aa	11 Aa	10	35	3,47 Bb	6,29 Aa	4,88
36	26 Bc	72 Aa	49	36	8 Bb	10 Aa	9	36	2,23 Bb	5,31 Ab	3,77
37	24 Bc	75 Aa	49	37	8 Bb	11 Aa	9	37	3,62 Bb	7,32 Aa	5,47
38	50 Bb	73 Aa	61	38	11 Aa	11 Aa	11	38	6,13 Aa	6,24 Aa	6,19
39	46 Bb	74 Aa	60	39	10 Aa	11 Aa	10	39	5,22 Aa	6,20 Aa	5,71
40	33 Bc	69 Aa	51	40	11 Aa	11 Aa	11	40	5,72 Aa	5,39 Aa	5,55
Médias	47	77	62	Médias	9	10	10	Médias	4,04	5,37	4,70

Emergência de plântulas (EME), número de nós (NN) e matéria seca da parte aérea (MSPA). Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott ($P < 0,05$).

Avaliação da suscetibilidade de genótipos à compactação do solo

O índice de suscetibilidade ao estresse (SSI) foi calculado para os 60 genótipos, classificando-os como suscetíveis ou tolerantes à compactação do solo, com base no rendimento das plantas (Tabelas 6, 7 e 8). Os genótipos sensíveis apresentaram maior mudança relativa de característica (RTC) para produção de grãos em relação aos tolerantes (Apêndice 4). Em cada grupo, foram identificados dez genótipos tolerantes e dez suscetíveis ao estresse. Os genótipos classificados como tolerantes foram 3, 16, 7, 13, 14, 1, 4, 5, 6 e 15 (grupo 1), 24, 35, 34, 22, 28, 38, 25, 39, 23 e 36 (grupo 2) e 48, 51, 57, 55, 45, 59, 49, 44, 41 e 42 (grupo 3).

Tabela 6. Influência dos níveis de compactação do solo na produção de grãos, mudança relativa de característica, índice de suscetibilidade ao estresse e classificação de genótipos do grupo 1.

Genótipo	Tratamento	Rendimento de grãos (g planta ⁻¹)	RTC	SSI	Tolerante/sensível
1	controle	22,8	0,194	0,668	Tolerante
	compactado	18,4			
2	controle	20,1	0,291	1,004	Sensível
	compactado	14,2			
3	controle	11,5	-0,236	-0,816	Tolerante
	compactado	14,2			
4	controle	15,8	0,203	0,700	Tolerante
	compactado	12,6			
5	controle	13,7	0,212	0,732	Tolerante
	compactado	10,8			
6	controle	16,4	0,230	0,795	Tolerante
	compactado	12,6			
7	controle	14,6	0,036	0,123	Tolerante
	compactado	14,0			
8	controle	18,0	0,364	1,258	Sensível
	compactado	11,5			
9	controle	16,5	0,417	1,438	Sensível
	compactado	9,6			
10	controle	22,2	0,440	1,518	Sensível
	compactado	12,4			
11	controle	21,1	0,373	1,288	Sensível
	compactado	13,2			
12	controle	24,2	0,530	1,830	Sensível
	compactado	11,4			
13	controle	14,2	0,115	0,397	Tolerante
	compactado	12,6			
14	controle	12,2	0,169	0,585	Tolerante
	compactado	10,1			
15	controle	21,7	0,267	0,920	Tolerante
	compactado	15,9			
16	controle	18,5	-0,065	-0,223	Tolerante
	compactado	19,7			
17	controle	19,4	0,351	1,211	Sensível
	compactado	12,6			
18	controle	34,4	0,446	1,538	Sensível
	compactado	19,1			
19	controle	27,2	0,405	1,398	Sensível
	compactado	16,2			
20	controle	27,0	0,373	1,288	Sensível
	compactado	16,9			
Média	controle	19,6	Genótipos sensíveis SSI > 1,0 Genótipos tolerantes SSI < 1,0		
	compactado	13,9			
	CV (%)	32,5			

Tabela 7. Influência dos níveis de compactação do solo na produção de grãos, mudança relativa de característica, índice de suscetibilidade ao estresse e classificação de genótipos do grupo 2.

Genótipo	Tratamento	Rendimento de grãos (g planta⁻¹)	RTC	SSI	Tolerante/sensível
21	controle	28,2	0,216	1,483	Sensível
	compactado	22,1			
22	controle	17,8	-0,071	-0,488	Tolerante
	compactado	19,1			
23	controle	19,1	0,121	0,833	Tolerante
	compactado	16,8			
24	controle	22,1	-0,310	-2,129	Tolerante
	compactado	28,9			
25	controle	18,9	0,096	0,655	Tolerante
	compactado	17,1			
26	controle	20,2	0,198	1,357	Sensível
	compactado	16,2			
27	controle	21,9	0,289	1,983	Sensível
	compactado	15,5			
28	controle	18,6	0,025	0,170	Tolerante
	compactado	18,1			
29	controle	23,0	0,160	1,096	Sensível
	compactado	19,3			
30	controle	23,9	0,332	2,281	Sensível
	compactado	15,9			
31	controle	27,7	0,439	3,008	Sensível
	compactado	15,5			
32	controle	30,1	0,310	2,129	Sensível
	compactado	20,8			
33	controle	22,2	0,224	1,534	Sensível
	compactado	17,2			
34	controle	22,5	-0,208	-1,428	Tolerante
	compactado	27,2			
35	controle	18,2	-0,237	-1,625	Tolerante
	compactado	22,6			
36	controle	24,7	0,140	0,961	Tolerante
	compactado	21,2			
37	controle	28,1	0,300	2,058	Sensível
	compactado	19,7			
38	controle	28,4	0,078	0,537	Tolerante
	compactado	26,2			
39	controle	33,2	0,117	0,802	Tolerante
	compactado	29,3			
40	controle	32,2	0,316	2,167	Sensível
	compactado	22,1			
Média	controle	24,0	Genótipos sensíveis SSI > 1,0		
	compactado	20,5	Genótipos tolerantes SSI < 1,0		
	CV (%)	29,3			

Tabela 8. Influência dos níveis de compactação do solo na produção de grãos, mudança relativa de característica, índice de suscetibilidade ao estresse e classificação de genótipos do grupo 3.

Genótipo	Tratamento	Rendimento de grãos (g planta ⁻¹)	RTC	SSI	Tolerante/sensível
41	controle compactado	50,0 37,6	0,248	0,870	Tolerante
42	controle compactado	56,7 40,7	0,282	0,990	Tolerante
43	controle compactado	40,9 28,8	0,298	1,043	Sensível
44	controle compactado	39,9 30,3	0,241	0,845	Tolerante
45	controle compactado	33,6 32,3	0,040	0,139	Tolerante
46	controle compactado	57,4 34,8	0,393	1,376	Sensível
47	controle compactado	56,4 33,9	0,400	1,403	Sensível
48	controle compactado	32,2 35,0	-0,088	-0,309	Tolerante
49	controle compactado	44,8 37,5	0,162	0,567	Tolerante
50	controle compactado	64,5 37,2	0,423	1,484	Sensível
51	controle compactado	29,8 31,5	-0,059	-0,205	Tolerante
52	controle compactado	45,5 28,6	0,372	1,302	Sensível
53	controle compactado	47,8 24,6	0,485	1,699	Sensível
54	controle compactado	43,0 23,8	0,447	1,566	Sensível
55	controle compactado	28,4 28,4	0,001	0,002	Tolerante
56	controle compactado	53,8 30,2	0,438	1,536	Sensível
57	controle compactado	35,2 36,7	-0,044	-0,153	Tolerante
58	controle compactado	61,9 31,9	0,485	1,701	Sensível
59	controle compactado	45,0 38,8	0,137	0,481	Tolerante
60	controle compactado	60,5 40,1	0,336	1,178	Sensível
Média	controle	46,4	Genótipos sensíveis SSI > 1,0		
	compactado	33,1	Genótipos tolerantes SSI < 1,0		
	CV (%)	35,1			

A análise de componentes principais, com base na mudança relativa de característica (RTC) e na classificação dos genótipos pelo índice de suscetibilidade ao estresse (SSI), mostrou que os genótipos tolerantes apresentaram menores alterações na taxa de crescimento relativo, taxa de crescimento absoluto, na altura final, no número de vagens e na produção de grãos em resposta à compactação do solo (Figura 2).

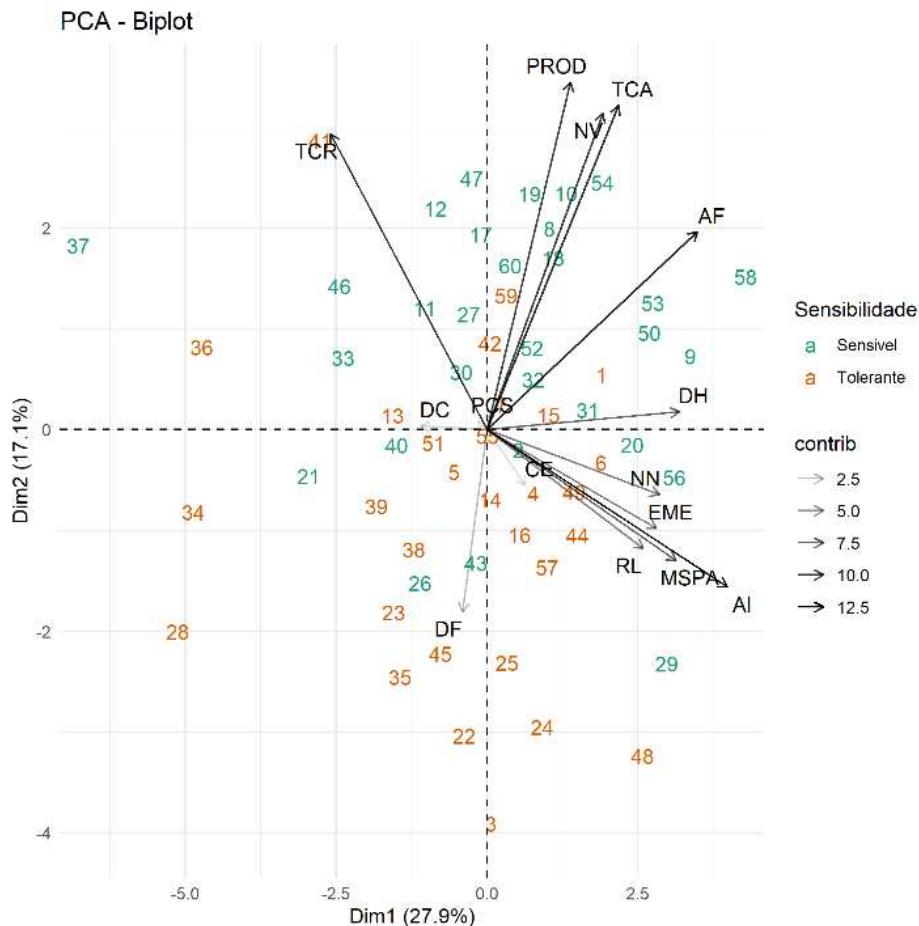


Figura 2. Biplot da análise de componentes principais mostrando a relação entre a mudança relativa de característica (RTC) e a sensibilidade de genótipos de soja à compactação do solo. Emergência de plântulas (EME), altura inicial (AI), diâmetro da haste (DH), número de ramos laterais (RL), número de nós (NN), comprimento de entrenó (CE), matéria seca da parte aérea (MSPA), dias até o florescimento (DF), altura final (AF), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), dias até a colheita (DC), número de vagens (NV), peso de 100 sementes (PCS) e produção (PROD).

DISCUSSÃO

A compactação do solo é afetada pelo tráfego de tratores e implementos agrícolas, teor de água, textura, estrutura, densidade e matéria orgânica do solo (Reichert et al., 2009). Neste estudo, o Argissolo Vermelho-Amarelo de textura muito argilosa apresentou aumento da

resistência do solo à penetração com a carga aplicada pelo trator (Figura 1). Quanto maior o teor de água, de argila no solo e o número de passadas na área, maiores são os níveis de compactação atingidos (Nawaz et al., 2013). No entanto, as camadas superficiais sofreram maiores alterações na estrutura física, uma vez que o histórico de cultivo da área utilizada foi por meio do manejo convencional, ou seja, utilizando aração e gradagem. Os efeitos de múltiplas passagens de tratores nas propriedades do solo são relatados em vários trabalhos, que destacam os impactos negativos, principalmente na porosidade total, em diferentes profundidades (Shaheb et al., 2021).

A resistência do solo à penetração variou de acordo com a umidade do solo (conforme o regime de chuvas registrado), sendo menor em dezembro de 2020 (2,09 MPa) e maior em fevereiro de 2021 (3,39 MPa). Isto porque nos períodos de baixa precipitação ocorre o encolhimento do solo devido à secagem, redução da taxa de infiltração de água, com consequente aumento da impedância mecânica (Batey, 2009; Tracy et al., 2011; Grzesiak et al., 2014; Colombi et al., 2018; Shaheb et al., 2021).

Em todos os grupos, independentemente do nível de compactação do solo, os genótipos que apresentaram maior crescimento vegetativo também tiveram maior produção de grãos (Tabelas 2, 3, 4 e 5). De acordo com Dolferus (2014), o rendimento é uma característica complexa, determinada pelo crescimento e processos de desenvolvimento que são controlados por fatores ambientais durante o ciclo de vida da planta. A fotossíntese é a força motriz determinante para o desempenho da cultura, seja produção de biomassa ou grãos (Raines, 2011; Simkin et al., 2019; Brestic et al., 2021).

Já os efeitos da compactação do solo no crescimento, desenvolvimento e rendimento das plantas foram estudados para várias espécies de importância econômica, como trigo (Nosalewicz e Lipiec, 2014; Wu et al., 2018), algodão (Kulkarni et al., 2010), milho (Grzesiak et al., 2021) e soja (Shaheb et al., 2018; Sivarajan et al., 2018; Shaheb, 2020). Diferentemente de alguns trabalhos, os resultados mostraram que os genótipos de soja tiveram maior emergência de plântulas e crescimento vegetativo no solo compactado, mas reduções significativas na produção (Tabelas 2, 3, 4 e 5). Pois estas respostas relacionadas ao desempenho da cultura variam de acordo com o nível de compactação do solo e as condições climáticas locais (Galambošová et al., 2017).

O moderado grau de compactação do solo em camadas superficiais (2,09 MPa), identificado nos períodos iniciais de desenvolvimento da cultura, foi benéfico para a emergência de plântulas, devido ao maior contato das sementes com as partículas do solo, que

permite maior absorção de água para a germinação e melhor ancoragem das raízes, facilitando o crescimento da planta (Alameda e Villar, 2009). Essa maior emergência de plântulas em solo compactado também foi relatada para milho (Soyelu et al., 2001; Sivarajan et al., 2018; Grzesiak et al., 2021) e trigo (Atkinson et al., 2009). No entanto, muitos trabalhos mostram o atraso e desuniformidade do estabelecimento das plantas em condições de elevada resistência à penetração e densidade do solo, pois o encrostamento superficial induzido pela alta pressão das rodas do trator pode diminuir a concentração de oxigênio e, conseqüentemente, a velocidade de emergência das plântulas (Bassett et al., 2005; Sidhu e Duiker, 2006; Modolo et al., 2008; Tolon-Becerra et al., 2011; Jin et al., 2013; Millington, W. A. J., Misiewicz, P. A., Dickin, E. T., White, D. R., & Godwin, 2016; Shaheb, 2020; Shaheb et al., 2021).

