EVOLUÇÃO NA ANÁLISE DE DADOS DE PENETROMETRIA NAS LAVOURAS BRASILEIRAS

Felipe Victorino da Silva[1]; Albertina Radtke Wieth[2]; Marcio Albuquerque Moreira da Silva[3]; André Luis Vian[4]

[1] Especialista de produto na Falker Automação Agrícola, Mestrando no Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – felipe.victorino@falker.com.br;

[2] Especialista de produto na Falker Automação Agrícola, Doutora em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – albertina@falker.com.br;

[3] CEO da Falker Automação Agrícola – marcio@falker.com.br;

[4] Professor, Faculdade de Agronomia, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – andre.vian@ufrgs.br .

Resumo

A compactação do solo constitui um importante limitante à produtividade agrícola no Brasil, comprometendo processos essenciais como infiltração de água, desenvolvimento radicular e a absorção de nutrientes. Historicamente, sua avaliação em campo esteve restrita a análises pontuais e pouco padronizadas, o que dificultava uma leitura mais ampla de sua distribuição espacial e de sua evolução ao longo do tempo. Nos últimos anos, no entanto, a crescente adoção de penetrômetros digitais tem permitido transformar essa avaliação em um processo cada vez mais sistemático, georreferenciado e orientado por dados. A presente nota técnica busca apresentar essa trajetória, analisando a evolução do volume e da distribuição das medições de resistência à penetrações realizadas nas lavouras brasileiras entre janeiro de 2020 e agosto de 2026, período em que o banco de dados do equipamento acumulou mais de 1,1 milhão de medições em lavouras brasileiras.

Introdução

A agricultura de precisão (AP) fundamenta-se na gestão da variabilidade espacial e temporal da lavoura para orientar intervenções localizadas dentro do talhão (MOLIN et al., 2015). Contudo, mapear a fertilidade química e a produtividade são apenas parte do diagnóstico. A variabilidade da estrutura do solo também se manifesta de maneira expressiva.

Nesse contexto, Richart *et al*. (2005) e Reis *et al*. (2022), destacam a importância da avaliação dos atributos físicos do solo, uma vez que limitações dessa natureza frequentemente reduzem o potencial produtivo mesmo em áreas nas quais a fertilidade química e o manejo fitossanitário se encontram adequadamente conduzidos. A compactação do solo destaca-se como um dos principais fatores físicos de importância agronômica. Conceituado por Machado (2003), como a redução do volume não saturado do solo e de sua porosidade, sobretudo dos macroporos, esse fenômeno decorre de pressões externas exercidas principalmente pelo tráfego de máquinas, pela realização de operações mecanizadas em condições inadequadas de umidade e pelo histórico de preparo do solo.

Em sistemas agrícolas intensivos, esse processo pode ser agravado pela repetição de operações de preparo de solo sempre nas mesmas camadas e pela ausência de estratégias consistentes de conservação e estruturação do perfil (STEFANOSKI *et al*., 2013). Como consequência, o solo passa a

oferecer maior resistência ao crescimento radicular, reduzindo a exploração de camadas mais profundas e comprometendo processos essenciais, como a infiltração de água, as trocas gasosas, a atividade biológica e a absorção de água e nutrientes (Figura 1).



Figura 1 *- Representação gráfica de um solo com camada subsuperficial compactada apresentando baixa infiltração (A) e um solo bem estruturado com boa infiltração, permeabilidade e aeração (B).*

Entre os métodos disponíveis para avaliar a compactação, a penetrometria destaca-se pela praticidade e ampla utilização no campo. O método mede a resistência mecânica do solo à penetração (RP) de uma haste cônica, refletindo o impedimento físico ao crescimento radicular. Embora a RP seja influenciada por fatores como umidade, textura e estrutura do solo, ela se consolida como um indicador em tempo real e bastante útil para identificar camadas adensadas e apoiar a tomada de decisão agronômica.

Neste cenário é que se insere o penetroLOG, penetrômetro digital desenvolvido pela Falker Automação Agrícola. Ao padronizar a medição digital até 60 cm de profundidade e georreferenciar cada ponto amostrado, a ferramenta integra a lógica da AP para mapear a distribuição espacial, a profundidade e a intensidade da compactação. Na prática, essa abordagem supera avaliações subjetivas e detecta restrições subsuperficiais críticas (faixa de 30 a 60 cm), orientando intervenções localizadas de manejo e evitando tanto a omissão do problema quanto a realização de operações desnecessárias em áreas sem restrição física.

