



Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica

Pedro Luan Ferreira da Silva^{1*}

¹*Mestrando em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas) na Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR. *Autor para correspondência (pedroluanferreira@gmail.com).*

Histórico do Artigo: Submetido em: 26/11/2020 – Revisado em: 21/01/2021 – Aceito em: 17/02/2021

RESUMO

A compactação é uma das principais causas de degradação física dos solos agrícolas em escala global. O aumento de densidade do solo e a elevação no grau de compactação tendem a reduzir o volume de raízes e interferir na disponibilidade de nutrientes às plantas. Dessa forma, esta revisão bibliográfica teve como objetivo levantar informações acerca dos efeitos da compactação do solo sobre a absorção de elementos minerais pelas plantas. O levantamento de dados foi realizado nas principais bases indexadoras a nível nacional e internacional. Os resultados encontrados demonstram que a compactação do solo e o alagamento interferem diretamente na absorção de elementos minerais pelas plantas, pois comprometem o funcionamento físico do solo, impedindo o crescimento das raízes. O estresse físico eleva a produção de ácido abscísico pelas raízes das plantas e, tem como consequência à redução na área foliar. Elementos como P e K são absorvidos pelas plantas pelo processo de difusão, então, qualquer modificação na estrutura do solo irá refletir na baixa disponibilidade. Dentre as lacunas existentes, verifica-se uma carência de estudos sobre o efeito da compactação do solo em subsuperfície e as possíveis implicações sobre a absorção de nutrientes e água pelas plantas.

Palavras-Chaves: Resistência à penetração, Nutrição vegetal, Morfofisiologia radicular.

Soil compaction and the effects on soil functioning and nutrient absorption by plants: A review

ABSTRACT

Compaction is a major cause of physical degradation of agricultural soils on a global scale. The increase in soil density and the increase in the degree of compaction tend to reduce the volume of roots and interfere with the availability of nutrients to plants. Thus, this bibliographic review aimed to raise information about the effects of soil compaction on the absorption of mineral elements by plants. The data survey was carried out in the main indexing bases at national and international level. The results found demonstrate that soil compaction and flooding directly interfere with the absorption of mineral elements by plants, as they compromise the physical functioning of the soil, preventing the growth of roots. Physical stress increases the production of abscisic acid by the roots of the plants and, as a consequence, reduces the leaf area. Elements such as P and K are absorbed by plants by the diffusion process, so any change in the soil structure will reflect low availability. Among the existing gaps, there is a lack of studies on the effect of soil compaction on the subsurface and the possible implications on the absorption of nutrients and water by plants.

Keywords: Resistance to penetration, Vegetable nutrition, Root morphophysiology.

Silva, P.L.F. (2021). Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica. *Meio Ambiente (Brasil)*, v.3, n.2, p.24-33.



Direitos do Autor. A Meio Ambiente (Brasil) utiliza a licença *Creative Commons* - CC Atribuição Não Comercial 4.0 CC-BY-NC.

1. Introdução

A compactação é uma das principais causas de degradação física dos solos agrícolas em nível mundial e se caracteriza pela redução de volume de solo em um estado não saturado quando aplicada uma pressão, seja pelo uso de máquinas e implementos agrícolas ou pelo pisoteio animal (Richart et al., 2005). É um processo que apresenta inter-relações com a maioria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Bennie; Krynauw, 1985). A compactação ocasiona alterações complexas na estrutura do solo como redução na macroporosidade e condutividade hidráulica, descontinuidade de poros, aumento na resistência à penetração e diminuição na difusão de gases e água (Soane et al., 1981). Em solos compactados o desenvolvimento das plantas é menor e isto tem sido atribuído ao impedimento mecânico ao crescimento radicular, principalmente pela existência de camadas compactadas/adensadas em subsuperfície (Guimarães et al., 2002).

A redução na densidade de raízes compromete o desenvolvimento das culturas em função da baixa absorção de água e nutrientes pelas plantas (Tormena et al., 1998). Em solos compactados as plantas tendem a explorar um volume menor de solo, geralmente na camada de 0-10 cm. Freddi et al. (2007), observaram que o aumento da compactação e resistência à penetração do solo refletiu no aumento linear do diâmetro radicular e massa secas das raízes. A compactação ocasiona alterações morfológicas nas raízes das plantas, além de aumentar a razão córtex/cilindro vascular, como observado por Bergamim (2018) para a cultura do milho. Para estes autores, as mudanças nessa razão podem ter ocorrido tanto por um aumento na espessura do córtex quanto por uma redução da espessura do cilindro vascular. O córtex é uma das estruturas anatômicas das raízes mais sensíveis às modificações do ambiente, sendo provável que o aumento de espessura reflita em maior absorção de água e nutrientes pelas plantas (Bergamim, 2018).