Esse rápido arranque no crescimento inicial das plantas devido à compactação moderada do solo (2,09 MPa), associado às condições climáticas ideais em dezembro de 2020, período de muita chuva e sombra promovida pelas nuvens, permitiu intenso crescimento na fase vegetativa da soja. No entanto, em fevereiro de 2021, quando as condições foram de seca e pleno sol, a resistência do solo à penetração das raízes atingiu níveis elevados (3,39 MPa) e a cultura estava na fase reprodutiva R1 (início do florescimento / genótipos do grupo 3), R2 (florescimento pleno / genótipos do grupo 2) e R3 (início da formação da vagem / genótipos do grupo 1), estádios críticos para a determinação da produção.

O maior crescimento das plantas em condição de compactação do solo também foi relatado para outras culturas como cártamo (Sarto et al., 2018), ervilhaca, nabo, aveia preta, aveia branca (Müller et al., 2001), uma cultivar *Stylosanthes* (Castagnara et al., 2013), algodão (Falkoski Filho et al., 2013), milheto (Guimarães et al., 2013), colza e tremoço (Trükmann et al., 2008). Na presente pesquisa, apesar do maior crescimento vegetativo da soja, a produção de grãos por planta reduziu 29% (grupos 1 e 3) e 15% (grupo 2). Isto é devido à secagem superficial do solo compactado na fase R1, que proporcionou aumento ainda maior na resistência à penetração, reduzindo o crescimento do sistema radicular, a absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, a produtividade (Colombi et al., 2018). Valores de resistência à penetração acima de 2,0 MPa e densidade do solo de 1,39-1,49 g cm⁻³ em solos de textura argilosa são considerados críticos para o crescimento das raízes na maioria das culturas. Enquanto valores de 5,0 MPa e 1,47-1,58 g cm⁻³, podem interromper completamente o crescimento da raiz (Pierce et al., 1983; Bengough et al., 2011; Moraes et al., 2014). Assim, vários trabalhos relataram reduções significativas na produção devido aos níveis elevados de impedância mecânica do solo (Shaheb et al., 2021).

A alta compactação do solo (3,39 MPa), identificada nos estádios reprodutivos da soja, reduziu a taxa de crescimento relativo das plantas. O estresse ambiental constitui uma ameaça à produtividade da cultura, por isso, as plantas adotam estratégias para sobrevivência, por meio de ajustes na atividade metabólica e na taxa de crescimento e desenvolvimento. A planta pode aumentar o metabolismo para acelerar seu crescimento por meio da mobilização de recursos, ou reduzir o metabolismo e o seu crescimento para economizar recursos vitais nas condições de estresse abiótico. Assim, as reações de evitação e fuga fornecem proteção, permitindo as plantas escaparem do estresse ao diminuir as taxas de crescimento e alterar o tempo de floração (Pierik et al., 2011; Dolferus, 2014).

Por fim, este estudo classificou os genótipos de soja de acordo com seu desempenho sob compactação do solo com base no índice de suscetibilidade ao estresse (SSI). Os genótipos utilizados apresentaram ampla faixa de valores para produção de grãos nos tratamentos controle e solo compactado (Tabelas 6, 7 e 8). O SSI é um dos índices mais úteis na seleção de genótipos tolerantes, e pode ser explorado em programas de melhoramento visando à estabilidade do rendimento da soja sob estresse abiótico (Grzesiak et al., 2019, 2021).

Os genótipos que toleraram a compactação não necessariamente foram aqueles que mais produziram em termos de quantidade, mas que apresentaram menores alterações na taxa de crescimento relativo, na taxa de crescimento absoluto, na altura final, no número de vagens e na produção de grãos (Figura 2). Estas características devem ser exploradas, pois podem estar relacionadas com a plasticidade do sistema radicular para mitigar os efeitos da impedância mecânica, permitindo maior penetrabilidade e exploração de recursos pela planta (Correa et al., 2019). Novos estudos devem se concentrar na compreensão dos mecanismos envolvidos na plasticidade fenotípica em resposta à compactação do solo. O desafio no desenvolvimento de genótipos adaptados consiste em entender as interações entre os fatores genéticos e as propriedades do solo, a expressão de genes que regulam o crescimento da soja e os efeitos de outros estresses ambientais.

CONCLUSÕES

A compactação do solo, nas condições apresentadas neste estudo, proporciona maior emergência de plântulas e crescimento vegetativo, mas perdas significativas na produtividade da soja.

Genótipos tolerantes ao estresse apresentam menores reduções na taxa de crescimento relativo, taxa de crescimento absoluto, altura final, número de vagens e rendimento de grãos.

REFERÊNCIAS

- Alameda, D., & Villar, R. (2009). Moderate soil compaction: Implications on growth and architecture in seedlings of 17 woody plant species. *Soil and Tillage Research*, 103 (2), 325–331. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.029>
- Atkinson, B. S., Sparkes, D. L., & Mooney, S. J. (2009). Effect of seedbed cultivation and soil macrostructure on the establishment of winter wheat (*Triticum aestivum*). *Soil and Tillage Research*, 103 (2), 291–301. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.027>
- Bakken, L. R., Børresen, T., & Njøs, A. (1987). Effect of soil compaction by tractor traffic on soil structure, denitrification, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Science*, 38 (3), 541–552. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1987.tb02289.x>
- Bassett, I. E., Simcock, R. C., & Mitchell, N. D. (2005). Consequences of soil compaction for seedling establishment: Implications for natural regeneration and restoration. *Austral Ecology*, 30 (8), 827–833. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2005.01525.x>
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management - A review. *Soil Use and Management*, 25 (4), 335–345. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>
- Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62 (1), 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>
- Brestic, M., Yang, X., Li, X., & Allakhverdiev, S. I. (2021). Crop photosynthesis for the twenty-first century. *Photosynthesis Research*, 150 (1–3), 1–3. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00869-5>
- Castagnara, D. D., Zoz, T., Castro, A. M. C. e, Zoz, A., & Oliveira, P. S. R. de. (2013). Crescimento de *Stylosanthes* cv. Campo Grande em diferentes níveis de densidade de um Latossolo Vermelho. *Revista Ciência Agronômica*, 44 (2), 260–266. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000200007>
- Chen, G., Weil, R. R., & Hill, R. L. (2014). Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil and Tillage Research*, 136, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004>
- Chen, Y. L., Palta, J., Clements, J., Buirchell, B., Siddique, K. H. M., & Rengel, Z. (2014). Root architecture alteration of narrow-leafed lupin and wheat in response to soil compaction.

Field Crops Research, 165, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.007>

Colombi, T., Torres, L. C., Walter, A., & Keller, T. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. *Science of the Total Environment*, 626, 1026–1035. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>

Correa, J., Postma, J. A., Watt, M., & Wojciechowski, T. (2019). Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Journal of Experimental Botany*, 70 (21), 6019–6034. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz383>

Dolferus, R. (2014). To grow or not to grow: A stressful decision for plants. *Plant Science*, 229, 247–261. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.10.002>

Doorenbos, J., & Kassam, A. (1986). *Yield response to water*. (Food and Agriculture Organization of the United Nations., Ed.) (FAO irriga).

Embrapa, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2021). *Brazil is the world's fourth largest grain producer and top beef exporter, study shows*. Disponível em: <<https://www.embrapa.br>>. Acessado em: 01 de maio de 2022.

Falkoski Filho, J., Batista, I., & Rosolem, C. A. (2013). Sensitivity of cotton cultivars to soil compaction. *Semina: Ciências Agrárias*, 34 (6Supl1), 3645. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6Supl1p3645>

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). Countries by commodity. https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity

Fischer, R., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29 (5), 897. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>

Fried, H. G., Narayanan, S., & Fallen, B. (2018). Characterization of a soybean (*Glycine max* L. Merr.) germplasm collection for root traits. *PloS One*, 13 (7), e0200463. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200463>

Galambošová, J., Macák, M., Rataj, V., Antille, D. L., Godwin, R. J., Chamen, W. C. T., Žitnák, M., Vitázková, B., Dudák, J., Chlpík, J. (2017). Field evaluation of controlled traffic farming in central europe using commercially available machinery. *Transactions of the ASABE*, 60 (3), 657–669. <https://doi.org/10.13031/trans.11833>

- Giordani, W., Gonçalves, L.S.A., Moraes, L.A.C., Ferreira, L.C., Neumaier, N., Farias, J.R.B., Nepomuceno, A.L., Oliveira, M.C.N., Henning, L.M.M. (2019). Identification of agronomical and morphological traits contributing to drought stress tolerance in soybean. *Australian Journal Crop Science*, 13 (01), 35–44. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.01.p1109>.
- Golbashy, M., Ebrahimi, M., Khorasani, S. K., & Choukan, R. (2010). Evaluation of drought tolerance of some corn (*Zea mays* L.) hybrids in Iran. *African Journal of Agricultural Research*, 5, 2714–2719.
- Grzesiak, M. T., Szczyrek, P., Rut, G., Ostrowska, A., Hura, K., Rzepka, A., Hura, T., Grzesiak, S. (2015). Interspecific differences in tolerance to soil compaction, drought and waterlogging stresses among maize and triticale genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201 (5), 330–343. <https://doi.org/10.1111/jac.12104>
- Grzesiak, Maciej T., Hordyńska, N., Maksymowicz, A., Grzesiak, S., & Szechyńska-Hebda, M. (2019). Variation among spring wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes in response to the drought stress. II—Root system structure. *Plants*, 8 (12), 584. <https://doi.org/10.3390/plants8120584>
- Grzesiak, Maciej T., Maksymowicz, A., Jurczyk, B., Hura, T., Rut, G., Rzepka, A., & Grzesiak, S. (2021). Selection approaches to the variation of responses to soil compaction stress among maize hybrids (*Zea mays* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207 (3), 544–556. <https://doi.org/10.1111/jac.12491>
- Grzesiak, Maciej T., Ostrowska, A., Hura, K., Rut, G., Janowiak, F., Rzepka, A., Hura, T., Grzesiak, S. (2014). Interspecific differences in root architecture among maize and triticale genotypes grown under drought, waterlogging and soil compaction. *Acta Physiologiae Plantarum*, 36 (12), 3249–3261. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1691-9>
- Guimarães, C. V., Assis, R. L. de, Simon, G. A., Pires, F. R., Ferreira, R. L., & Santos, D. C. dos. (2013). Desempenho de cultivares e híbridos de milho em solo submetido a compactação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17 (11), 1188–1194. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001100009>
- Hernandez-Ramirez, G., Lawrence-Smith, E. J., Sinton, S. M., Tabley, F., Schwen, A., Beare, M. H., & Brown, H. E. (2014). Root responses to alterations in macroporosity and penetrability in a silt loam soil. *Soil Science Society of America Journal*, 78 (4), 1392. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.01.0005>

- Hoque, M., & Kobata, T. (2000). Effect of soil compaction on the grain yield of rice (*Oryza sativa* L.) under water-deficit stress during the reproductive stage. *Plant Production Science*, 3 (3), 316–322. <https://doi.org/10.1626/pp.s.3.316>
- Jin, K., Shen, J., Ashton, R. W., Dodd, I. C., Parry, M. A. J., & Whalley, W. R. (2013). How do roots elongate in a structured soil? *Journal of Experimental Botany*, 64 (15), 4761–4777. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert286>
- Kolb, E., Legué, V., & Bogeat-Triboulot, M.-B. (2017). Physical root–soil interactions. *Physical Biology*, 14 (6), 065004. <https://doi.org/10.1088/1478-3975/aa90dd>
- Kuncoro, P. H., Koga, K., Satta, N., & Muto, Y. (2014a). A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. *Soil and Tillage Research*, 143, 180–187. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2014.01.008>
- Kuncoro, P. H., Koga, K., Satta, N., & Muto, Y. (2014b). A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 143, 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.006>
- Millington, W. A. J., Misiewicz, P. A., Dickin, E. T., White, D. R., & Godwin, R. J. (2016). An investigation into the effect of soil compaction and tillage on plant growth and yield of winter barley (*Hordeum vulgare* L.). In *2016 ASABE International Meeting* (pp. 1–12). American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/aim.20162461725>
- Modolo, A. J., Fernandes, H. C., Schaefer, C. E. G., & Silveira, J. C. M. da. (2008). Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. *Ciência e Agrotecnologia*, 32 (4), 1259–1265. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000400034>
- Mohammadi, R., Golkari, S. (2022). Genetic resources for enhancing drought tolerance from a mini-core collection of spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Scientiarum Agronomy*, 44, e56129. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.56129>.
- Moraes, M. T. de, Debiasi, H., Carlesso, R., Franchini, J. C., & Silva, V. R. da. (2014). Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 38 (1), 288–298. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>
- Müller, M. M. L., Ceccon, G., & Rosolem, C. A. (2001). Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de

inverno. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 25 (3), 531–538.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300002>

Nawaz, M. F., Bourrié, G., & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33 (2), 291–309.
<https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>

Negin, B., & Moshelion, M. (2016). The advantages of functional phenotyping in pre-field screening for drought-tolerant crops. *Functional Plant Biology*, 44 (1), 107.
<https://doi.org/10.1071/FP16156>

Nosalewicz, A., & Lipiec, J. (2014). The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat. *Plant and Soil*, 375 (1–2), 229–240.
<https://doi.org/10.1007/s11104-013-1961-0>

Oliveira Junior, A., Castro, C., Pereira, L. R., Domingos, C. S. (2016). Estádios fenológicos e marcha de absorção de nutrientes da soja. Londrina: Embrapa Soja.
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/144440/1/FOR-Quadro-ESTADIO-SOJA-FINAL.pdf>

Ozcoban, M. S., Cetinkaya, N., Celik, S. O., Demirkol, G. T., Cansiz, V., & Tufekci, N. (2013). Hydraulic conductivity and removal rate of compacted clays permeated with landfill leachate. *Desalination and Water Treatment*, 51 (31–33), 6148–6157.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2013.769662>

Pierce, F. J., Larson, W. E., Dowdy, R. H., Graham, W. A. P. (1983). Productivity of soils: assessing long-term changes due to erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 38, 39–44.

Pierik, R., Wit, M., & Voeselek, L. A. C. J. (2011). Growth-mediated stress escape: Convergence of signal transduction pathways activated upon exposure to two different environmental stresses. *New Phytologist*, 189(1), 122–134. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03458.x>

Purwaningrahayu, R.D., Sebayang, H.T., Syekhfani, S., Aini, N. (2015). Resistance level of some soybean (*Glycine max* L. Merr) genotypes toward salinity stress. *Journal of Biological Researches*, 20 (2), 7–14. <https://doi.org/10.23869/bphjbr.20.2.20152>.

R Core Team (2019). (2019). R: A language and environment for statistical computing. R

Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

Rahi, A.R., Zarini, H.N., Ranjbar, G., Spanlou, M.G. 2019. Evaluation of tolerance of some soybean genotypes to drought stress. *Journal of Crop Breeding*, 11(32), 100–115. <https://doi.org/10.29252/jcb.11.32.100>.