No âmbito do manejo agrícola, os dados gerados pelo penetroLOG podem subsidiar decisões relacionadas à necessidade e à viabilidade de intervenções mecânicas, como escarificação ou subsolagem, bem como ajustes no sistema de tráfego, na escolha de plantas de cobertura e na adoção de práticas conservacionistas voltadas à melhoria estrutural do solo. Em vez de assumir a compactação como um problema uniforme em toda a lavoura, a AP permite delimitar zonas com maior ou menor restrição física, favorecendo intervenções mais racionais.

Além disso, o acompanhamento sistemático da resistência do solo ao longo das safras possibilita construir um histórico técnico da área, permitindo avaliar a evolução da condição física do perfil e a efetividade das práticas de manejo adotadas.

Difusão tecnológica

Avaliando o banco de dados da Falker, é possível observar o processo de difusão da tecnologia de penetrometria digital nas lavouras brasileiras (Figura 2). A partir da segunda geração do penetroLOG, lançado em 2020, os dados ficam centralizados online. Ao todo, o

banco de dados acumula mais de 1,67 milhão de medições registradas ao redor do mundo, totalizando 1,1 milhão de análises no Brasil, sendo destas, 876.561 medições completas do perfil do solo até 60 centímetros. Os dados observados evidenciam a crescente adesão à ferramenta de diagnóstico de resistência à penetração por parte de produtores e de prestadores de serviços de AP.

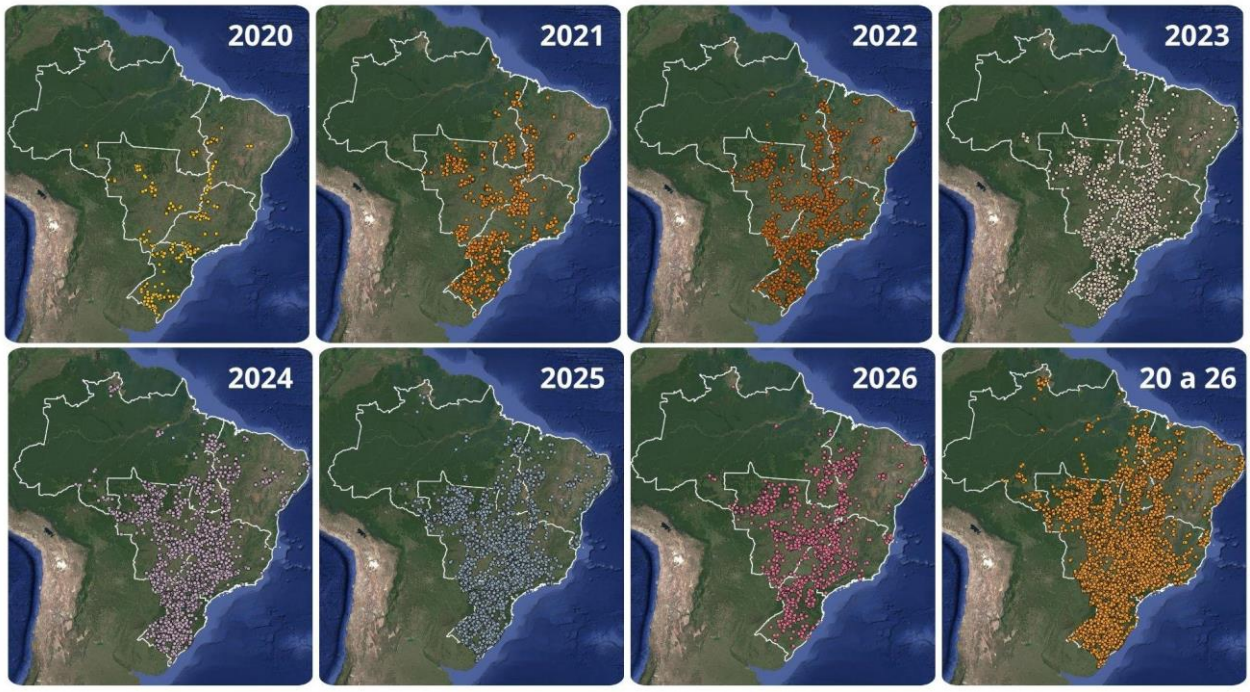
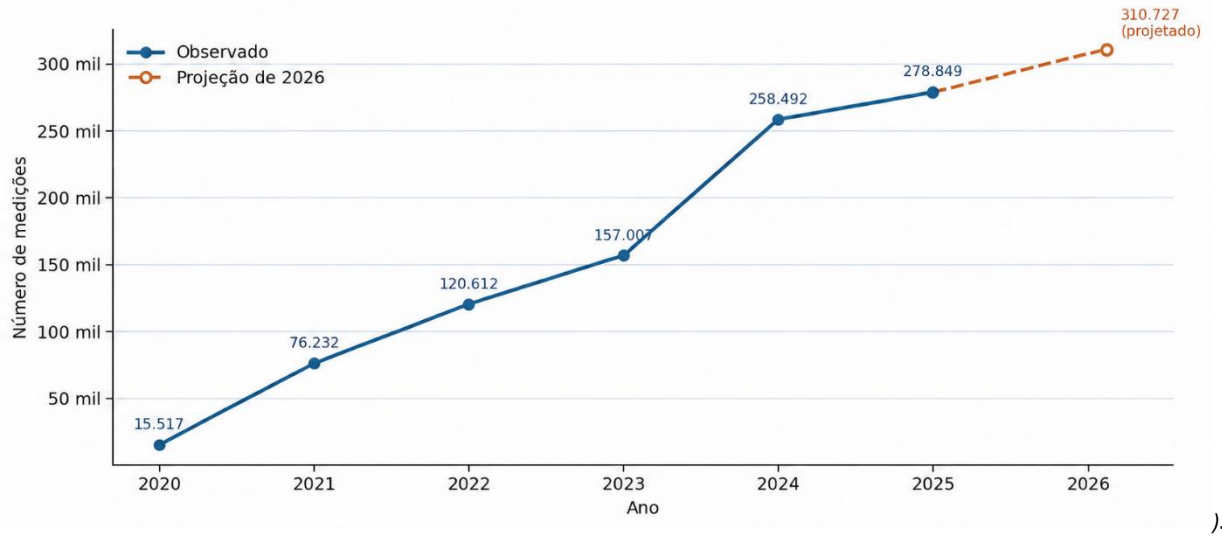