Estudos demonstram que o valor de 2,0 MPa é o suficiente para comprometer o desenvolvimento do sistema radicular das plantas em condições inadequadas de umidade do solo (Taylor et al., 1966). Partindo do princípio de que os atributos físicos e as raízes das plantas são muito sensíveis ao aumento da resistência à penetração do solo.

Desse forma, afirma-se que os estudos sobre os efeitos da compactação do solo sobre o desenvolvimento das plantas e sua interação com a estrutura do solo são bastantes conhecidos na literatura, mas ainda existem lacunas a serem preenchidas, principalmente no que diz respeito aos efeitos da compactação abaixo da camada arável do solo. Em alguns sistemas de produção o manejo físico do solo é negligenciado em detrimento ao manejo químico, mesmo havendo interação entre eles.

Partindo do pressuposto acima destacado, o objetivo desta revisão bibliográfica foi levantar informações acerca dos efeitos da compactação do solo sobre a absorção de nutrientes pelas plantas e como específicos a) verificar as lacunas que viabilizem novos estudos; b) demonstrar cientificamente que o manejo físico do solo pode influenciar na eficiência da absorção de nutrientes pelas plantas via adubação.

2. Material e Métodos

Optou-se pela pesquisa de tipo revisão bibliográfica sistemática (Sampaio; Mancini, 2007) e as etapas foram estruturadas seguindo o proposto por Silva e Martins-Reis (2016), sendo i) Identificação do tema e seleção da questão de pesquisa; ii) Definição das informações a serem extraídas de estudos selecionados, utilizando o termo booleano AND; iii) Categorização dos estudos, interpretação dos resultados e apresentação da síntese/conhecimento.

Os artigos foram selecionados por meio das bases de dados: *Scielo*, *Science Direct*, *Wiley Online Library*, Portal de Periódicos Capes, *Google Scholar*, *Redalyc* e *Agris-FAO*, utilizando os seguintes descritores: Compactação do solo; densidade do solo; impactos negativos; grau de compactação; morfologia de raízes; subsolo; absorção de nutrientes pelas plantas; profundidade do solo; solos tropicais e subtropicais.

Na seleção dos artigos mais relevantes, optou-se por aqueles publicados em revistas com melhor

enquadramento dentro do sistema Qualis-Capes (faixa de classificação: A1 até B3), sendo o A1 o de maior impacto científico. 39 artigos, 1 tese, 3 livros, 1 boletim técnico, 3 resumos expandidos e 2 capítulos de livro foram utilizados na construção da presente revisão (n= 49). Do todo, 57,44% dos artigos selecionados foram publicados em revistas internacionais e, grande maioria com foco em solos de clima temperado.

3. Desenvolvimento

3.1 Contextualização

As práticas inadequadas de manejo do solo tendem a elevar o grau de compactação e comprometer a estabilidade estrutural. A estrutura do solo está intimamente ligada com a distribuição de raízes, absorção de água e nutrientes e produtividade das culturas (Cherubim et al., 2016; Çelic et al., 2019). Como destacado por McPhee et al. (2020), todo esse processo de compactação de solo em áreas agrícolas surgiu de uma necessidade de otimização de trabalho e aumento de produtividade de mão de obra, elevando a massa das máquinas de 3 para 35 Mg⁻¹. Contudo, o aumento na massa das máquinas ocasionou o declínio na funcionalidade do solo, oscilação nas taxas de rendimento e produtividade das culturas além de favorecer a inundação do solo em áreas agrícolas (Keller et al., 2019), principalmente se realizado em solo com elevado conteúdo de água (Raper; Kirby, 2006). Em locais inadequadamente manejados, como as áreas pastagens com excesso de lotação, o pisoteio animal tende a elevar a compactação do solo em superfície ocasionando degradação (Benevenute et al., 2020). Como observado por Sartor et al. (2020), a compactação do solo tende a aumentar em profundidade, principalmente pelo pisoteio dos animais que modificam a conformação dos agregados.