Raines, C. A. (2011). Increasing photosynthetic carbon assimilation in C3 plants to improve crop yield: Current and future strategies. *Plant Physiology*, 155 (1), 36–42. <https://doi.org/10.1104/pp.110.168559>

Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R., & Håkansson, I. (2009). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102 (2), 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>

Ribeiro, A. C; Guimarães, P.T.G.; Alvarez V. A, H. (1999). *Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Mina Gerais – 5º aproximação*. Viçosa.

Kulkarni, S. S., Bajwa, S. G., & Huitink, G. (2010). Investigation of the effects of soil compaction in cotton. *Transactions of the ASABE*, 53 (3), 667–674. <https://doi.org/10.13031/2013.30058>

Sarto, M. V. M., Bassegio, D., Rosolem, C. A., Sarto, J. R. W., Sarto, M. V. M., Bassegio, D., Rosolem, C. A., Sarto, J. R. W. (2018). Safflower root and shoot growth affected by soil compaction. *Bragantia*, 77 (2), 348–355. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017191>

Shaheb, M. R. (2020). *A study on the effect of tyre inflation pressure on soil properties, growth and yield of maize and soybean in Central Illinois*. Harper Adams University.

Shaheb, Md Rayhan, Grift, T. E., Godwin, R. J., Dickin, E., White, D. R., & Misiewicz, P. A. (2018). Effect of tire inflation pressure on soil properties and yield in a corn - soybean rotation for three tillage systems in the Midwestern United States. In *2018 Detroit, Michigan July 29 - August 1, 2018*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/aim.201801834>

Shaheb, Md Rayhan, Venkatesh, R., & Shearer, S. A. (2021). A Review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*, 46 (4), 417–439. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>

Sidhu, D., & Duiker, S. W. (2006). Soil compaction in conservation tillage: crop impacts.

- Agronomy Journal*, 98 (5), 1257–1264. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0070>
- Simkin, A. J., López-Calcano, P. E., & Raines, C. A. (2019). Feeding the world: Improving photosynthetic efficiency for sustainable crop production. *Journal of Experimental Botany*, 70(4), 1119–1140. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery445>
- Sivarajan, S., Maharlooei, M., Bajwa, S. G., & Nowatzki, J. (2018). Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil and Tillage Research*, 175, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.001>
- Soyelu, L. O., Ajayi, S. A., Aluko, O. B., & Fakorede, M. A. B. (2001). Varietal differences in development of maize (*Zea mays* L.) seedlings on compacted soils. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186 (3), 157–166. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2001.00467.x>
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise de solo. Brasília: EMBRAPA, 573p.
- Tolon-Becerra, A., Tourn, M., Botta, G. F., & Lastra-Bravo, X. (2011). Effects of different tillage regimes on soil compaction, maize (*Zea mays* L.) seedling emergence and yields in the eastern Argentinean Pampas region. *Soil and Tillage Research*, 117, 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.003>
- Tracy, S. R., Black, C. R., Roberts, J. A., & Mooney, S. J. (2011). Soil compaction: A review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91 (9), 1528–1537. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4424>
- Trükmann, K., Reintam, E., Kuht, J., Nugis, E., & Edesi, L. Effect of soil compaction on growth of narrow-leaved lupine , oilseed rape and spring barley on sandy loam soil. *Agronomy Research*, 6 (1), 101–108. Retrieved from <http://www.eau.ee/~agronomy/vol061/p6110.pdf>
- Universidade Federal de Viçosa – UFV. (2022). *Boletim meteorológico 2022*. Viçosa, MG: UFV.
- Valentine, T. A., Hallett, P. D., Binnie, K., Young, M. W., Squire, G. R., Hawes, C., & Bengough, A. G. (2012). Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. *Annals of Botany*, 110 (2), 259–270. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs118>
- Winter, S. R., Musick, J. T., & Porter, K. B. (1988). Evaluation of screening techniques for breeding drought-resistance winter wheat. *Crop Science*, 28 (3), 512–516.

<https://doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183X002800030018x>

Wu, X., Tang, Y., Li, C., McHugh, A. D., Li, Z., & Wu, C. (2018). Individual and combined effects of soil waterlogging and compaction on physiological characteristics of wheat in southwestern China. *Field Crops Research*, 215, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.10.016>

Yahoueiian, S., Behamta, M., Babaie, H., Mohammadibazargani, M. (2018). Screening of drought-tolerant and sensitive genotypes in soybean (*Glycine max* L.) using different multivariate methods. *International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology*, 7 (2), 7–17. <https://doi.org/10.3329/ijarit.v7i2.35316>.

Zhou, Y., Chen, M., Guo, J., Wang, Y., Min, D., Jiang, Q., Ji, H., Huang, C., Wei, W., Xu, H., Chen, X., Li, L., Xu, Z., Cheng, X., Wang, C., Wang, C., Ma, Y. (2020). Overexpression of soybean DREB1 enhances drought stress tolerance of transgenic wheat in the field (G Rebetzke, Ed.). *Journal of Experimental Botany*, 71 (6), 1842–1857. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz569>.

DESEMPENHO DE PLÂNTULAS E RENDIMENTO DE GENÓTIPOS DE SOJA SOB COMPACTAÇÃO DO SOLO

RESUMO

A identificação de genótipos de soja tolerantes à compactação do solo pode aumentar a produtividade em condições de estresse. Assim, objetivou-se avaliar a suscetibilidade de genótipos de soja à compactação em casa de vegetação e campo; verificar quais características das plântulas sob elevada resistência à penetração de raízes apresentam correlação com a produção da cultura em solo compactado; e validar o método de impedância mecânica do substrato para avaliação da suscetibilidade de genótipos de plantas à compactação do solo. Sementes dos 20 genótipos foram semeadas em sistema de impedância mecânica do substrato sob condições controladas. As características avaliadas foram comprimento total de raiz, área superficial total de raiz, diâmetro médio radicular, volume total de raiz, comprimento da raiz principal, comprimento da parte aérea, matéria seca de raiz e matéria seca da parte aérea das plântulas. No experimento de campo, metade da área de plantio foi compactada, constituindo-se dois tratamentos, solo com e sem compactação. Foi determinada a porcentagem de emergência de plântulas, altura inicial da planta, diâmetro da haste, número de nós, comprimento de entrenó, número de ramos laterais, matéria seca da parte aérea, altura final da planta, taxa de crescimento absoluto e relativo, número de vagens, peso de 100 sementes e produção de grãos. Além disso, o número de dias entre a semeadura da soja até o florescimento das plantas e a colheita dos grãos foi registrado de acordo com o genótipo e nível de compactação do solo. Em ambiente controlado, genótipos tolerantes à compactação do solo apresentam maior plasticidade de características radiculares e menores alterações na parte aérea de plântulas. No campo, esses genótipos apresentam menores reduções na taxa de crescimento, na altura, no número de vagens e na produção de grãos. A matéria seca da parte aérea e a matéria seca da raiz de plântulas de soja em sistema de impedância mecânica apresenta correlação positiva e negativa, respectivamente, com o rendimento da soja em solo compactado, indicando que a suscetibilidade geneticamente determinada ao estresse de compactação do solo foi semelhante ao longo da ontogênese. O sistema de impedância mecânica do substrato, utilizado para avaliar o desempenho de plântulas de soja sob estresse, é eficiente para a classificação de genótipos de plantas tolerantes à compactação do solo.

Palavras-chave: Raiz. Parte aérea. Impedância mecânica. Plasticidade fenotípica. Suscetibilidade. Estresse.

ABSTRACT

The identification of soybean genotypes tolerant to soil compaction can increase productivity under stress conditions. Thus, the objective was to evaluate the susceptibility of soybean genotypes to compaction in greenhouse and field conditions; verify which characteristics of seedlings under high resistance to root penetration are correlated with crop production in compacted soil; and to validate the substrate mechanical impedance method for evaluating the susceptibility of plant genotypes to soil compaction. Seeds of the 20 genotypes were sown in a substrate mechanical impedance system under controlled conditions. The characteristics evaluated were total root length, total root surface area, mean root diameter, total root volume, taproot length, shoot length, root dry matter and seedling shoot dry matter. In the field experiment, half of the planting area was compacted, constituting two treatments, soil with and without compaction. The percentage of seedling emergence, initial plant height, stem diameter, number of nodes, internode length, number of lateral branches, shoot dry matter, final plant height, absolute and relative growth rate, number of pods, weight of 100 seeds and grain yield. In addition, the number of days between soybean sowing until plant flowering and grain harvest was recorded according to genotype and soil compaction level. In a controlled environment, genotypes tolerant to soil compaction show greater plasticity of root characteristics and smaller alterations in the aerial part of seedlings. In the field, these genotypes show smaller reductions in growth rate, height, number of pods and grain yield. The shoot dry matter and the root dry matter of soybean seedlings in a mechanical impedance system present a positive and negative correlation, respectively, with soybean yield in compacted soil, indicating that the genetically determined susceptibility to soil compaction stress was similar throughout ontogenesis. The substrate mechanical impedance system, used to evaluate the performance of soybean seedlings under stress, is efficient for the classification of plant genotypes tolerant to soil compaction.

Keywords: Root. Shoot. Mechanical impedance. Phenotypic plasticity. Susceptibility. Stress.

INTRODUÇÃO

A compactação do solo é um problema frequente em sistema de plantio convencional e sistema de plantio direto, decorrente do intenso trânsito de máquinas agrícolas pesadas nas áreas de cultivo. A camada compactada pode ser superficial ou subsuperficial, geralmente localizada de 7 a 20 cm de profundidade, que coincide com a zona de maior crescimento radicular das plantas (Nunes et al., 2015). Assim, o aumento da resistência à penetração implica em menor exploração de volume de solo pelas raízes. A absorção de água e nutrientes é limitada devido às mudanças na estrutura do solo, principalmente na porosidade total, podendo reduzir a emergência de plântulas, além de afetar o crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas (Millington et al., 2016; Colombi & Keller, 2019; Shaheb, 2020; Shaheb et al., 2021).

A soja tem sido cultivada em várias áreas com presença de solo compactado, resultando em perdas substanciais de rendimento (Sidhu & Duiker, 2006; Botta et al., 2010; Shaheb et al., 2018; Sivarajan et al., 2018; Shaheb, 2020; Moraes et al., 2020). A produtividade das plantas está diretamente relacionada com a distribuição e arquitetura do sistema radicular em resposta às propriedades biofísico-químicas do solo, as quais variam de acordo com o genótipo e as condições do ambiente (Correa et al., 2019; Moraes et al., 2020). Os processos envolvem modificações como extensão das pontas das raízes, formação de raízes laterais e os tropismos ou curvaturas (Rogers & Benfey, 2015). Dessa forma, a plasticidade radicular tem a função de conferir tolerância à compactação do solo e o grau de suscetibilidade ao estresse é determinado por genes da planta.

No entanto, o estudo da variabilidade genética para plasticidade do sistema radicular é pouco compreendido e existem poucas informações sobre as alterações que ocorrem durante o crescimento da soja em solos compactados, principalmente devido à associação com outros estresses ambientais (Grzesiak et al., 2015).

A identificação de mecanismos adaptativos durante a emergência de plântulas pode indicar o grau de suscetibilidade ao estresse de compactação do solo em genótipos de soja, como foi verificado nos trabalhos de Grzesiak et al. (2021, 2022) entre híbridos de milho. A relação entre a plasticidade fenotípica de plântulas sob impedância mecânica e as características de rendimento da cultura (que integra os indicadores de aptidão agrícola) sob compactação do solo, são importantes para selecionar precocemente materiais tolerantes e acelerar o processo de desenvolvimento de novos genótipos bem adaptados, com estabilidade e/ou reduções mínimas na produção de grãos.

Portanto, os objetivos do trabalho foram avaliar a suscetibilidade de genótipos de soja à compactação em casa de vegetação e campo, relacionando o desempenho de plântulas com o rendimento da cultura em solo compactado; verificar quais características das plântulas sob elevada resistência à penetração de raízes apresentam correlação com a produção da cultura em solo compactado; e validar o método de impedância mecânica do substrato para avaliação da suscetibilidade de genótipos de plantas à compactação do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Materiais vegetais

Nos experimentos foram utilizados 20 genótipos de soja selecionados de acordo com informações de desempenho em campo, obtidas de empresa de melhoramento genético. Quatorze genótipos pertenciam ao grupo de maturação precoce ($5.5 < \text{GMR} < 6.7$) e seis pertenciam ao grupo de maturação tardia ($7.9 < \text{GMR} < 8.6$), conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Lista de genótipos de soja avaliados.

ID	GMR	Densidade de semeadura (sementes m ⁻¹)	Região de adaptação
1	5.5	20	Sul
2	5.6	20	Sul
3	5.7	20	Sul
4	5.8	20	Sul
5	5.8	20	Sul
6	5.9	20	Sul
7	5.9	20	Sul
8	6.1	20	Sul
9	6.1	20	Sul
10	6.1	20	Sul
11	6.3	20	Sul
12	6.4	20	Sul
13	6.6	16	Sul
14	6.7	16	Sul
15	7.9	12	Cerrado
16	8.0	12	Cerrado
17	8.2	12	Cerrado
18	8.3	12	Cerrado
19	8.4	12	Cerrado
20	8.6	12	Cerrado

Abreviatura: ID, identificação; GMR, grupo de maturidade relativa.

Detalhes experimentais

O *screening* de 20 genótipos de soja quanto a sensibilidade à compactação do solo foi realizada em experimento em casa de vegetação e em campo. O experimento em casa de vegetação foi conduzido sob condições controladas, com temperatura média de $25 \text{ }^\circ \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. A semeadura foi realizada em sistema de impedância mecânica desenvolvido por Capobianco et al. (2022), baseado na compressão da areia para aumento da resistência à penetração das raízes (Figura 1). Assim, foram utilizadas bandejas plásticas (515 x 300 x 95 mm) e colunas de PVC no interior de cada recipiente (200 mm de diâmetro e altura), ambas preenchidas com areia com granulometria padronizada ($> 1 \text{ mm} = 20\%$; $1-0,5 \text{ mm} = 39\%$ e $< 0,5 \text{ mm} = 41\%$). Na parte inferior dos canos foi colocado um tecido telado (organza) para impedir o vazamento do substrato. Nas bandejas foi adicionado água até a saturação da areia, permitindo o umedecimento por capilaridade dentro dos canos. Na parte superior de cada cano foi colocado um disco metálico perfurado (190 mm de diâmetro com 25 orifícios), e em seu centro foi disposto um bloco de peso conhecido (26 kg) para simular a compactação do substrato. Após sete dias o sistema foi desmontado e as plântulas foram retiradas para avaliação do crescimento.