Figura 2 - *Variabilidade temporal das análises de Resistência à Penetração (RP) do solo*

No primeiro ano de registro da base de dados utilizada (2020), foram contabilizadas 15.517 medições em todo o Brasil. Cinco anos depois, em 2025, esse número já ultrapassava 270 mil medições anuais, com expectativa de que 2026 encerre com mais de 300 mil registros (Tabela 1).

Tabela 1 *- Crescimento anual das medições de resistência à penetração do solo (RP*



).

Vantagens e limitações

A adoção da penetrometria digital, exemplificada pelo uso do penetroLOG, apresenta vantagens claras em relação a métodos tradicionais de avaliação da compactação do solo, como a inspeção visual do perfil, a abertura de trincheiras ou o uso de penetrômetros manuais sem registro eletrônico, na medida em que o registro digital da resistência à penetração reduz a subjetividade da leitura e permite comparações consistentes entre pontos, talhões e safras. O georreferenciamento associado a cada leitura possibilita o mapeamento espacial da compactação e a identificação de zonas de manejo diferenciado, enquanto a resolução em profundidade do equipamento, que registra a resistência ao longo de todo o perfil avaliado, permite localizar com precisão a camada compactada, em vez de apenas confirmar sua existência.

Contudo, a técnica apresenta limitações que exigem atenção na amostragem. Como a resistência à penetração é altamente sensível ao teor de água no solo, as leituras devem ser realizadas em condições de umidade padronizadas ou próximas à capacidade de campo para evitar diagnósticos equivocados. Além disso, por se tratar de uma medição pontual, é fundamental realizar um número adequado de amostragens para garantir a representatividade estatística e espacial dos dados dentro do talhão.

Padrão nacional de resistência à penetração ao longo do perfil do solo

Como primeiro retrato estatístico da base de dados, a Figura 3 apresenta o perfil vertical da resistência à penetração (RP) no Brasil, considerando 876.561 perfis registrados entre 2020 e 2025 e entre janeiro e agosto de 2026. A linha central representa a mediana da RP em cada centímetro de profundidade, enquanto a faixa sombreada corresponde ao intervalo entre o primeiro e o terceiro quartis (Q1–Q3), abrangendo os 50% centrais das observações.