Solos degradados e com elevada resistência à penetração induz o estresse hídrico às plantas porventura da reduzida taxa de crescimento do sistema radicular e diminuição da taxa de captação de água nas camadas mais profundas (Silva et al., 2015), refletindo negativamente na produtividade. Para Benevenute et al. (2020) o impacto da compactação sobre a qualidade física do solo poderia ser previsto através de estudos sobre o intervalo de água menos limitante, também conhecido como intervalo hídrico ótimo (IHO). Esse intervalo é influenciado pela textura, estrutura, conteúdo de matéria orgânica e umidade do solo (Silva et al., 1994).

Dentro desse aspecto, as raízes das plantas apresentam papel primordial no desenvolvimento e produtividade das culturas, sendo a interação raiz/solo considerada a próxima revolução verde (Lynch, 2007). É conhecido que o sistema radicular dos vegetais apresenta estreita relação com os atributos químicos e físicos do solo, com o potencial genético da cultura e com os microrganismos (Costa et al., 2012; Kohn et al., 2020). Dessa forma, alterações na conformação das raízes pode comprometer a absorção de elementos minerais pelas plantas. Uma das formas de verificar se o solo está compactado *on-farm* é através da constatação do selamento superficial ou pelo acúmulo de água. Na Figura 1 verifica-se o efeito da compactação do solo realizada pelo pneu de trator em um Planossolo Nátrico de textura franco-arenosa (Silva et al., 2017).

Figura 1 - Selamento e acúmulo de água em Planossolo Nátrico sob a linha de rodado de um trator



Fonte - Própria (2021)

3.2 Morfologia e anatomia de raízes

A compactação do solo em subsuperfície favorece o crescimento das raízes em superfície (Gonçalves et al., 2006), tornando-as mais suscetíveis ao estresse ambiental, principalmente hídrico. A compactação reduz a macroporosidade do solo e eleva a densidade, como consequência, as raízes sofrem modificações morfológicas e fisiológicas, por vezes específicas a cada espécie ou cultivar a fim de se adaptar (Müller et al., 2001).

Gonçalves et al. (2006) avaliando o desenvolvimento do sistema radicular de várias espécies vegetais em três níveis de densidade do solo, observaram que o aumento de densidade da camada compactada refletiu em aumento de massa seca de raízes. Dentre as espécies o milheto (*Pennisetum glaucum*) destacou-se como o mais promissor para cultivo em solos compactados. Para Müller et al. (2001) em valores intermediários de densidade do solo há um aumento da superfície de contato entre a raiz e o solo, culminando em melhores condições de absorção de água e nutrientes pelas plantas, com respostas ao aumento de massa seca da parte aérea.

Foloni, Calonego e Lima (2003), avaliando os efeitos da compactação do solo sobre o desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho em um Latossolo Vermelho distroférico de textura média observaram que o aumento de densidade do solo elevou o diâmetro médio radicular das raízes e que o sistema radicular do milho não é capaz de romper uma camada de solo compactada com resistência mecânica na ordem de 1,4 MPa. Esse comportamento decorre do fato de que o alongamento do sistema radicular só é possível quando a pressão de crescimento das raízes ultrapassa à resistência mecânica do solo à penetração (Passioura, 1991). Na Figura 2 verifica-se o sistema radicular bem desenvolvido de uma Poaceae (*Brachiaria decumbes*).

Figura 2 – Demonstração do sistema radicular fasciculado de uma Poaceae (*Brachiaria decumbes*) bem desenvolvido.



Fonte – Própria (2021)

Estudos demonstram que o aumento na densidade do solo reduz significativamente o comprimento da raiz e parte aérea das plantas, com considerável aumento de diâmetro (Nadian et al., 1997). Por outro lado, a diminuição no diâmetro de poros e de raízes tende a reduzir a absorção de fósforo pelas plantas, que é um elemento imóvel no solo (Shierlaw; Alston, 1984). Os mesmos autores ainda verificaram correlação negativa entre os níveis de compactação e a concentração de fósforo na parte aérea das plantas.

Com relação ao fósforo, o aumento na absorção desse elemento é induzido pelo uso dos fungos micorrizicos arbusculares (FMA), que se mostra menos eficiente com redução na capacidade de aeração do solo (Nadian et al., 1997). A impedância mecânica diminui a taxa de divisão celular e reduz o comprimento da célula do meristema radicular, reduzindo a densidade e a profundidade de enraizamento, de forma a amenizar o estresse hídrico (Bengough et al., 2011).