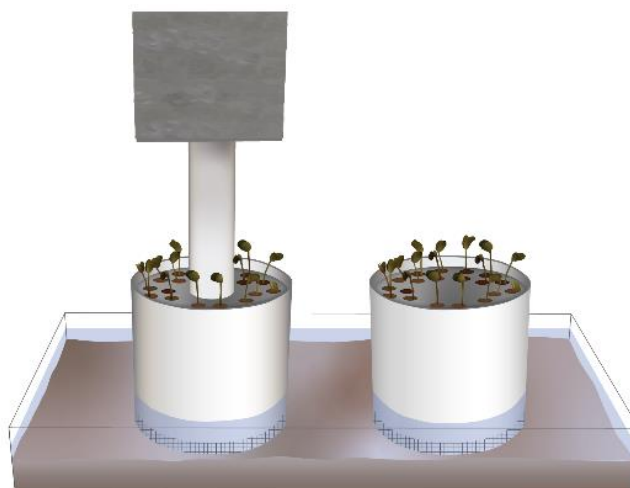


Figura 1. Sistema utilizado na caracterização do sistema radicular de plântulas de soja (Capobianco, et al., 2022).

O experimento em campo foi realizado na unidade experimental Diogo Alves de Melo, do Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG ($20^\circ 45' 14''\text{S}$, $42^\circ 52' 54''\text{W}$, 650 m de altitude), durante o período de 1º de dezembro de 2020 a 28 de abril de 2021. O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, de

textura muito argilosa (847 g kg^{-1} de argila, 8 g kg^{-1} de silte e 145 g kg^{-1} de areia). Antes da compactação, a área foi preparada com aração e gradagem, e adubada em área total conforme as exigências para a cultura da soja. Em seguida, metade da área foi compactada com quatro passadas do trator John Deere 5600, 4 x 2 com TDA (tração dianteira auxiliar), massa total de 3.835 kg (variante compactada), e a outra metade não foi compactada (variante solta). As sementes de todos os genótipos foram pré-tratadas com fungicida Derosal[®], de acordo com as recomendações do fabricante, e semeadas manualmente na profundidade de cerca de 5 cm. Os 20 genótipos de soja foram examinados durante 5 meses (do plantio a colheita) em dois níveis de compactação do solo (H - alto e L - baixo), e os dados meteorológicos (temperaturas máxima e mínima, umidade relativa do ar e precipitação) foram monitorados continuamente pela Estação Climatológica Principal de Viçosa (Universidade Federal de Viçosa, 2022).

Níveis de impedância mecânica (MPa)

No experimento em casa de vegetação, os valores de resistência à penetração das raízes foram mensurados pelo penetrômetro de bancada automatizado – TE-096 da marca Tecnal[®], com haste de 4 mm de diâmetro, 100 mm de comprimento e velocidade de 0,2 mm/s. No experimento em campo, a impedância mecânica do solo foi medida usando o penetrômetro de impacto modelo Stolf (massa de impacto de 4 kg), com área da base do cone de $1,29 \text{ cm}^2$ até a profundidade de 50 cm. As medidas foram realizadas em seis pontos das áreas compactada e não compactada, logo após a semeadura (dezembro) e na fase de florescimento da cultura (fevereiro). Além disso, a densidade do solo foi determinada no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Viçosa. Quatro amostras de solo foram coletadas de cada área na profundidade entre 5 e 15 cm, pelo método do anel volumétrico (anel de aço de Kopecky de bordas cortantes) com dimensões previamente conhecidas. Essa amostragem foi realizada em pontos equidistantes dois dias após uma chuva de 36 mm, e o solo foi considerado com umidade próximo da capacidade de campo.

As alterações na resistência à penetração das raízes, observadas nos experimentos em casa de vegetação e campo estão apresentadas nas Figuras 2 e 3, respectivamente. O valor máximo atingido no experimento 1 foi de 0,87 e 0,15 MPa nos tratamentos com e sem compactação, respectivamente. No experimento 2, a densidade do solo foi de $1,16 \text{ g cm}^{-3}$ no controle e $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ no compactado, e os níveis de resistência à penetração variaram de acordo com as condições climáticas (Apêndice 1). A precipitação total foi de 198 mm em dezembro de 2020 e 4 mm em fevereiro de 2021. Assim, a resistência à penetração variou de 0,74 a 1,72

Mpa, no tratamento controle, e 1,38 a 2,09 Mpa, no tratamento com compactação, em dezembro. Enquanto essa variação em fevereiro foi de 1,27 a 3,10, no tratamento controle, e 2,01 a 3,39 Mpa, no tratamento com compactação. Em ambas as avaliações, as maiores diferenças entre os tratamentos foram observadas na profundidade de 0 a 15 cm.

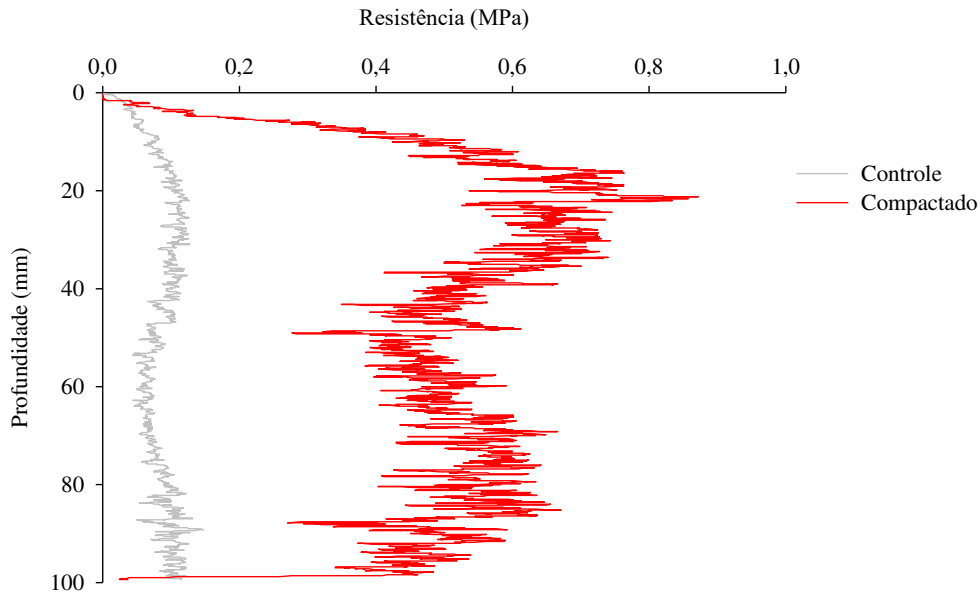


Figura 2. Resistência à penetração (MPa) para os tratamentos controle e compactado no experimento em casa de vegetação, avaliada na camada de 0,0 a 100,0 mm de profundidade.

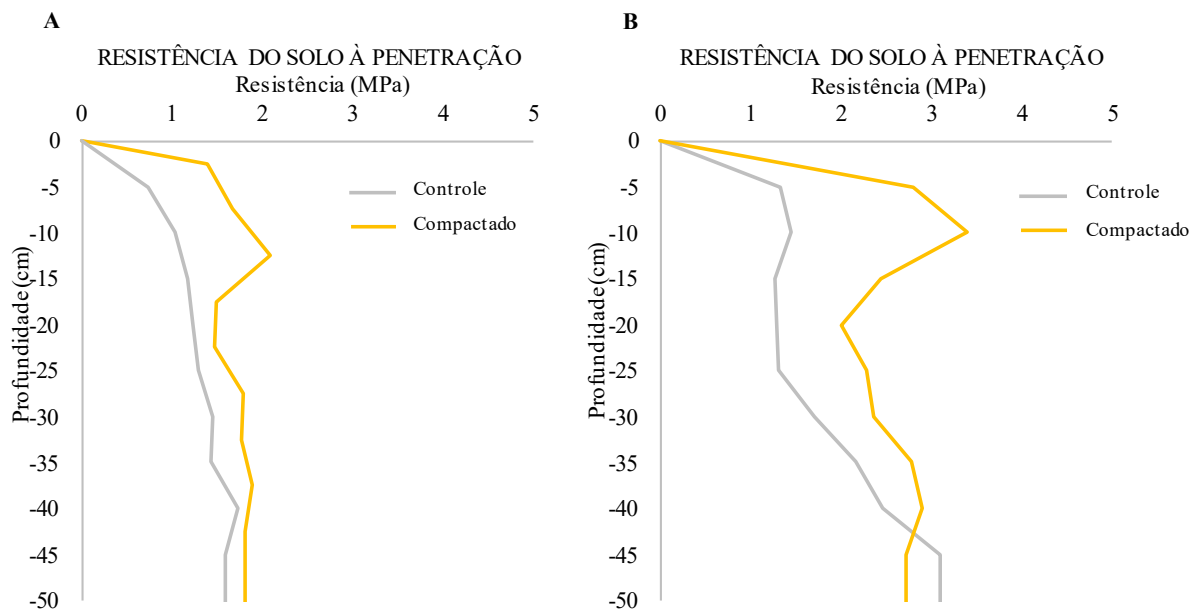


Figura 3. Resistência do solo à penetração (MPa) para os tratamentos controle e compactado no experimento em campo, em dezembro de 2020 (A) e fevereiro de 2021 (B), avaliada na camada de 0,0 a 0,50 m de profundidade.

Avaliações

No experimento em casa de vegetação, para cada genótipo foi avaliado uma amostra de 5 plântulas por repetição nos tratamentos com e sem compactação. A morfologia e arquitetura do sistema radicular foram avaliadas por meio de imagens, utilizando-se o software WinRhizo[®] Pro 2007 (Régent Instr. Inc.), acoplado a um escâner profissional Epson XL 10000 equipado com unidade de luz adicional (TPU) e definição de 600 dpi (Bauhus & Messier, 1999). As raízes foram dispostas em uma cuba de acrílico (30 x 40 cm) contendo 800 mL de água. As características avaliadas foram comprimento total de raiz, área superficial total de raiz, diâmetro médio radicular e volume total de raiz. Já o comprimento da raiz principal e da parte aérea das plântulas foram mensurados utilizando-se o software ImageJ[®], com base na análise de imagens provenientes de câmera digital com resolução de 16 MP. Para determinação da matéria seca, as raízes e a parte aérea das plântulas foram acondicionadas em sacos de papel na estufa com circulação de ar a 65 °C por 72 horas.

As avaliações realizadas no experimento em campo consistiram na determinação da porcentagem de emergência de plântulas, quinze dias após a semeadura da soja (estádio vegetativo -VE); medições de altura inicial da planta, diâmetro da haste, número de nós, comprimento de entrenó, número de ramos laterais e matéria seca da parte aérea, realizadas no estágio de desenvolvimento R1 (início do florescimento); e de altura final da planta, taxa de crescimento absoluto e relativo, número de vagens, peso de 100 sementes e produção de grãos por planta, realizadas no estágio de desenvolvimento R8 (maturação plena). O número de dias entre a semeadura da soja até o florescimento das plantas e a colheita dos grãos foi registrado de acordo com o genótipo e nível de compactação do solo. As avaliações foram realizadas em cinco plantas centrais das parcelas. As extremidades foram consideradas bordaduras (cada parcela tinha 2 m de comprimento e 0,5 m de espaçamento).

Índice de suscetibilidade à compactação do solo

O índice de suscetibilidade ao estresse (*Stress Susceptibility Index* - SSI) e o índice de mudança relativa de característica (*Relative Trait Change* - RTC) foram calculados com base na matéria seca da parte aérea de plântulas, avaliada no experimento em casa de vegetação, e na produção de grãos por planta, avaliada no experimento conduzido em campo, conforme as equações abaixo (Fischer & Maurer, 1978; Doorenbos & Kassam, 1986; Winter et al., 1988; Golbashy et al., 2010).

$$SSI_i = \frac{(1 - (GY_i^{CP} \text{ ou } DM_i^{CP} / GY_i^{NC} \text{ ou } DM_i^{NC}))}{(1 - (\bar{x}GY_i^{CP} \text{ ou } \bar{x}DM_i^{CP} / \bar{x}GY_i^{NC} \text{ ou } \bar{x}DM_i^{NC}))} \quad (1)$$

Em que: *i* representa o *i*-ésimo genótipo; *GY* (*grain yield*) corresponde à produtividade de grãos; *DM* (*dry matter*) corresponde à matéria seca da parte aérea; os índices CP e NC indicam o tratamento compactado e não compactado, respectivamente; e \bar{x} indica a média da produtividade de grãos (*GY*) ou da matéria seca da parte aérea (*DM*) de todos os genótipos examinados.

$$RTC_i = \frac{(L-H)}{L} \quad (2)$$

Em que: *L* (*low*) e *H* (*high*) representam nível baixo e alto de compactação do solo, respectivamente.

Análise estatística

Ambos os experimentos foram conduzidos no delineamento de blocos casualizados, em arranjo fatorial 2 × 20 (dois níveis de resistência à penetração e vinte genótipos de soja), com quatro (experimento em casa de vegetação) e três (experimento em campo) repetições, com parcelas em faixas no experimento conduzido em campo. A análise de variância dos dados (ANOVA) foi realizada por meio do software R 3.6.0 (R Core Team (2019)). As médias obtidas para os genótipos foram agrupadas por meio do teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). Os dados foram submetidos à análise de correlação linear de Pearson (*r*), na qual a significância dos valores de *r* foi determinada pelo teste *t* ($p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$ e $p \leq 0,001$). Análise de componentes principais foi utilizada para classificar os genótipos quanto ao desempenho em campo e à suscetibilidade ao estresse de compactação do solo.

RESULTADOS

Desempenho de genótipos de soja em casa de vegetação e campo

Nos experimentos realizados em casa de vegetação e em campo não houve interação significativa entre os genótipos e os níveis de compactação (Tabelas 2 e 3). No experimento realizado em casa de vegetação, foram avaliados os efeitos da impedância mecânica do substrato no crescimento inicial de plântulas de soja (Tabela 2). Em todos os genótipos, o aumento do nível de resistência à penetração provocou redução no comprimento total de raiz (44,4%), área superficial total de raiz (34,1%), volume total de raiz (20,6%), comprimento da raiz principal (32,8%), comprimento de plântula (21,3%) e matéria seca de plântula (13,0%). Além disso, houve aumento no diâmetro médio radicular (18,5%) e a na matéria seca de parte

aérea das plântulas (4,1%). Entre os genótipos foi observada diferença significativa para algumas características avaliadas. No caso, os genótipos 1, 2, 3, 4, 6, 8, 13, 15 e 18 se destacaram pelo maior diâmetro radicular, os genótipos 1, 2, 3, 6, 8, 10, 11, 14, 15 e 17 pelo maior crescimento radicular e os genótipos 2, 7, 8, 10, 14, 15 e 17 pelo maior crescimento da parte aérea das plântulas.

Com o experimento conduzido em campo foi possível evidenciar o efeito da compactação do solo no crescimento, desenvolvimento e rendimento da soja (Tabela 3). Com a compactação do solo observou-se o aumento na emergência de plântulas (21,3%), altura inicial (11,4%), número de nós (9,1%) e altura final (6,1%). Porém, houve diminuição da taxa de crescimento relativo (21,4%) e dos componentes de rendimento, como o número de vagens (28,8%) e a produção (25,8%) por planta. Os parâmetros que não sofreram alterações na condição de elevada resistência à penetração do solo foram: diâmetro da haste, número de ramos laterais, comprimento de entrenó, matéria seca da parte aérea, número de dias até o florescimento, taxa de crescimento absoluto, número de dias até a colheita e peso de 100 sementes. Independentemente do nível de compactação do solo, os genótipos 15, 16, 17, 18, 19 e 20 ($7.9 < \text{GMR} < 8.6$) apresentaram maior crescimento e produção.

