

# ***MUDANÇAS NA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE SOLOS COMPACTADOS EM FUNÇÃO DO FLUXO DE ÁGUA AVALIADO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA***

**Palavras-Chave:** Solos compactados, Resistência à penetração, Simulação numérica

**Autor:** Leonardo Rodrigues dos Santos - SOMAP - FEAGRI

**Orientador:** Prof. Dr. Renato Paiva de Lima - SOMAP - FEAGRI

**Coorientador:** Dr. Diego Alexander Aguilera Esteban - FEAGRI

---

## **INTRODUÇÃO:**

As raízes absorvem água e nutrientes, fixam a planta ao solo e, em alguns casos, armazenam reservas, como em cenoura e batata-doce. O solo, sendo o meio natural das raízes, pode impor resistência mecânica à sua expansão, caracterizando estresse mecânico (Kolb et al., 2017), que limita o desenvolvimento da planta. Esse estresse é influenciado por atributos físicos do solo, como densidade e teor de água, que afetam sua resistência à penetração (Clark et al., 2003). A movimentação da água regula diversas limitações físicas, incluindo a resistência à penetração (Farthing & Ogden, 2017). Apesar de ser possível avaliar o fluxo de ar e água em camadas isoladas, a compactação de camadas adjacentes dificulta essa análise, devido à conectividade entre elas. A drenagem das camadas superiores alimenta as inferiores, sendo governada pela condutividade e retenção de água (Farthing & Ogden, 2017). Como a resistência do solo diminui com o aumento do teor de água, o tempo de drenagem afeta diretamente essa resistência.

A equação de Richards descreve o fluxo de água, sem solução analítica, mas pode ser resolvida numericamente (Simunek et al., 2005). Softwares multifísicos permitem simular a dinâmica da água e a resistência do solo em camadas com baixa permeabilidade, como as compactadas, a partir de seus parâmetros hidráulicos. O objetivo desse estudo foi avaliar, por meio de simulação numérica, as mudanças na resistência do solo à penetração em função do fluxo de água em perfis com camadas compactadas.

## METODOLOGIA:

A amostragem de solo deste estudo foi realizada nas dependências da Usina Cerradão, localizada no município de Frutal, Minas Gerais (19°56'41" de latitude sul e 49°07'30" de longitude oeste). Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas em quatro repetições, utilizando cilindros metálicos (0,05 m de altura e diâmetro) e um trado, respectivamente. Um conjunto de amostras foi obtido na linha de plantio, enquanto outro foi coletado na entrelinha, representando zonas compactadas e não compactadas. As coletas ocorreram na camada de 0-10 cm de profundidade. No total, foram coletadas seis amostras para cada posição. Destas, três foram destinadas à caracterização da curva de retenção de água no solo, e três foram utilizadas para a medição da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_s$ ) (Tabela 1).

As análises laboratoriais também incluíram a determinação da granulometria pelo método da pipeta e da densidade de partículas pelo método do balão volumétrico (Gree & Or, 2002) (Tabela 1). As amostras indeformadas foram saturadas e equilibradas em diferentes potenciais mátricos (10 a 15000 hPa) para a determinação da densidade e porosidade do solo. A condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) foi medida pelo método da carga variável, utilizando o sistema KSAT. Os dados de potencial mátrico e conteúdo de água foram ajustados ao modelo de van Genuchten (1980) para obtenção da curva de retenção de água (conforme a Tabela 2), com os parâmetros ajustados por meio do pacote R "soilphysics". A curva de resistência à penetração ( $Q_p$ ) foi obtida conforme os modelos propostos por Faustino & Marciano (2021), seguindo  $Q_p = aDS^b w^c$ . Esses modelos permitem estimar a resistência à penetração a partir do conteúdo de água gravimétrico ( $w$ ) e densidade do solo (DS), após a elaboração do modelo numérico.

**Tabela 1.** Caracterização granulométrica, densidade do solo e densidade de partículas em área de cana-de-açúcar na usina Cerradão.

	DS (Mg m <sup>-3</sup> )	Dp (Mg m <sup>-3</sup> )	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Linha	1,22	2,56	63	7	30
Entrelinha	1,42	2,56	63	7	30

**Tabela 2.** Parâmetros da curva de retenção ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  e  $n$ ) e condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_s$ ) em área de cana-de-açúcar na usina Cerradão.

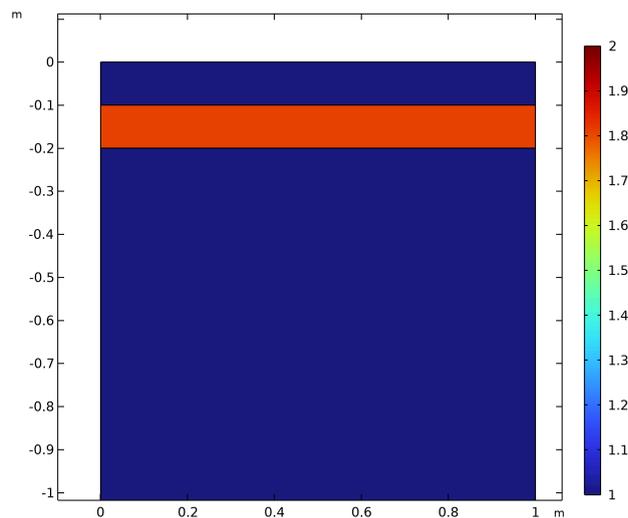
	$\theta_s$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\theta_r$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	$\alpha$ (hPa <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$K_s$ (cm/d)
Linha	0.527	0.041	0.079	1.246	201
Entrelinha	0.450	0.000	0.032	1.161	7