A formação de aerênquima cortical radicular, redução no número de células corticais, tamanho e proliferação de pelos radiculares perto da ponta da raiz para ancoragem (Lynch; Wojciechowski, 2015), facilita o crescimento pela reduzida carga metabólica e necessidade de oxigênio e maior tolerância a hipóxia. Beltrão et al. (2003) avaliando a fisiologia da mamoneira, cultivar BRS 149 nordestina, sob estresse hídrico, verificaram que o estresse hídrico alterou significativamente a área foliar. Eles verificaram que o excesso de água no solo reduziu em mais de 26% a área foliar quando comparado a uma testemunha, cultivada em solo com boas condições de aeração.

Espécies glicófitas como a mamona (*Ricinus communis*), necessita de no mínimo 10% de oxigênio na atmosfera do solo, de forma a reduzir as alterações morfológicas e anatômicas quando submetidas ao estresse hipoxítico e anoxítico (Beltrão et al., 2009). Em condições naturais ou experimentais, as plantas podem ser submetidas à disponibilidade de O₂ que varia de teores normais (normoxia), deficiência (hipóxia) e ausência (anoxia) (Drew, 1997).

3.3 Absorção de elementos minerais pelas plantas

Assim como a química e a biologia, o conhecimento do comportamento físico do solo é primordial para entender o desenvolvimento das culturas. As alterações ocasionadas pelo manejo inadequado do solo resultam em alterações no padrão de absorção de nutrientes pelas culturas (Gurgel et al., 2020).

Para que o elemento (íon ou ânion) seja absorvido pelas plantas ele tem que estar na solução do solo e entrar em contato com as raízes das plantas. Esse contato pode ocorrer de três formas: i) interceptação radicular, nessa forma a absorção de nutrientes é proporcional à relação existente entre a superfície das raízes e a matriz sólida (Malavolta, 2006). Como a compactação tende a reduzir o crescimento das raízes, então, entende-se que quanto maior a compactação do solo, menor será a taxa de absorção de nutrientes pelo processo de interceptação radicular (Bonelli et al., 2011).

A segunda forma de absorção dos nutrientes é conhecida como fluxo de massa, processo esse caracterizado pelo movimento de um íon da fase aquosa móvel (solução do solo) para as raízes das plantas (Malavolta et al., 2006). Os elementos absorvidos por essa forma são: N, Ca, Mg, S e os micronutrientes. O terceiro processo é conhecido como difusão. Na difusão o íon se movimenta através da solução do solo em curta distância (Gurgel et al., 2020). Elementos como P e K entram em contato com as raízes das plantas através do processo de difusão (Novais et al., 2017).

Segundo Gurgel et al. (2020), a difusão é eficiente quando as condições físico-hídricas do solo se encontram adequadas para o bom desenvolvimento das plantas, do contrário haverá redução na absorção de P e K. Logo após o contato do íon com a raiz, a absorção do mineral ocorre passivamente, sem gasto energético por parte da célula (Novais et al., 2017; Gurgel et al., 2020). Contudo, quando se fala de compactação, Tiecher (2016) salienta que a mesma pode prejudicar a adsorção e absorção pelas plantas, por ocasião da redução da macroporosidade do solo (Medeiros et al., 2015).

A compactação tende a elevar a energia (potencial) de retenção de água no solo (Libardi, 2005), água essa onde está contida a maioria dos elementos essenciais para o desenvolvimento dos vegetais. Por outro lado, a compactação do solo pode trazer um benefício para o meio, que é a criação de uma barreira de impedimento para a lixiviação de elementos potencialmente tóxicos para as plantas (Campos et al., 2020). Estes autores ainda verificaram que em solos arenosos, a compactação reduz o transporte e impede a transformação de metais pesados como Pb para formas trocáveis, elevando a adsorção de esfera interna nos óxidos de Fe e Mn. No argiloso, ocorre o inverso, o estudo de Campos et al. (2020) demonstrou que houve aumento de solubilidade e redução significativa da adsorção de Pb no complexo de esfera interna da Gibbssita e Caulinita.

Beutler e Centurion (2004) avaliando o efeito da compactação e fertilização do solo na produtividade de soja, observaram que o aumento da compactação reduziu a produtividade, contudo, a fertilização contribuiu para que essa redução de produtividade fosse amenizada. Para eles, a fertilização do solo aumentou a resistência da planta ao aumento de resistência à compactação do solo. Fernandez et al. (1995), observaram que, mesmo em solo compactado, a produção de matéria seca para as partes do caule é aumentada com a fertilização, contudo, até um limite de densidade de $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$.