Tabela 2. Influência dos níveis de impedância mecânica do substrato no comprimento total de raiz (COMP_TOTAL), área superficial total de raiz (AREA), diâmetro médio radicular (DIAM), volume total de raiz (VOL), comprimento da parte aérea (COMP_PA), comprimento da raiz principal (COMP_RZ), comprimento de plântula (COMP_PL), matéria seca de parte aérea da plântula (MSPA_PL), matéria seca de raiz da plântula (MSRZ_PL) e matéria seca de plântula (MSPL) dos genótipos de soja avaliados em casa de vegetação.

Genótipo	COMP_TOTAL (cm)	AREA (cm ²)	DIAM (mm)	VOL (cm ³)	COMP_PA (cm)	COMP_RZ (cm)	COMP_PL (cm)	MSPA_PL (mg)	MSRZ_PL (mg)	MSPL (mg)
1	60,43 a	16,00 a	0,82 a	0,35 a	5,79 b	9,58 b	15,37 b	20,22 d	17,11 a	37,33 b
2	80,21 a	17,48 a	0,76 a	0,32 a	5,71 b	11,31 b	17,02 b	24,78 b	16,49 a	41,27 a
3	84,14 a	18,53 a	0,78 a	0,33 a	6,56 b	13,56 a	20,12 a	20,00 d	15,88 a	35,88 c
4	69,08 a	15,73 a	0,87 a	0,30 b	6,90 a	10,68 b	17,58 b	22,11 c	14,99 b	37,10 b
5	70,78 a	15,32 a	0,71 b	0,27 b	6,78 b	9,73 b	16,51 b	20,58 d	14,48 b	35,06 c
6	84,29 a	18,51 a	0,77 a	0,34 a	7,64 a	12,38 a	20,03 a	21,48 c	15,97 a	37,45 b
7	88,75 a	17,87 a	0,68 b	0,29 b	7,49 a	13,36 a	20,84 a	23,67 b	14,09 b	37,76 b
8	76,27 a	17,64 a	0,82 a	0,33 a	6,88 a	12,08 a	18,97 a	23,50 b	15,61 a	39,11 b
9	82,66 a	16,34 a	0,65 b	0,26 b	6,49 b	12,23 a	18,72 a	19,01 d	12,40 c	31,42 d
10	108,96 a	21,20 a	0,62 b	0,33 a	8,34 a	14,03 a	22,36 a	27,71 a	17,43 a	45,14 a
11	91,88 a	19,07 a	0,69 b	0,33 a	6,42 b	12,72 a	19,15 a	21,93 c	17,03 a	38,95 b
12	87,21 a	16,87 a	0,72 b	0,27 b	7,37 a	12,15 a	19,53 a	19,36 d	12,87 c	32,23 d
13	67,73 a	15,49 a	0,89 a	0,29 b	5,92 b	10,53 b	16,45 b	19,29 d	14,95 b	34,24 c
14	102,22 a	20,43 a	0,71 b	0,34 a	7,22 a	13,65 a	20,87 a	25,34 b	16,63 a	41,97 a
15	86,03 a	19,49 a	0,80 a	0,36 a	7,53 a	12,07 a	19,60 a	25,51 b	18,18 a	43,69 a
16	87,23 a	17,78 a	0,69 b	0,29 b	5,69 b	12,36 a	18,05 b	22,52 c	15,02 b	37,55 b
17	99,92 a	20,18 a	0,68 b	0,33 a	7,34 a	14,23 a	21,57 a	23,57 b	17,89 a	41,46 a
18	80,90 a	17,35 a	0,76 a	0,31 a	6,64 b	10,95 b	17,59 b	22,04 c	14,99 b	37,03 b
19	85,76 a	17,50 a	0,58 b	0,29 b	5,89 b	11,38 b	17,27 b	22,09 c	17,89 a	39,99 b
20	78,58 a	14,74 a	0,68 b	0,23 b	7,73 a	10,88 b	18,61 a	18,43 d	10,76 c	29,20 d
Compactado	59,81 b	14,05 b	0,81 a	0,27 b	6,92 a	9,64 b	16,57 b	22,63 a	14,45 b	37,08 a
Controle	107,49 a	21,31 a	0,66 b	0,34 a	6,71 a	14,34 a	21,05 a	21,69 b	16,61 a	38,30 a
CV (%)	28,89	22,52	17,30	18,39	15,46	23,23	19,36	12,40	14,78	11,55

Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação.

Tabela 3. Influência dos níveis de compactação do solo na emergência (EME), altura inicial (AI), diâmetro da haste (DH), número de ramos laterais (RL), número de nós (NN), comprimento de entrenó (CE), matéria seca da parte aérea (MSPA), dias até o florescimento (DF), altura final (AF), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), dias até a colheita (DC), número de vagens (NV), peso de cem sementes (PCS) e produção (PROD) dos genótipos de soja avaliados em campo.

Genótipo	EME (%)	AI (cm)	DH (mm)	RL	NN	CE (cm)	MSPA (g)	DF (dias)	AF (cm)	TCA (cm/semana)	TCR (cm/cm/semana)	DC (dias)	NV	PCS (g)	PROD (g)
1	73 a	29,37 c	5,39 c	7 d	10 d	3,01 c	5,10 c	42 c	56,67 f	2,77 b	0,0023 c	118 c	32 c	21,06 a	17,15 c
2	76 a	25,13 c	5,24 c	6 d	8 e	3,04 c	3,98 c	42 c	53,75 f	3,00 b	0,0031 b	118 c	26 c	19,52 a	12,82 c
3	78 a	25,40 c	5,37 c	8 c	10 d	2,66 c	4,11 c	42 c	53,96 f	2,86 b	0,0030 c	113 c	33 c	17,54 b	14,24 c
4	80 a	28,33 c	4,91 c	8 d	10 d	2,80 c	5,10 c	42 c	60,38 f	3,12 b	0,0026 c	120 c	36 c	17,84 b	14,53 c
5	80 a	27,27 c	5,13 c	8 d	9 d	2,90 c	3,87 c	42 c	66,00 e	3,67 b	0,0032 b	121 c	45 c	16,26 c	14,30 c
6	80 a	24,97 c	4,74 c	7 d	9 e	2,95 c	3,21 c	42 c	68,71 e	4,24 a	0,0040 a	123 c	44 c	15,52 c	14,76 c
7	74 a	26,90 c	5,52 c	7 d	9 e	3,18 c	3,54 c	42 c	70,29 e	4,05 a	0,0033 b	126 c	31 c	17,74 b	13,09 c
8	81 a	30,87 c	5,22 c	9 c	10 d	3,07 c	5,21 c	42 c	74,71 e	4,23 a	0,0028 c	121 c	49 c	16,27 c	18,84 c
9	76 a	28,17 c	4,67 c	7 d	9 e	3,11 c	4,39 c	42 c	69,92 e	3,67 b	0,0029 c	122 c	41 c	14,85 c	13,42 c
10	77 a	28,10 c	4,72 c	7 d	9 e	3,15 c	3,86 c	42 c	57,42 f	2,94 b	0,0026 c	121 c	25 c	16,91 c	11,16 c
11	71 a	29,93 c	5,26 c	9 c	10 d	3,06 c	3,93 c	42 c	80,54 d	4,56 a	0,0031 b	121 c	38 c	19,08 a	16,02 c
12	68 a	32,03 c	4,82 c	11 c	8 e	3,92 b	2,78 c	41 c	82,67 d	4,33 a	0,0027 c	125 c	63 c	15,43 c	21,72 c
13	72 a	32,93 c	5,15 c	9 c	9 e	3,87 b	3,43 c	46 c	77,25 d	4,16 a	0,0024 b	125 c	41 c	17,80 b	18,02 c
14	77 a	29,27 c	4,78 c	8 c	9 e	3,22 c	3,41 c	42 c	73,21 e	4,63 a	0,0033 b	119 c	45 c	17,85 b	18,18 c
15	61 a	41,93 b	6,95 b	15 b	12 c	3,64 b	8,34 b	60 b	98,21 c	4,33 a	0,0016 d	136 b	121 b	18,35 b	35,07 b
16	51 a	43,10 b	7,54 b	14 b	11 d	3,96 b	10,48 b	60 b	101,63 c	4,31 a	0,0015 d	143 a	92 b	15,90 c	33,61 b
17	62 a	40,73 b	8,20 a	14 b	13 b	3,20 c	13,58 b	62 a	113,33 b	4,77 a	0,0017 d	148 a	103 b	18,19 b	37,05 b
18	69 a	43,23 b	8,03 a	16 b	14 b	3,20 c	12,52 b	57 b	108,00 b	4,46 a	0,0015 d	148 a	104 b	18,18 b	42,05 a
19	59 a	45,30 b	8,97 a	13 b	13 b	3,56 b	12,83 b	59 b	118,29 b	5,11 a	0,0015 d	148 a	96 b	17,66 b	35,94 b
20	73 a	91,00 a	8,74 a	21 a	16 a	5,64 a	35,18 a	41 c	141,75 a	3,69 b	0,0004 e	148 a	188 a	14,49 c	46,91 a
Compactado	80 a	37,32 a	6,08 a	10 a	11 a	3,41 a	7,94 a	46 a	83,91 a	3,99 a	0,0022 b	128 a	52 b	17,47 a	19,12 b
Controle	63 b	33,07 b	5,85 a	10 a	10 b	3,30 a	6,94 a	46 a	78,75 b	3,89 a	0,0028 a	128 a	73 a	17,18 a	25,77 a
CV (%)	22,84	14,36	13,07	14,60	8,72	12,58	64,64	5,08	11,33	23,21	23,92	4,40	37,88	9,70	38,10

Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação.

Relações entre as características avaliadas

As relações entre as características de raiz e da parte aérea das plântulas no experimento conduzido em casa de vegetação podem ser observadas na Tabela 4. O comprimento da parte aérea foi positivamente correlacionado com o comprimento total de raiz (coeficiente de correlação de Pearson $r = 0,52$). As relações de comprimento total de plântula com o comprimento total de raiz, área superficial total de raiz, comprimento de parte aérea e raiz principal da plântula foram fortes, com $r \geq 0,76$. A matéria seca da parte aérea foi positivamente correlacionada com o comprimento total de raiz, área superficial total de raiz, volume total de raiz, comprimento da raiz principal e comprimento total de plântula ($r \geq 0,50$), porém não foi correlacionada com o diâmetro médio radicular. A matéria seca da plântula, por sua vez, foi correlacionada com o comprimento total de raiz, área superficial total de raiz, volume total de raiz, matéria seca da parte aérea e matéria seca de raiz.

As relações entre as características de crescimento e componentes de rendimento das plantas no experimento conduzido em campo também foram apresentadas na Tabela 4. O peso de 100 sementes não teve qualquer relação significativa com as demais características avaliadas, enquanto a produção por planta apresentou correlações significativas fortes com a emergência ($r = -0,67$), altura inicial ($r = 0,83$), diâmetro da haste ($r = 0,93$), número de ramos laterais ($r = 0,96$), número de nós ($r = 0,91$), comprimento de entrenó ($r = 0,66$), matéria seca da parte aérea ($r = 0,82$), número de dias até o florescimento ($r = 0,72$), altura final ($r = 0,95$), taxa de crescimento absoluto ($r = 0,50$), taxa de crescimento relativo ($r = -0,89$) e número de dias até a colheita ($r = 0,94$).

Tabela 4. Correlações entre características de raiz e parte aérea de plântulas (experimento conduzido em casa de vegetação) e de crescimento e rendimento (experimento conduzido em campo) dos 20 genótipos de soja. Comprimento total de raiz (COMP_TOTAL), área superficial total de raiz (AREA), diâmetro médio radicular (DIAM), volume total de raiz (VOL), comprimento da parte aérea (COMP_PA), comprimento da raiz principal (COMP_RZ), comprimento de plântula (COMP_PL), matéria seca de parte aérea da plântula (MSPA_PL), matéria seca de raiz da plântula (MSRZ_PL), matéria seca de plântula (MSPL), emergência (EME), altura inicial (AI), diâmetro da haste (DH), número de ramos laterais (RL), número de nós (NN), comprimento de entrenó (CE), matéria seca da parte aérea (MSPA), dias até o florescimento (DF), altura final (AF), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), dias até a colheita (DC), número de vagens (NV), peso de cem sementes (PCS) e produção (PROD).

Casa de vegetação															
	COMP_TOTAL	AREA	DIAM	VOL	COMP_PA	COMP_RZ	COMP_PL	MSPA_PL	MSRZ_PL	MSPL					
COMP_TOTAL	1	0,86***	-0,64**	0,21 ^{NS}	0,52*	0,89***	0,87***	0,61**	0,30 ^{NS}	0,52*					
AREA		1	-0,32 ^{NS}	0,68***	0,40 ^{NS}	0,84***	0,78***	0,78***	0,67**	0,80**					
DIAM			1	0,32 ^{NS}	-0,20 ^{NS}	-0,42 ^{NS}	-0,39 ^{NS}	-0,16 ^{NS}	0,02 ^{NS}	-0,09 ^{NS}					
VOL				1	0,04 ^{NS}	0,33 ^{NS}	0,26 ^{NS}	0,60**	0,84***	0,78***					
COMP_PA					1	0,48 ^{NS}	0,76***	0,32 ^{NS}	-0,12 ^{NS}	0,14 ^{NS}					
COMP_RZ						1	0,93***	0,51*	0,27 ^{NS}	0,44 ^{NS}					
COMP_PL							1	0,50*	0,15 ^{NS}	0,38 ^{NS}					
MSPA_PL								1	0,65**	0,93***					
MSRZ_PL									1	0,89***					
MSPL										1					
Campo															
	EME	AI	DH	RL	NN	CE	MSPA	DF	AF	TCA	TCR	DC	NV	PCS	PROD
EME	1	-0,37 ^{NS}	-0,70***	-0,59**	-0,43 ^{NS}	-0,39 ^{NS}	-0,32 ^{NS}	-0,85***	-0,64**	-0,53*	0,64**	-0,74***	-0,54*	-0,07 ^{NS}	-0,67**
AI		1	0,76***	0,91***	0,88***	0,89***	0,98***	0,28 ^{NS}	0,86***	0,21 ^{NS}	-0,85***	0,73***	0,93***	-0,34 ^{NS}	0,83***
DH			1	0,87***	0,90***	0,54*	0,80***	0,76***	0,90***	0,45*	-0,86***	0,94***	0,85***	-0,03 ^{NS}	0,93***
RL				1	0,91***	0,78***	0,88***	0,58**	0,94***	0,43 ^{NS}	-0,90***	0,87***	0,97***	-0,28 ^{NS}	0,96***
NN					1	0,60**	0,92***	0,53*	0,88***	0,29 ^{NS}	-0,88***	0,84***	0,91***	-0,13 ^{NS}	0,91***
CE						1	0,80***	0,14 ^{NS}	0,74***	0,23 ^{NS}	-0,71***	0,59**	0,79***	-0,44 ^{NS}	0,66**
MSPA							1	0,30 ^{NS}	0,84***	0,16 ^{NS}	-0,83***	0,75***	0,91***	-0,30 ^{NS}	0,82***
DF								1	0,62**	0,56*	-0,61**	0,79***	0,54*	0,14 ^{NS}	0,72***
AF									1	0,63**	-0,83***	0,93***	0,94***	-0,29 ^{NS}	0,95***
TCA										1	-0,21 ^{NS}	0,58**	0,40 ^{NS}	-0,17 ^{NS}	0,50*
TCR											1	-0,83***	-0,87***	0,07 ^{NS}	-0,89***
DC												1	0,86***	-0,18 ^{NS}	0,94***
NV													1	-0,31 ^{NS}	0,95***
PCS														1	-0,14 ^{NS}
PROD															1

*, ** e *** - coeficiente de correlação linear de Person (r) significativo a 0,05, 0,01 e 0,001 nível de probabilidade, respectivamente. Abreviação: NS, não significativo.