O modelo numérico foi desenvolvido no software COMSOL Multiphysics, com base na solução da equação de Richards, para simular o fluxo de água em cenários com e sem camada compactada. Os dados obtidos na entrelinha foram utilizados para caracterizar o perfil com compactação, enquanto os dados da linha de plantio representaram o solo em condição não compactada. A geometria do modelo e os parâmetros hidráulicos foram definidos a partir das curvas de retenção de água obtidas em laboratório. A resistência do solo à penetração foi estimada com base nos modelos empíricos propostos por Faustino & Marciano (2021), usando o modelo obtido para o solo com aproximadamente 30% de argila (LVAd), conforme  $Q_p = 0,225DS^{5,618}w^{-0,157}$ . As simulações permitiram avaliar a dinâmica da água no perfil e suas implicações sobre a resistência ao longo do tempo, com resultados obtidos para 10 dias de fluxo contínuo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A compactação na entrelinha, resultante do tráfego intenso de máquinas e implementos agrícolas no cultivo de cana-de-açúcar, provocou um aumento na densidade do solo ( $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ ) em comparação com a linha de plantio ( $1,22 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Esse processo de compactação reduz a porosidade do solo, o que limita a infiltração e a retenção de água, e a dinâmica da aeração do solo, conforme descrito por Simunek et al. (2005). Estudos como os de Horn et al. (2000) demonstram que a compactação altera a estrutura dos poros, aumentando a resistência mecânica e reduzindo a condutividade hidráulica, especialmente em solos sob tráfego intenso. Adicionalmente, Bengough et al. (2011) destacam que a compactação cria barreiras físicas ao crescimento radicular, limitando o acesso à água e nutrientes, o que corrobora os resultados observados neste estudo.

Os efeitos dessa compactação são evidentes, com uma umidade de saturação ( $\theta_s = 0,450 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e uma condutividade hidráulica saturada ( $K_s = 7 \text{ cm/d}$ ) consideravelmente mais baixas na entrelinha devido à redução do sistema poroso, em contraste com os valores na linha ( $K_s = 201 \text{ cm/d}$ ), onde não há ação do rodado.



**Figura 1.** Resistência do solo à penetração (kPa) em perfil de solo de 1 m de largura e 1 m de profundidade, com presença de camada compactada após 10 dias de fluxo contínuo simulados no COMSOL MULTIPHYSICS.

Resistência do solo à penetração (kPa) em perfil de solo de 1 m de largura e 1 m de profundidade, com presença de camada compactada após 10 dias de fluxo contínuo simulado no COMSOL Multiphysics. As simulações demonstraram que a camada compactada apresenta o dobro da resistência à penetração (2 MPa) em relação ao perfil não compactado (1 MPa), evidenciando o impacto significativo da compactação nas propriedades físicas do solo. Esses resultados corroboram observações de campo, onde camadas compactadas criam barreiras ao desenvolvimento radicular e ao fluxo hídrico no perfil do solo.

## CONCLUSÕES:

O tráfego intensivo de máquinas na entrelinha do canal elevou significativamente a densidade do solo (1,42 vs 1,22 Mg m<sup>-3</sup>) e reduziu drasticamente a condutividade hidráulica (7 vs 201 cm/d), comprometendo a dinâmica hídrica e aeração. As simulações no COMSOL comprovaram que a camada compactada apresenta resistência à penetração duas vezes maior (2 MPa) que o solo não compactado (1 MPa), criando uma barreira física crítica. Esses resultados demonstram que a compactação induzida pelo manejo agrícola altera profundamente as propriedades físicas do solo, limitando processos hidrológicos no perfil.

## BIBLIOGRAFIA

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. **Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses.** Journal of Soil Science, v. 41, n. 3, p. 341-358, 2011.

CLARK, L. J.; WHALLEY, W. R.; BARRACLOUGH, P. B. **How do roots penetrate strong soil?** Plant and soil, v. 255, n. 1, p. 93-104, 2003.

FARTHING, M. W.; OGDEN, F. L. **Numerical solution of Richards' equation: A review of advances and challenges.** Soil Science Society of America Journal, v. 81, n. 6, p. 1257- 1269, 2017.

FAUSTINO, L. L.; MARCIANO, C. R. **Intervalo hídrico ótimo e valores críticos de densidade como indicadores de recuperação de um solo sob sistemas florestais e pasto.** Ciência Florestal, v. 31, n. 2, p. 658-682, 2021.

GEE, G. W.; OR, D. **2.4 Particle-size analysis. Methods of soil analysis: Part 4 physical methods,** v. 5, p. 255-293, 2002.

HORN, R.; DOMŻŻŁ, H.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. **Impact of machinery traffic on soil pore characteristics.** Soil and Tillage Research, v. 55, n. 1-2, p. 63-76, 2000.

KOLB, E.; LEGUÉ, V.; BOGEAT-TRIBOULET, M. B. **Physical root–soil interactions.** Physical Biology, v. 14, n. 6, p. 065004, 2017.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; SEJNA, M. **HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 3.0, HYDRUS software series 1.** Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, 2005.

VAN GENUCHTEN, M. T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Science Society of America Journal, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.