Quando a água e os nutrientes são fornecidos de forma adequada para as plantas, a compactação do solo em Latossolos pode diminuir o sistema radicular das culturas, principalmente soja, mas a produção ainda não é afetada, pois a raiz reduzida ainda pode fornecer água e nutrientes as partes mais jovens (Beutler; Centurion, 2004). Ou seja, os autores destacam que as raízes mais curtas das plantas são capazes de absorver os nutrientes estocados no solo através da fertilização. A redução de rendimento dos cultivos não se dá pela ausência de absorção dos nutrientes, mas sim por consequência de uma menor taxa de alongamento celular e aumento no número de células, aumentando assim o diâmetro da raiz (Benghough; Mullins, 1990).

Em solos compactados, a maior proximidade das partículas facilita a continuidade da camada de água e consequentemente a difusão de fósforo, alcançando um pico de aumento na absorção de íons pelas raízes (Oliveira et al., 1998). Contudo, para Novais e Smyth (1999), a proximidade entre as partículas reduz a distância entre o íon fosfato com as superfícies carregadas positivamente, implicando em menor quantidade de íons absorvidos pelas plantas. Em 1959, Flocker, Lingle e Vomocil, já destacavam os efeitos da deficiência de aeração na absorção de nutrientes pelas plantas, eles verificaram que a ordem de redução dos nutrientes ocorre da seguinte forma: $K > Ca > Mg > N > P$.

Rivera et al. (2019), avaliando o efeito da compactação do solo sobre as características morfofisiológicas

de diferentes genótipos de feijão comum, observaram que o aumento da densidade do solo, de 1,2 a 1,6 g cm⁻³ elevou o peso de nódulos nas raízes como também aumento do peso total e da razão raiz: parte aérea da biomassa da planta. Para Tu e Buttery (1988), o aumento inesperado no número de nódulos por plantas em 10 genótipos de feijão, em parcelas com solo altamente compactado (1,63-1,69 g cm⁻³). Eles argumentaram que a restrição severa no crescimento da raiz causou contato prolongado com o inóculo aplicado sobre a semente, promovendo assim, um aumento na taxa de nodulação. Buttery et al. (1994) sugeriu que a nodulação é provavelmente uma função do crescimento da raiz.

Além do mais, Rivera et al. (2019) verificaram que o teor de água no solo influencia diretamente a nodulação das raízes, observando-se redução no número de nódulos por planta, de 11-13% em solo franco arenoso e 23-25% em solo franco argiloso. Os autores verificaram aumento no número de nódulos em solo com umidade elevada, de 20-22% em franco-argiloso e 33-35% em solo franco argiloso.

4. Considerações finais

Existe algumas lacunas na literatura científica, principalmente no que diz respeito a estudos sobre o efeito da compactação do solo em camadas mais profundas do solo e os possíveis efeitos sobre a dinâmica de nutrientes e água no solo. Além disso, verificou-se que estudos de longa duração sobre o efeito da compactação subsuperfície nos solos tropicais sob diferentes condições de manejo são escassos. Apesar de 2,0 MPa ser utilizado como valor crítico, muitos estudos tem demonstrado que as algumas plantas cultivadas toleram faixas de valores de maior amplitude >2,5 MPa.

A compactação do solo interfere diretamente na absorção de nutrientes pelas plantas, reduz a produtividade das culturas e eleva os custos de produção. E o estresse físico ocasionado pela compactação eleva a produção de ácido abscísico pelas raízes das plantas e tem como consequência à redução na área foliar. Elementos como P e K são absorvidos pelas plantas pelo processo de difusão, então, qualquer modificação na estrutura do solo irá refletir na baixa disponibilidade.