Avaliação da suscetibilidade de genótipos de soja à compactação

Para identificar os genótipos de soja sensíveis e tolerantes ao estresse por compactação, o índice de suscetibilidade ao estresse (SSI) foi calculado para os 20 genótipos com base na matéria seca da parte aérea de plântulas (experimento em casa de vegetação) e no rendimento de grãos por planta (experimento em campo) (Tabelas 5 e 6). Os valores de mudança relativa de característica (RTC) para DM e GY foram muito superiores nos genótipos sensíveis comparados aos tolerantes. No experimento em casa de vegetação, os genótipos 1, 5, 9, 12, 13, 14, 16, 17 e 19 foram classificados como tolerantes e os genótipos 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 15, 18 e 20 como sensíveis à compactação do solo (Tabela 5). Enquanto no experimento de campo, os genótipos 2, 3, 4, 5, 9, 10, 13, 14, 15, 16 e 19 foram classificados como tolerantes e os genótipos 1, 6, 7, 8, 11, 12, 17, 18 e 20 foram classificados como sensíveis ao estresse (Tabela 6).

Tabela 5. Influência da impedância mecânica do substrato na matéria seca da parte aérea de plântula, mudança relativa de característica, índice de suscetibilidade ao estresse e classificação de genótipos. (experimento em casa de vegetação).

Genótipo	Tratamento	Matéria seca da parte aérea (g plântula ⁻¹)	RTC	SSI	Tolerante/sensível
1	controle	20,6	0,041	-0,948	Tolerante
	compactado	19,8			
2	controle	23,6	-0,096	2,210	Sensível
	compactado	25,9			
3	controle	18,0	-0,219	5,055	Sensível
	compactado	22,0			
4	controle	20,8	-0,122	2,822	Sensível
	compactado	23,4			
5	controle	22,1	0,139	-3,201	Tolerante
	compactado	19,0			
6	controle	20,0	-0,149	3,433	Sensível
	compactado	23,0			
7	controle	22,4	-0,112	2,594	Sensível
	compactado	24,9			
8	controle	22,8	-0,058	1,328	Sensível
	compactado	24,2			
9	controle	19,6	0,059	-1,364	Tolerante
	compactado	18,4			
10	controle	26,6	-0,086	1,977	Sensível
	compactado	28,9			
11	controle	20,6	-0,127	2,920	Sensível
	compactado	23,2			
12	controle	19,1	-0,029	0,665	Tolerante
	compactado	19,6			
13	controle	20,7	0,137	-3,154	Tolerante
	compactado	17,9			
14	controle	25,7	0,027	-0,615	Tolerante
	compactado	25,0			
15	controle	23,4	-0,176	4,062	Sensível
	compactado	27,6			
16	controle	22,4	-0,012	0,280	Tolerante
	compactado	22,7			
17	controle	23,9	0,027	-0,618	Tolerante
	compactado	23,3			
18	controle	20,7	-0,127	2,933	Sensível
	compactado	23,4			
19	controle	22,5	0,039	-0,908	Tolerante
	compactado	21,7			
20	controle	18,0	-0,049	1,122	Sensível
	compactado	18,9			
Média	controle	21,7	Genótipos sensíveis SSI > 1.0 Genótipos tolerantes SSI < 1.0		
	compactado	22,6			
	CV (%)	14,78			

Tabela 6. Influência da compactação do solo na produção de grãos, mudança relativa de característica, índice de suscetibilidade ao estresse e classificação de genótipos (experimento em campo).

Genótipo	Tratamento	Rendimento de grãos (g planta ⁻¹)	RTC	SSI	Tolerante/sensível
1	controle	20,1	0,291	1,127	Sensível
	compactado	14,2			
2	controle	11,5	-0,236	-0,916	Tolerante
	compactado	14,2			
3	controle	15,8	0,203	0,786	Tolerante
	compactado	12,6			
4	controle	16,4	0,230	0,892	Tolerante
	compactado	12,6			
5	controle	14,6	0,036	0,138	Tolerante
	compactado	14,0			
6	controle	18,0	0,364	1,411	Sensível
	compactado	11,5			
7	controle	16,5	0,417	1,614	Sensível
	compactado	9,6			
8	controle	21,7	0,267	1,033	Sensível
	compactado	15,9			
9	controle	14,2	0,115	0,446	Tolerante
	compactado	12,6			
10	controle	12,2	0,169	0,656	Tolerante
	compactado	10,1			
11	controle	19,4	0,351	1,360	Sensível
	compactado	12,6			
12	controle	27,2	0,405	1,569	Sensível
	compactado	16,2			
13	controle	18,9	0,096	0,370	Tolerante
	compactado	17,1			
14	controle	20,2	0,198	0,766	Tolerante
	compactado	16,2			
15	controle	39,9	0,241	0,934	Tolerante
	compactado	30,3			
16	controle	32,2	-0,088	-0,342	Tolerante
	compactado	35,0			
17	controle	45,5	0,372	1,439	Sensível
	compactado	28,6			
18	controle	53,8	0,438	1,697	Sensível
	compactado	30,2			
19	controle	35,2	-0,044	-0,169	Tolerante
	compactado	36,7			
20	controle	61,9	0,485	1,879	Sensível
	compactado	31,9			
Média	controle	25,8	Genótipos sensíveis SSI > 1.0		
	compactado	19,1	Genótipos tolerantes SSI < 1.0		
	CV (%)	38,1			

A classificação dos genótipos de soja como tolerantes ou sensíveis ao estresse de compactação do solo foi determinada com base nos desvios do valor médio de SSI. Em 60% dos casos, ou seja, para 12 genótipos, a classificação como tolerante ou sensíveis foi semelhante (Tabelas 5 e 6).

A análise de componentes principais com base no SSI dos dados fenotípicos avaliados em ambos os experimentos permitiu separar os genótipos em dois grupos, tolerantes e sensíveis à compactação do solo (Figura 4). Os principais contribuintes para explicar a variação total dos dados foram produção, taxa de crescimento relativo e absoluto, diâmetro da haste, altura inicial e final das plantas, avaliados no experimento em campo; e matéria seca e comprimento da parte aérea de plântula, comprimento e matéria seca total de plântula, comprimento da raiz principal da plântula, bem como comprimento, área, volume e matéria seca total de raiz, avaliados no experimento em casa de vegetação.

Os genótipos tolerantes à compactação do solo apresentaram maior plasticidade radicular durante o crescimento inicial, porém menor alteração no comprimento e matéria seca da parte aérea de plântulas avaliadas no sistema de impedância mecânica em casa de vegetação, além de reduções mínimas na produção de grãos por planta no campo (Figura 4).

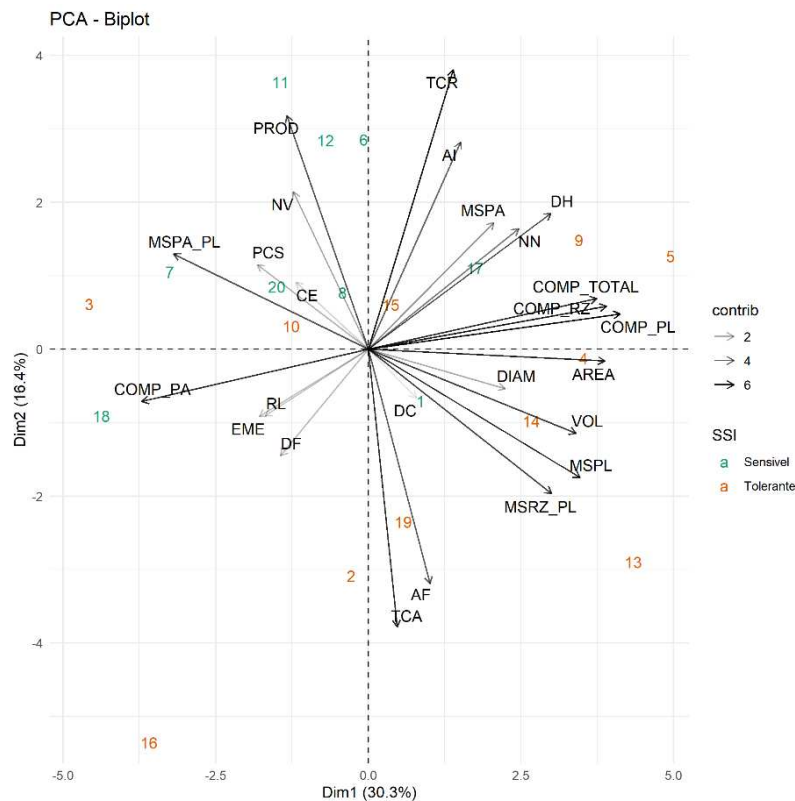


Figura 4. Biplot da análise de componentes principais que separou os genótipos de soja em dois grupos, tolerantes e sensíveis à compactação do solo, com base no índice de suscetibilidade ao estresse (SSI) para as características avaliadas nos experimentos conduzidos em casa de vegetação e campo. Comprimento total de raiz

(COMP_TOTAL), área superficial total de raiz (AREA), diâmetro médio radicular (DIAM), volume total de raiz (VOL), comprimento da parte aérea (COMP_PA), comprimento da raiz principal (COMP_RZ), comprimento de plântula (COMP_PL), matéria seca de parte aérea da plântula (MSPA_PL), matéria seca de raiz da plântula (MSRZ_PL), matéria seca de plântula (MSPL), emergência (EME), altura inicial (AI), diâmetro da haste (DH), número de ramos laterais (RL), número de nós (NN), comprimento de entrenó (CE), matéria seca da parte aérea (MSPA), dias até o florescimento (DF), altura final (AF), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), dias até a colheita (DC), número de vagens (NV), peso de cem sementes (PCS) e produção (PROD).

As relações entre as características de raiz e parte aérea de plântulas (experimento em casa de vegetação) com a produção de grãos por planta (experimento em campo) dos genótipos coincidentes ($n = 12$) podem ser observadas na Tabela 7. A produção no campo relacionou positivamente com a matéria seca da parte aérea ($r = 0,73$), negativamente com a matéria seca de raiz ($r = -0,58$) e matéria seca total de plântula ($r = -0,74$). No entanto, não apresentou correlação significativa com as características de comprimento total de raiz, área superficial total de raiz, diâmetro médio radicular, volume total de raiz, comprimento da parte aérea, comprimento da raiz principal e comprimento total de plântula.

Tabela 7. Correlações entre as características de raiz e parte aérea de plântulas (experimento em casa de vegetação) e produção por planta (experimento em campo) dos genótipos de soja coincidentes nos grupos tolerante e sensível à compactação do solo, com base no índice de suscetibilidade ao estresse (SSI). Comprimento total de raiz (COMP_TOTAL), área superficial total de raiz (AREA), diâmetro médio radicular (DIAM), volume total de raiz (VOL), comprimento da parte aérea (COMP_PA), comprimento da raiz principal (COMP_RZ), comprimento de plântula (COMP_PL), matéria seca de parte aérea da plântula (MSPA_PL), matéria seca de raiz da plântula (MSRZ_PL), matéria seca de plântula (MSPL) e produção (PROD).

	COMP_TOTAL	AREA	DIAM	VOL	COMP_PA	COMP_RZ	COMP_PL	MSPA_PL	MSRZ_PL	MSPL	PROD
COMP_TOTAL	1	0,90***	0,69*	0,52 ^{NS}	-0,49 ^{NS}	0,67*	0,65*	-0,62*	0,42 ^{NS}	0,58*	-0,35 ^{NS}
AREA		1	0,48 ^{NS}	0,83***	-0,52 ^{NS}	0,75**	0,72**	-0,75**	0,71**	0,81**	-0,49 ^{NS}
DIAM			1	0,06 ^{NS}	-0,13 ^{NS}	0,21 ^{NS}	0,24 ^{NS}	-0,40 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,32 ^{NS}	-0,43 ^{NS}
VOL				1	-0,39 ^{NS}	0,64*	0,58*	-0,69*	0,90***	0,88***	-0,52 ^{NS}
COMP_PA					1	-0,76**	-0,90***	0,70*	-0,18 ^{NS}	-0,51 ^{NS}	0,34 ^{NS}
COMP_RZ						1	0,96***	-0,70*	0,51 ^{NS}	0,67*	-0,20 ^{NS}
COMP_PL							1	-0,77**	0,43 ^{NS}	0,67*	-0,33 ^{NS}
MSPA_PL								1	-0,67*	-0,92***	0,73**
MSRZ_PL									1	0,91***	-0,58*
MSPL										1	-0,74**
PROD											1

*, ** e *** - coeficiente de correlação linear de Person (r) significativo a 0,05, 0,01 e 0,001 nível de probabilidade, respectivamente. Abreviação: NS, não significativo.

DISCUSSÃO

A seleção de genótipos tolerantes a estresses é um dos objetivos dos programas de melhoramento (Rogers & Benfey, 2015). Este estudo investigou o grau de suscetibilidade de vinte genótipos de soja ao estresse de compactação, por meio de experimento conduzido com substrato, em casa de vegetação, e em solo, no campo. O desempenho de plântulas em sistema de impedância mecânica foi comparado com o rendimento da cultura em solo compactado.

A variabilidade de genótipos de soja em casa de vegetação foi explorada por meio do sistema de impedância mecânica do substrato, proposto por Capobiango et al. (2022), apresentado na Figura 1. A metodologia é baseada na compressão da areia, que simula diferentes níveis de resistência à penetração com a aplicação de uma força (peso) constante sobre o local de semeadura, sendo possível caracterizar eficientemente os genótipos quanto à plasticidade do sistema radicular. Neste estudo, o método efetuou o *screening* de genótipos tolerantes à compactação do solo ainda nas fases iniciais de crescimento da soja. A previsão da tolerância ao estresse em ambiente controlado foi validada no experimento conduzido em campo, quando se avaliou o desenvolvimento e rendimento de grãos desses genótipos. O processo de seleção quanto à suscetibilidade ao estresse é confiável quando inclui ambientes manejados, onde o nível de compactação é controlado (Grzesiak et al., 2021).

O impedimento físico do substrato reduziu o comprimento, área e volume de raiz, mas aumentou o diâmetro médio de raiz e a matéria seca da parte aérea das plântulas (Tabela 2). No entanto, alguns genótipos apresentaram maior penetrabilidade radicular, independentemente do nível de resistência à penetração. De acordo com Gerald et al. (2006) e Kuijken et al. (2015), o fenótipo da arquitetura do sistema radicular resultante é muito plástico e controlado pelo *background* genético da planta, pelos recursos disponíveis e condições ambientais. Assim, a plasticidade fenotípica é uma característica hereditária e pode ter valor adaptativo, proporcionando tolerância ambiental à compactação do solo (Correa et al., 2019; Rivera et al., 2019).