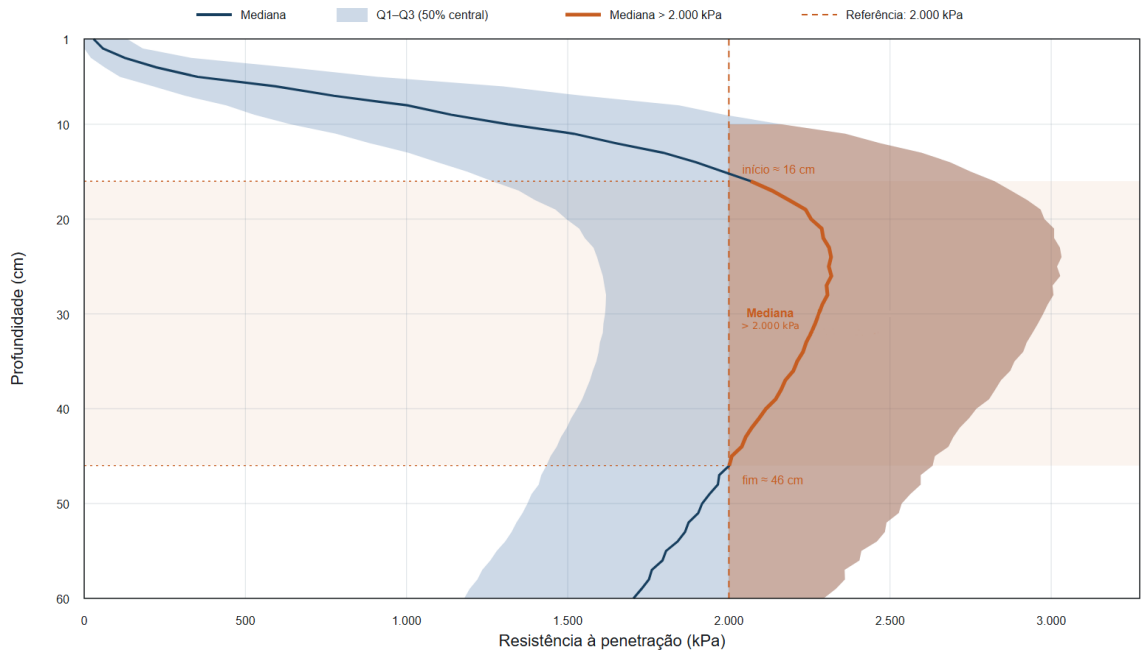


Figura 3 - *Perfil vertical da resistência à penetração no Brasil, representado pela mediana e pelo intervalo interquartil (Q1–Q3) em cada centímetro de profundidade, considerando 876.561 perfis registrados entre 2020 e 2025 e entre janeiro e agosto de 2026.*

Na camada superficial, os valores de RP são baixos, a partir de aproximadamente 10 cm, observa-se aumento acentuado da resistência, alcançando 1.314 kPa a 10 cm, 1.982 kPa a 15 cm e 2.255 kPa a 20 cm. O maior valor mediano ocorre próximo a 26 cm, atingindo 2.318 kPa. Considerando 2.000 kPa como um valor de referência frequentemente utilizado para indicar possível restrição ao crescimento radicular, observa-se que a mediana permanece acima desse limite aproximadamente entre 16 e 46 cm de profundidade. Esse comportamento sugere que, no conjunto nacional analisado, a maior resistência à penetração se concentra principalmente na subsuperfície, entre 20 e 40 cm.

A amplitude dos quartis, entretanto, demonstra que esse comportamento não é uniforme entre os perfis avaliados. A aproximadamente 26 cm, por exemplo, o primeiro quartil apresenta RP de 1.609 kPa, enquanto a mediana alcança 2.318 kPa e o terceiro quartil chega a 3.028 kPa. Isso significa que existe uma ampla variabilidade entre as áreas: os 25% dos perfis com menores valores de RP apresentam condições relativamente menos restritivas, enquanto os 25% com maiores valores estão sujeitos a resistências bastante elevadas.