5. Referências

- Beltrão, N.E.M., Lucena, A.M.A., Silva, G.A., Oliveira, M.I.P. (2009). Estresse hipoxítico e anoxítico em plantas de mamoneira. In: Congresso Brasileiro da Mamona, 3. **Anais**. Campina Grande: Embrapa Algodão.
- Beltrão, N.E.M., Souza, J.G., Santos, J.W., Jerônimo, J.F., Costa, F.X., Lucena, M.M.M., Queiroz, U.C. Fisiologia da mamoneira, cultivar BRS 149 Nordestina, na fase inicial de crescimento, submetida ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, 7(1): 659-664, 2003.
- Benevenute, P.A.N., Morais, E.G., Souza, A., Vasques, I.C.F., Cardoso, D.P., Severiando, E.C., Homem, B.G.C., Casagrande, D.R. & Silva, B.M. (2020). Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. **Ecological Indicators**, 117(1): e106647.
- Bennie, A.T.P. & Krynauw, G.N. (1985). Causes, adverse effects and control of soil compaction. **South African Journal of Plant and Soil**, 2(3): 109-114, 1985.
- Bergamim, A.C. (2018). **Compactação do solo em sistemas intensivos de produção**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute.
- Beutler, A.N. & Centurion, J.F. (2004). Soil compaction and fertilization in soybean productivity. **Scientia Agricola**, 61(6): 626-631, 2004.

- Bonelli, E.A., Silva, E.M.B., Cabral, C.E.A., Campos, J.J., Scaramuzza, W.L.M.P. & Polize, A.C. (2011). Compactação do solo: Efeitos nas características produtivas e morfológicas dos capins Piatã e Mombaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 15(3): 264-269, 2011.
- Buttery, B.R., Tan, C.S. & Park, S.J. (1994). The effects of soil compaction on nodulation and growth of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Canadian Journal of Plant Science**, 74(1): 287-292.
- Çelik İ., Gunal H., Acar M., Acir N., Bereket B.Z. & Budak M. (2020). Evaluating the long-term effects of tillage systems on soil structural quality using visual assessment and classical methods. **Soil Use Manage**, 36(1): 223-239, 2020.
- Cherubin, M. R., Franco, A. L. C., Guimaraes, R. M. L., Tormena, C.A., Perri, C. E. P., Karlen, D. L., & Cerri, C. C. (2017). Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil and Tillage Research**, 173(1): 64-74.
- Correa, J., Postama, J.A., Watt, M. & Wojciechowski, T. (2019). Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. **Journal of Experimental Botany**, 70(21): 6019-6034.
- Costa, C., Jr., Pícolo, M. C., Siqueira, M., Neto, Camargo, P. B., Cerri, C. C., & Bernoux, M. (2012). Carbon in soil aggregates under native vegetation, pasture and agricultural systems in the Brazilian Savannah. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36(4), 1311- 1321.
- Drew, M.C. (1997). Oxygen deficiency and root metabolism: injury and acclimation under hypoxia and anoxia. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, 48(1): 223-250.
- Fernandez, E.M., Crusciol, C.A.C., Thimoteo, C.M.S. & Rosolem, C.A. (1995). Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Científica**, 23(1): 117-132.
- Flocker, W.J., Lingle, J.C. & Vomocil, J.A. (1959). Influence of soil compaction on phosphorus absorption by tomato plants from and applied phosphate fertilizer. **Soil Science**, 88(5): 247-250.
- Foloni, J.S.S., Calonego, J.C. & Lima, S.L. (2003). Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 38(8): 947-953.
- Freddi, O.S., Centurion, J.F., Beutler, A.N., Arantani, R.G. & Leonel, C.L. (2007). Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31(3): 627-636.
- Gonçalves, W.G., Jimenez, R.L., Araújo Filho, J.V., Assis, R.L., Silva, G.P. & Pires, F.R. (2006). Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, 26(1): 67-75.
- Guimarães, C.M., Stone, L.F. & Moreira, A.A.J. (2002). Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 6(2): 213-218.