A taxa de alongamento radicular é uma das características mais afetadas pelos altos níveis de impedância mecânica do substrato, com um aumento coincidente no diâmetro da raiz (Jin et al., 2013; Popova et al., 2016; Colombi and Walter, 2017; Sarto et al., 2018). As mudanças da raiz e matéria seca da parte aérea foram relatadas anteriormente por outros autores (Grzegorz et al., 2021; Grzesiak et al., 2021; Fried et al., 2018). As respostas de crescimento da plântula são induzidas por hormônios como etileno ou ácido abscísico e, normalmente, ocorre redistribuição de reservas da semente para engrossar as raízes e os hipocótilos das plântulas

cultivadas sob maior resistência mecânica (Taylor & Ten Broeck, 1988; Whalley et al., 1999; Correa et al., 2019).

No experimento de campo, a compactação do solo aumentou a emergência de plântulas e o crescimento de plantas, mas reduziu a produção de grãos (Tabela 3). Isto ocorre devido às mudanças na resistência do solo, que foram maiores no período de seca (Shaheb et al., 2021). Segundo Liu et al. (2022), os impactos da compactação do solo no crescimento das plantas e na produtividade da cultura devem ser avaliados no contexto dos efeitos interativos das condições climáticas e físicas do solo.

Os resultados dos experimentos conduzidos em casa de vegetação e campo confirmaram a variabilidade de genótipos de soja cultivados sob condições de estresse e não estresse. Os materiais utilizados apresentaram ampla faixa de valores de matéria seca da parte aérea de plântulas e rendimento da cultura.

A maioria das características de parte aérea e sistema radicular das plântulas, bem como crescimento e produção de grãos por planta, foram positivamente correlacionadas (Tabela 4). Estudo de variabilidade genética em trigo, desenvolvido por Colombi e Walter (2017), relata relação positiva entre o número de raízes que penetram através da camada de parafina-vaselina e a matéria seca da parte aérea de plântulas. Os autores mostraram que as características de raiz não apenas respondem à impedância mecânica, mas também determinam o vigor inicial da parte aérea sob elevada resistência à penetração, sendo promissoras para a seleção de genótipos tolerantes ao estresse. Além disso, a plasticidade fenotípica da planta também pode estar associada à tolerância ambiental, pois quando o ambiente altera o crescimento vegetativo, todas as características relacionadas ao tamanho da planta podem ser influenciadas concordantemente (Correa et al., 2022).

Este estudo classificou os genótipos de soja em sensíveis e tolerantes à compactação do solo de acordo com o seu desempenho em casa de vegetação (Tabela 5) e campo (Tabela 6), com base em uma relação matemática (SSI) entre os efeitos dos tratamentos controle e com compactação na matéria seca de plântulas e no rendimento de grãos, respectivamente. Os resultados mostraram que o índice foi útil na discriminação de materiais tolerantes e sensíveis ao estresse de compactação do solo, assim como observado nos trabalhos desenvolvidos por Grzegorz et al. (2021) e Grzesiak et al. (2022) em que foram avaliados híbridos de milho.

Genótipos tolerantes tiveram maiores mudanças de características radiculares e menores alterações na parte aérea de plântulas avaliadas no sistema de impedância mecânica em casa de vegetação (Figura 4). No experimento de campo, apresentaram menores reduções, comparados

aos genótipos sensíveis, principalmente na taxa de crescimento, na altura, no número de vagens e na produção por planta. Entre os genótipos coincidentes, ou seja, que receberam a mesma classificação pelo SSI (sensível / tolerante), o rendimento da cultura foi positivamente correlacionado com a matéria seca da parte aérea de plântulas ($r = 0,73$) (Tabela 7). A identificação da tolerância genotípica à compactação do solo detectada precocemente, ainda em fase de plântula, pode permitir rápido *screening* de materiais com características desejadas para fins de melhoramento (Fried et al., 2018).

A alta e significativa correlação entre o índice dos genótipos de soja em casa de vegetação e no campo pode indicar que a suscetibilidade geneticamente determinada ao estresse de compactação do solo foi semelhante ao longo da ontogênese, ou seja, durante o crescimento e desenvolvimento da planta (Grzesiak et al., 2021). No entanto, a plasticidade fenotípica de diferentes características da planta depende do genótipo e do ambiente, assim, é um desafio distinguir mecanismos adaptativos de processos ontológicos (Correa et al., 2019, 2022). Apesar do exposto, não há muitas informações sobre os processos que ocorrem durante o crescimento da soja sob impedância mecânica. Esta abordagem é promissora, porém a diversidade genética em plasticidade precisa ser mais explorada em futuros programas de melhoramento para superar os impactos da compactação do solo na produtividade da cultura.

CONCLUSÕES

Em ambiente controlado, genótipos tolerantes à compactação do solo apresentam maior plasticidade de características radiculares e menores alterações na parte aérea de plântulas. No campo, esses genótipos apresentam menores reduções, comparados aos genótipos sensíveis, principalmente na taxa de crescimento, na altura, no número de vagens e na produção de grãos.

A matéria seca da parte aérea e a matéria seca da raiz de plântulas de soja em sistema de impedância mecânica apresenta correlação positiva e negativa, respectivamente, com o rendimento da soja em solo compactado, indicando que a suscetibilidade geneticamente determinada ao estresse de compactação do solo foi semelhante ao longo da ontogênese.

O sistema de impedância mecânica do substrato, utilizado para avaliar o desempenho de plântulas de soja sob estresse, é eficiente na classificação de genótipos tolerantes à compactação do solo.

REFERÊNCIAS

- Bauhus, J., & Messier, C. (1999). Evaluation of fine root length and diameter measurements. *Agronomy Journal*, 91 (1), 142–147. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100010022x>
- Botta, G. F., Tolon-Becerra, A., Lastra-Bravo, X., & Tourn, M. (2010). Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research*, 110 (1), 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.07.001>
- Capobiango, N. P., Junio da Silva, L., Fernandes, R. B. A., Silva Júnior, R. A., Barcellos Júnior, L. H., Dantas de Medeiros, A., & Lopes, W.M. (2022). A proposal for evaluation of seedling emergence and growth under mechanical impedance. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53 (18), 2374–2387. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2071443>
- Chen, Y. L., Palta, J., Clements, J., Buirchell, B., Siddique, K. H. M., & Rengel, Z. (2014). Root architecture alteration of narrow-leafed lupin and wheat in response to soil compaction. *Field Crops Research*, 165, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.007>
- Colombi, T., & Keller, T. (2019). Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. *Soil and Tillage Research*, 191, 156–161. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.008>
- Colombi, T., & Walter, A. (2017). Genetic diversity under soil compaction in wheat: root number as a promising trait for early plant vigor. *Frontiers in Plant Science*, 8 (15117), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00420>
- Correa, J., Postma, J. A., Watt, M., & Wojciechowski, T. (2019). Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Journal of Experimental Botany*, 70 (21), 6019–6034. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz383>
- Correa, J., Postma, J. A., & Wojciechowski, T. (2022). Phenotypic response to soil compaction varies among genotypes and correlates with plant size in sorghum. *Plant and Soil*, 472 (1–2), 59–76. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05160-z>
- Doorenbos, J., & Kassam, A. (1986). *Yield response to water*. (Food and Agriculture Organization of the United Nations., Ed.) (FAO irriga).
- Finch-Savage, W. E., & Bassel, G. W. (2016). Seed vigour and crop establishment: Extending

performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 67 (3), 567–591. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>

Fischer, R., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29 (5), 897. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>

Fitz Gerald, J. N., Lehti-Shiu, M. D., Ingram, P. A., Deak, K. I., Biesiada, T., & Malamy, J. E. (2006). Identification of quantitative trait loci that regulate arabidopsis root system size and plasticity. *Genetics*, 172 (1), 485–498. <https://doi.org/10.1534/genetics.105.047555>

Fried, H. G., Narayanan, S., & Fallen, B. (2018). Characterization of a soybean (*Glycine max* L. Merr.) germplasm collection for root traits. *Plos One*, 13 (7), e0200463. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200463>

Golbashy, M., Ebrahimi, M., Khorasani, S. K., & Choukan, R. (2010). Evaluation of drought tolerance of some corn (*Zea mays* L.) hybrids in Iran. *African Journal of Agricultural Research*, 5 (19), 2714–2719

Grzegorz, R., Grzesiak, M. T., Maksymowicz, A., Jurczyk, B., Rzepka, A., Hura, K., & Grzesiak, S. (2021). Responses of a root system structure to soil compaction stress among maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208 (1), 106–119. <https://doi.org/10.1111/jac.12530>

Grzesiak, M. T., Hura, T., Maksymowicz, A., Dziurka, K., Rut, G., Rzepka, A., & Grzesiak, S. (2022). Effect of soil drought on growth and yield of maize (*Zea mays* L.) hybrids grown under compacted soil. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 00, 1– 17. <https://doi.org/10.1111/jac.12626>

Grzesiak, M. T., Maksymowicz, A., Jurczyk, B., Hura, T., Rut, G., Rzepka, A., & Grzesiak, S. (2021). Selection approaches to the variation of responses to soil compaction stress among maize hybrids (*Zea mays* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207 (3), 544–556. <https://doi.org/10.1111/jac.12491>

Grzesiak, M. T., Szczyrek, P., Rut, G., Ostrowska, A., Hura, K., Rzepka, A., Hura, T., & Grzesiak, S. (2015). Interspecific differences in tolerance to soil compaction, drought and waterlogging stresses among maize and triticale genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201 (5), 330–343. <https://doi.org/10.1111/jac.12104>

Jin, K., Shen, J., Ashton, R. W., Dodd, I. C., Parry, M. A. J., & Whalley, W. R. (2013). How

do roots elongate in a structured soil? *Journal of Experimental Botany*, 64 (15), 4761–4777. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert286>

Kuijken, R. C. P., van Eeuwijk, F. A., Marcelis, L. F. M., & Bouwmeester, H. J. (2015). Root phenotyping: from component trait in the lab to breeding. *Journal of Experimental Botany*, 66 (18), 5389–401. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv239>

Liu, H., Colombi, T., Jäck, O., Keller, T., & Weih, M. (2022). Effects of soil compaction on grain yield of wheat depend on weather conditions. *Science of The Total Environment*, 807, 150763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150763>

MAPA. (2009). Regras para análise de sementes. MAPA/ACS, Brasília, DF.

Millington, W. A. J., Misiewicz, P. A., Dickin, E. T., White, D. R., & Godwin, R.J. 2016. An investigation into the effect of soil compaction and tillage on plant growth and yield of winter barley (*Hordeum vulgare* L.). In *2016 ASABE International Meeting (pp.1-12)*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/aim.20162461725>

Moraes, M. T., Debiassi, H., Franchini, J. C., Mastroberti, A. A., Levien, R., Leitner, D., & Schnepf, A. (2020). Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. *Soil and Tillage Research*, 200, 104611. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>

Nunes, M. R., Denardin, J. E., Pauletto, E. A., Faganello, A., & Pinto, L. F. S. (2015). Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 148, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.007>

Popova, L., van Dusschoten, D., Nagel, K. A., Fiorani, F., & Mazzolai, B. (2016). Plant root tortuosity: an indicator of root path formation in soil with different composition and density. *Annals of Botany*, 118 (4), 685–698. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw057>

R Core Team (2019). (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.

Rivera, M., Polanía, J., Ricaurte, J., Borrero, G., Beebe, S., & Rao, I. (2019). Soil compaction induced changes in morpho-physiological characteristics of common bean. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19 (1), 217–227. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0007-y>

Rogers, E. D., & Benfey, P. N. (2015). Regulation of plant root system architecture: Implications for crop advancement. *Current Opinion in Biotechnology*, 32, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.11.015>

- Sarto, M. V. M., Bassegio, D., Rosolem, C. A., Sarto, J. R. W., Sarto, M. V. M., Bassegio, D., Rosolem, C. A., & Sarto, J. R. W. (2018). Safflower root and shoot growth affected by soil compaction. *Bragantia*, 77 (2), 348–355. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017191>
- Shaheb, M. R., Venkatesh, R., & Shearer, S. A. (2021). A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*, 46 (4), 417–439. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>
- Shaheb, M.R. (2020). *A study on the effect of tyre inflation pressure on soil properties, growth and yield of maize and soybean in Central Illinois*. Ph.D. thesis. Harper Adams University, Newport, Shropshire, United Kingdom.
- Shaheb, M. R., Grift, T. E. , Godwin, R. J., Dickin, E., White, D. R., & Misiewicz, P. A. (2018). Effect of tire inflation pressure on soil properties and yield in a corn - soybean rotation for three tillage systems in the Midwestern United States. In *2018 ASABE Annual International Meeting, Detroit, 29 July–01 August, 1801834*, 1–14. St. Joseph, MI. <https://doi.org/10.13031/aim.201801834>
- Sidhu, D., & Duiker, S. W. (2006). Soil compaction in conservation tillage: Crop impacts. *Agronomy Journal*, 98(5): 1257–1264. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0070>
- Sivarajan, S., Maharlooei, M., Bajwa, S. G., & Nowatzki, J. (2018). Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil and Tillage Research*, 175, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.001>
- Taylor A. G & Ten Broeck C. W. (1988). Seedling emergence forces of vegetable crops. *HortScience*, 23, 367–369.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. 2022. Boletim meteorológico 2022. Viçosa, MG: UFV.
- Whalley, W. R., Finch-savage, R. E., Cope, R. E., Rowse, H. R., & Bird, N. R. A. (1999). 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 & Environment*, 22, 229–242. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00412.x>
- Winter, S. R., Musick, J. T., & Porter, K. B. (1988). Evaluation of screening techniques for breeding drought-resistance winter wheat. *Crop Science*, 28 (3), 512–516. <https://doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183X002800030018x>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho estudou-se a suscetibilidade de genótipos de soja à compactação do solo em casa de vegetação e em campo, procurando-se identificar as principais características dos genótipos tolerantes ao estresse, a variabilidade quanto à plasticidade fenotípica e a relação entre o desempenho de plântulas com o rendimento da cultura no campo. O estudo utilizou um sistema de impedância mecânica do substrato, proposto pela autora, em condições controladas para avaliar o crescimento de plântulas sob estresse da compactação, com maior eficiência e confiabilidade. No campo, os genótipos foram avaliados em área compactada (com quatro passadas de trator) e não compactada, quanto à emergência de plântulas, crescimento, desenvolvimento e produção de grãos por planta.