O primeiro quartil também indica que a condição de menor resistência não se mantém ao longo de todo o perfil. Em torno de 20 cm, seu valor é próximo de 1.500 kPa; entre aproximadamente 21 e 41 cm, porém, o primeiro quartil permanece acima desse valor. Assim, mesmo entre os 25% dos perfis com menor resistência, observa-se uma faixa subsuperficial na qual a RP pode representar uma limitação física relevante. Por outro lado, o terceiro quartil permanece acima de 2.000 kPa entre aproximadamente 10 e 60 cm, indicando que pelo menos um quarto dos perfis apresenta valores superiores ao limite de referência em praticamente todo esse intervalo.

A concentração dos maiores valores de resistência à penetração entre aproximadamente 20 e 30 cm pode estar relacionada à formação de uma camada compactada em subsuperfície. Esse padrão é compatível com a ocorrência de camadas de adensamento associadas ao tráfego repetido de máquinas agrícolas e à realização de operações de preparo em profundidades semelhantes, fenômeno frequentemente denominado “pé-de-arado” ou “pé-de-grade”. A menor resistência observada nas camadas superficiais pode estar relacionada ao revolvimento do solo, à maior presença de matéria orgânica e à atividade radicular e biológica, enquanto a camada situada abaixo da zona de mobilização permanece mais sujeita ao adensamento.

Considerações finais

A evolução observada no volume e na distribuição espacial das medições realizadas com o penetroLOG reflete uma transformação relevante na forma como a compactação do solo tem sido diagnosticada nas lavouras brasileiras. O que antes se restringia, em grande parte, a avaliações pontuais e pouco padronizadas, passou a ser tratado como um fenômeno espacialmente mensurável, apoiado por dados georreferenciados e sistematicamente armazenados.

A crescente adesão de produtores e prestadores de serviço à penetrometria digital, evidenciada pelo acúmulo de mais de 876 mil pontos amostrados em todas as macrorregiões do país, indica não apenas a maturidade tecnológica da ferramenta, mas também uma mudança de postura do setor produtivo em direção a um manejo cada vez mais orientado por dados. A concentração ainda maior das leituras nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste sugere, contudo, que há espaço significativo para expansão do uso da tecnologia nas regiões Norte e Nordeste, acompanhando a intensificação da agricultura mecanizada nessas áreas.

Do ponto de vista técnico, a consolidação desse tipo de diagnóstico representa um passo importante para a agricultura de precisão no Brasil, na medida em que permite converter um fator limitante historicamente subestimado em uma variável concreta, passível de mapeamento, monitoramento e correção direcionada. À medida que o volume de dados coletados

continua a crescer, abre-se também a possibilidade de análises mais robustas em escala regional e nacional, incluindo a construção de indicadores de referência por tipo de solo, cultura e sistema de manejo, fortalecendo ainda mais o papel da penetrometria digital como instrumento estratégico para a sustentabilidade e a produtividade da agricultura brasileira.

Referências

MACHADO, P. L. O. de A. Compactação do solo e crescimento de plantas: como identificar, evitar e remediar. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 18 p. (Documentos / Embrapa Solos, 56).

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. Agricultura de precisão. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 238 p.

REIS, L. S. et al. Compactação do solo: uma visão agronômica e ambiental. Research, Society and Development, v. 11, n. 5, e40011528487, 2022.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul./set. 2005.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. Computers and Electronics in Agriculture. v. 99, 2013.

SCUDIERO, E.; TEATINI, P.; MANOLI, G.; BRAGA, F.; SKAGGS, T. H.; MORARI, F. Workflow to Establish Time-Specific Zones in Precision Agriculture by Spatiotemporal Integration of Plant and Soil Sensing Data. Agronomy, v. 8, 11, 2018.

SOBJAK, R.; SOUZA, E. G. De; BAZZI, C. L.; HACHISUCA, A. M. M. AgDataBox-Map - A web application for creating thematic maps and management zones: users' evaluation. Caderno Pedagógico. v. 21, 12, 2024.

VALENTE, D. S. M.; PEREIRA, G. W.; DE QUEIROZ, D. M.; ZANDONADI, R. S.; AMARAL, L. R.; BOTTEGA, E. L.; COSTA, M. M.; FREITAS COELHO, A. L.; GRIFT, T. Accuracy of Various Sampling Techniques for Precision Agriculture: A Case Study in Brazil. Agriculture, v. 14, 12, 2024