- Gurgel, A.L.C., Santana, J.C.S., Theodoro, G.F., Difante, G.S., Almeida, E.M., Arcanjo, A.H.M., Costa, C.M., Costa, A.B.G. & Fernandes, P.B. (2020). Compactação do solo: Efeitos na nutrição mineral e produtividade de plantas forrageiras. **Revista Científica Rural**, 22(1): 13-29.
- Hussain, A., Black C.R., Taylor, I.B., Roberts, J.A. (1999). Soil compaction. a role for ethylene in regulating leaf expansion and shoot growth in tomato? **Plant Physiology**, 121(1): 1227-1237.
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, 194.
- Kohn, L.S., Carducci, C.E., Barbosa, J.S., Bosco, L.C. & Rossoni, D.F. (2020). Effect of flaxseed root performance on the structural quality of a Haplumbert under conservationist management system in Santa Catarina, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, 41(6): 2523-2540.
- Libardi, P.L. (2005). **Dinâmica de água no solo**. Piracicaba: Editora da Universidade de São Paulo.
- Malavolta, E. (2006). **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres.
- McPhee, J.E., Antille, D.L., Tullberg, J.N., Doyle, R.B. & Boersma, M. (2020). Managing soil compaction – A choice of low-mass autonomous vehicle or controlled traffic? **Biosystem Engineering**, 195(1): 227-241.
- Medeiros, R.D., Soares, A.A., Guimarães, R.M. (2005). Soil compaction and water management. I: effects upon uptake of N, P, K, root and shoot dry matter of rice plants. **Ciência e Agrotecnologia**, 29(5): 940-947.
- 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.
- Nadian, H., Smith, S.E., Alston, A.M. & Murray, S.R. (1997). Effects of soil compaction on plant growth, phosphorus uptake and morphological characteristics of vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization of *Trifolium subterraneum*. **New Phytologist**, 135(2): 303-311.
- Novais, R.F. & Smyth, T.J. (1999). **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999.
- Novais, R.F., Alvarez, V.H. & Barros, N.F. (2007). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Oliveira, C.V., Bahia, V.G. & Paula, M.B. (1998). **Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle**. Belo Horizonte: EPAMIG.
- Passioura, J.B. (1991). Soil structure and plant growth. **Australian Journal of Soil Research**, 29(1): 717-728.
- Passioura, J.B. (2002). Soil conditions and plant growth. **Plant, Cell & Environment**, 25(1): 311–318.
- Raper, R. L., & Kirby, J. M. (2006). **Soil compaction: How to do it, undo it, or avoid doing it**. **ASAE Distinguished Lecture 30**. In Agricultural Equipment Technology Conference, 1. Annals, Louisville: ASABE Publication.

- Richart, A., Tavares Filho, J., Brito, O.R., Llanillo, R.F. & Ferreira, R. (2005). Soil compacting: Causes and effects. **Semina: Ciências Agrárias**, 26(3): 321-344.
- 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**, 19:217–227.
- Sampaio, R.F. & Mancini, M.C. (2007). Estudos de revisão sistemática: Um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, 11(1): 83-89.
- Sartor, L.R., Romão, J., Silva, V.P., Cassol, L.C. & Brun, E.J. (2020). Resistência mecânica do solo à penetração em sistema silvipastoril após onze anos de implantação. **Ciência Florestal**, 30(1): 231-241.
- Shierlaw, J., Alston, A.M. (1984). Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant Soil**, 77(10): 15-28.
- Silva, A.A.M., Martins-Reis, V.O. (2016). Influência da consistência morfológica na leitura e na escrita: Uma revisão sistemática de literatura. **CoDAS**, 29(1): 1-8.
- Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E. (1994). Characterization of the Least Limiting Water Range of soils. **Soil Science Society**, 58, 1775-1781.
- Silva, B.M., dos Santos, W.J.R., de Oliveira, G.C., de Lima, J.M., Curi, N., Marques, J.J. (2015). Soil Moisture space-time analysis to support improved crop management. **Ciência e Agrotecnologia**, 39(1): 39-47.
- Soane, B.D. (1986). Process of soil compaction under vehicular traffic and means of alleviating it. In Lal, R., Sanchez, P.A. & Cummings, R.W (Eds.). **Land clearing and development in the tropics** (pp. 265-297). Rotterdam: Balkema Publisher.
- Silva, P.L.F., Oliveira F.P. de., Tavares, D.D., Nóbrega, C.C., Amaral, A.J. (2017). Water Availability in a Planosol under integrated crop-livestock-forestry system in the Agreste region of Paraíba, Brazil. **Revista Caatinga**, 32(2): 449-457.
- Taylor, H.M., Roberson, G.M. & Parker Junior, J.J. (1966). Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-texture soil materials. **Soil Science**, 102(1): 18-22.
- Tiecher, T. (2016). **Manejo e conservação do solo e água e em pequenas empresas rurais no sul do Brasil: Práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. [Tese]. Porto Alegre: UFRGS.
- Tormena, C.A., Silva, A.P. & Libardi, P.L. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22(2): 573-581.
- Tu, J.C. & Buttery, B.R. (1988). Soil compaction reduces nodulation, nodule efficiency, and growth of soybean and white bean. **Horticultural Science**, 23(3):722–724.