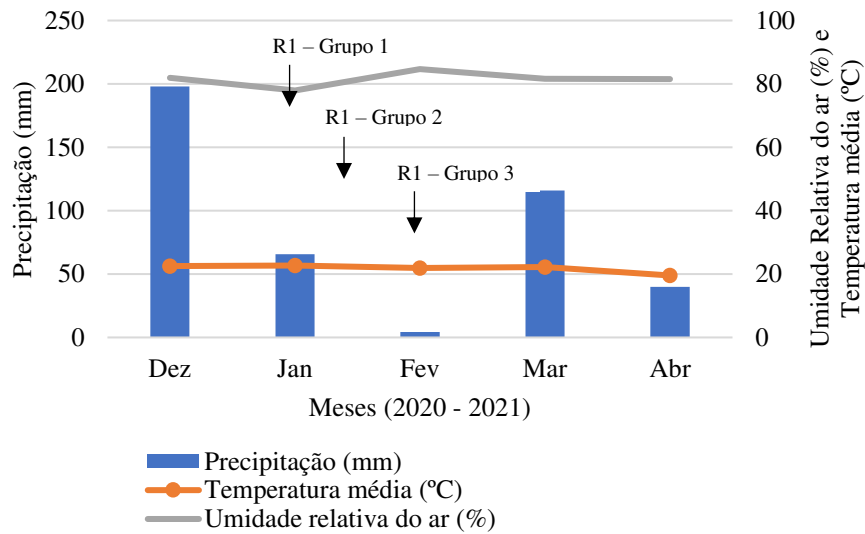
A hipótese de que existe variabilidade de genótipos de soja para plasticidade fenotípica de diferentes características da planta em condições de compactação do solo foi constatada pela diferença nos índices de suscetibilidade ao estresse. Em ambiente controlado, genótipos tolerantes apresentaram maior plasticidade de características radiculares e menores alterações na parte aérea de plântulas. No campo, estes apresentaram menores reduções, comparados aos genótipos sensíveis, principalmente na taxa de crescimento relativo, taxa de crescimento absoluto, altura final, número de vagens e rendimento de grãos. Em geral, a compactação do solo proporcionou maior emergência de plântulas e crescimento vegetativo, mas perdas significativas na produtividade da soja.

Outra hipótese avaliada, de que o desempenho de plântulas em sistema de impedância mecânica em ambiente controlado apresenta correlação com o rendimento de plantas em solo compactado também foi constatada, e pode indicar que a suscetibilidade geneticamente determinada ao estresse de compactação do solo seja semelhante ao longo da ontogênese.

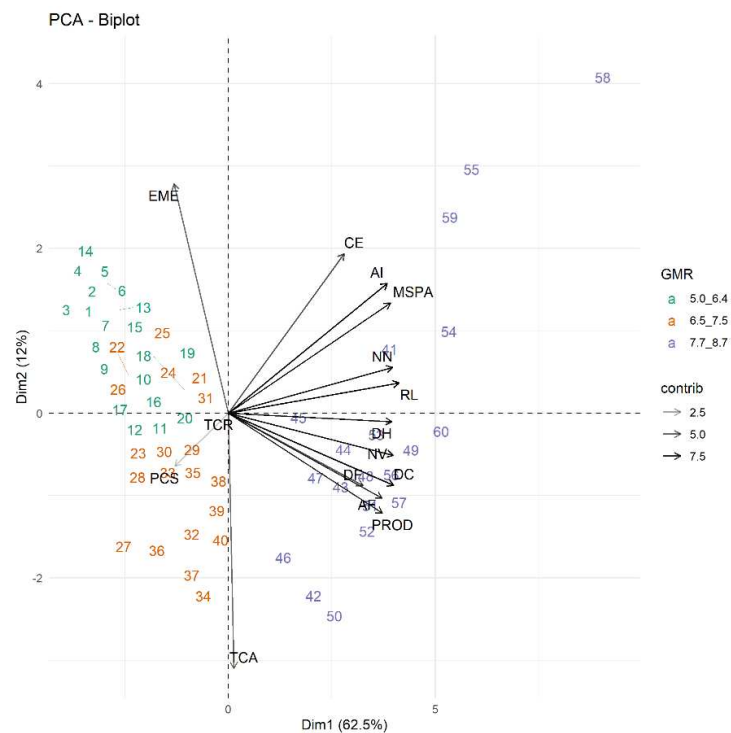
Este trabalho validou o sistema de impedância mecânica do substrato, metodologia depositada como pedido de patente junto ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Intelectual) em 2018 pela autora (BR 10 2018 073102 5), com a proposta de efetuar o *screening* de genótipos de plantas tolerantes à compactação do solo.

Com os resultados obtidos nesta tese, fica evidente a necessidade de novos estudos envolvendo o conhecimento das interações genótipo x ambiente durante vários anos e a identificação de outros mecanismos, morfológicos, fisiológicos, bioquímicos e anatômicos, que podem ser utilizados nos programas de melhoramento para a seleção de materiais adaptados.

APÊNDICES

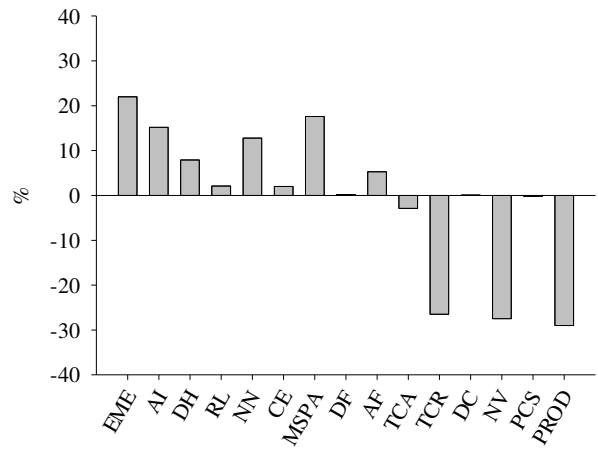
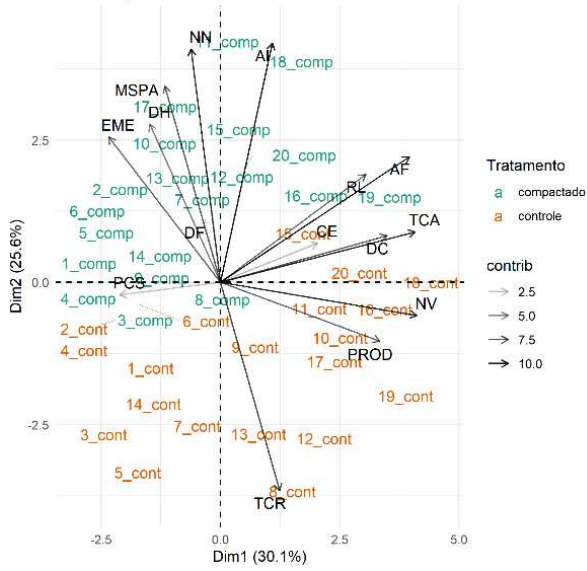


Apêndice 1. Precipitação, temperatura média e umidade relativa do ar, no período de dezembro de 2020 a abril de 2021, em Viçosa-MG.



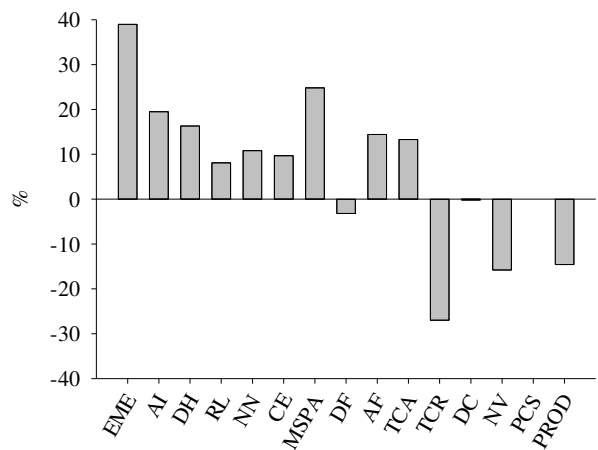
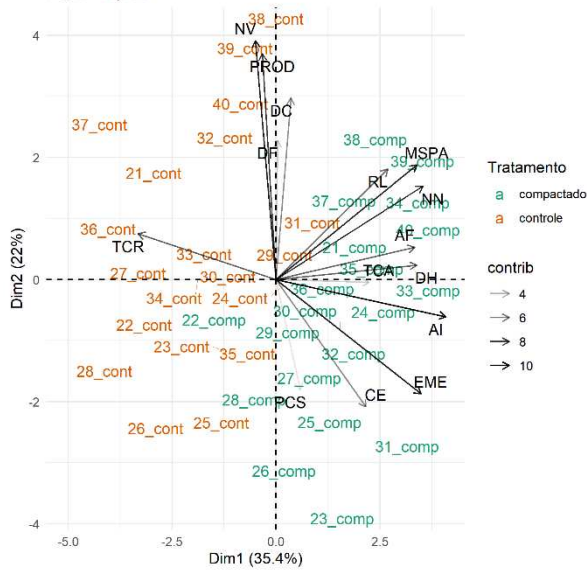
Apêndice 2. *Biplot* da análise de componentes principais que separou os genótipos de soja pelo grupo de maturidade relativa, com base nas características agrônomicas. Emergência de plântulas (EME), altura inicial (AI), diâmetro da haste (DH), ramos laterais (RL), número de nós (NN), comprimento de entrenó (CE), matéria seca da parte aérea (MSPA), dias até o florescimento (DF), altura final (AF), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), dias até a colheita (DC), número de vagens (NV), peso de 100 sementes (PCS) e produção (PROD). Os genótipos 1–60 estão identificados no *biplot*.

A PCA - Biplot



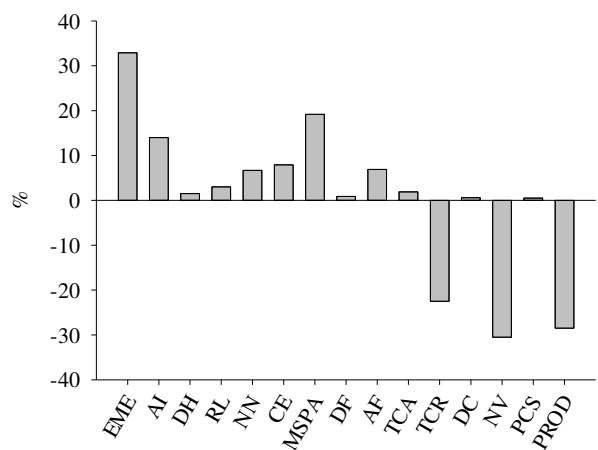
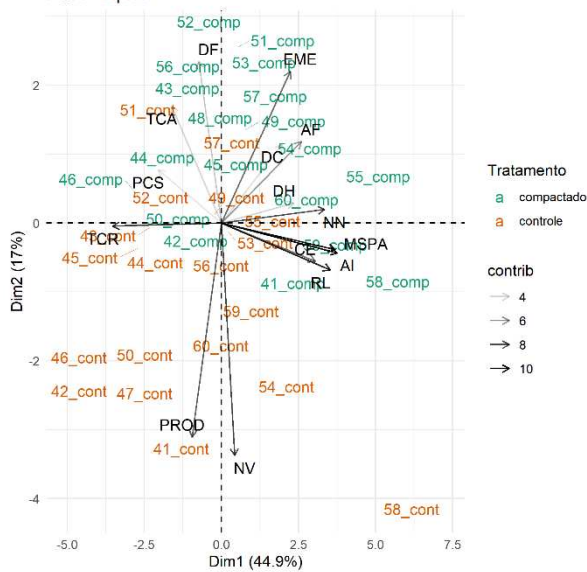
Características

B PCA - Biplot



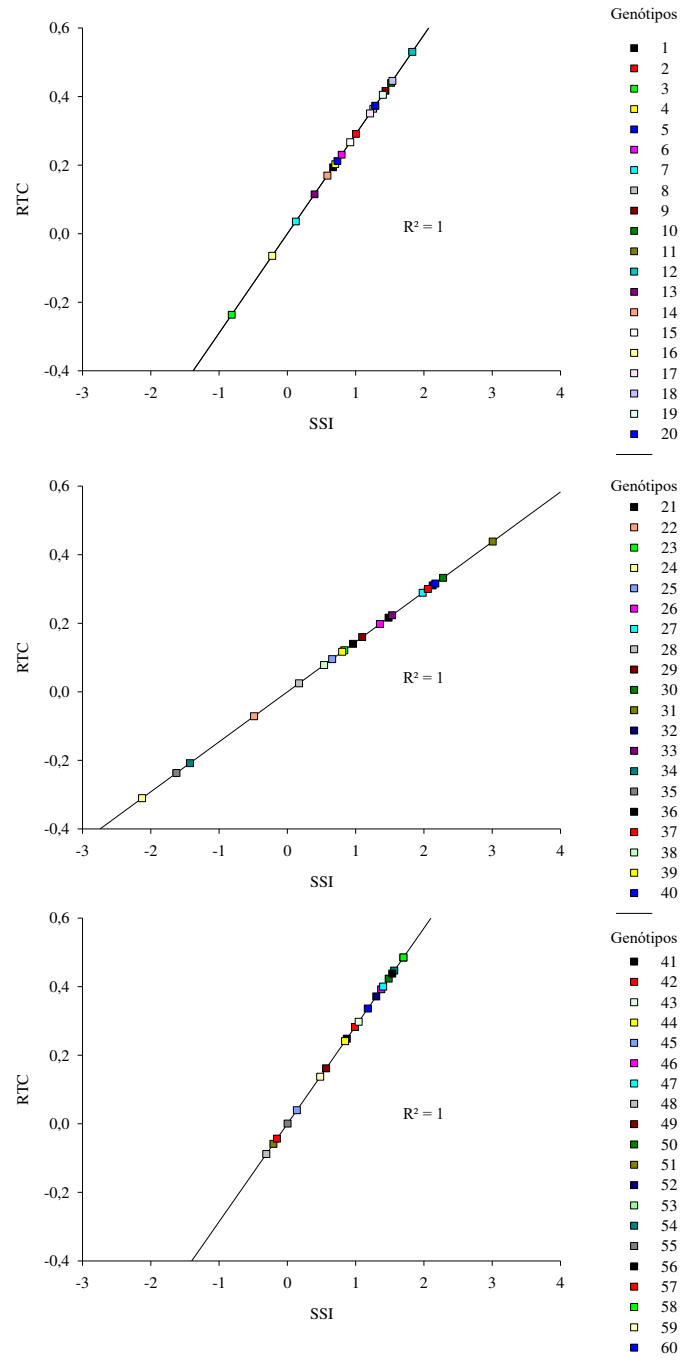
Características

C PCA - Biplot



Características

Apêndice 3. *Biplot* da análise de componentes principais mostrando a variabilidade de genótipos de soja do grupo 1 (A), grupo 2 (B) e grupo 3 (C) para as características avaliadas nos tratamentos controle e solo compactado. Gráfico de alterações (%) das características em resposta à compactação do solo. Emergência de plântulas (EME), altura inicial (AI), diâmetro da haste (DH), ramos laterais (RL), número de nós (NN), comprimento de entrenó (CE), matéria seca da parte aérea (MSPA), dias até o florescimento (DF), altura final (AF), taxa de crescimento absoluto (TCA), taxa de crescimento relativo (TCR), dias até a colheita (DC), número de vagens (NV), peso de 100 sementes (PCS) e produção (PROD).



Apêndice 4. Relação entre o índice de suscetibilidade à compactação do solo (SSI) e o índice de mudança relativa de característica (RTC) para produtividade da soja (GY).