

CUSTOMIZAÇÃO DE UM TOMÓGRAFO DE ESPALHAMENTO DE RAIOS- γ PARA ESTUDOS DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA COMPACTAÇÃO DE SOLOS EM ÁREAS DE CULTIVO

PAULO ESTEVÃO CRUVINEL¹

¹Doutor, Embrapa Instrumentação, paulo.cruvinel@embrapa.br

Apresentado no
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

RESUMO: A compactação do solo causa redução substancial na produtividade e sempre trouxe grande preocupação para os agricultores. Este artigo apresenta um tomógrafo customizado que utiliza a técnica de espalhamento Compton para a análise da variabilidade espacial da compactação do solo em área de cultivo agrícola. Os resultados mostraram que tal desenvolvimento permite não apenas medições não invasivas da compactação do solo, mas também seu mapeamento. Um algoritmo de computador embarcado é usado para controlar toda a automação do sistema, ou seja, incluindo a operação de um detector de raios X de deriva de silício para aquisição de dados e reconstrução de imagens. Além disso, foi realizada uma validação agrícola para avaliar a variabilidade espacial da compactação do solo em kg.m^{-3} , comprovando ser possível a análise da variabilidade espacial da compactação do solo diretamente no campo.

PALAVRAS-CHAVE: compactação de solos, variabilidade espacial, tomografia de Raios- γ .

CUSTOMIZATION OF AN X-RAY SCATTERING TOMOGRAPH FOR STUDYING THE SPATIAL VARIABILITY OF SOIL COMPACTION IN CULTURE AREAS

ABSTRACT: Soil compaction causes substantial reduction in productivity and has always been of great concern for farmers. This article presents a customized Compton scattering tomograph for the spatial variability of soil compaction analysis into agricultural crop area. The results shown that such a development allow not only non-invasive measurements of soil compaction but also its mapping. An embedded computer algorithm is used to control the whole system's automation, i.e., including the operation of a silicon drift X-ray detector for data acquisition, and image reconstruction. Further, an agricultural validation was conducted for evaluating the spatial variability of soil compaction in kg.m^{-3} , proving to be possible the spatial variability of soil compaction analysis directly on the field.

KEYWORDS: soil compaction, spatial variability, γ -Ray tomography.

INTRODUÇÃO: A tomografia computadorizada pode fornecer informações detalhadas para fins de diagnósticos sobre o comportamento de variáveis físicas de solos agrícolas. O uso da tomografia na agricultura teve início na década de 1980, baseado principalmente na tomografia de transmissão e focado na investigação do teor de água (cm^3/cm^3), densidade e compactação do solo (g/cm^3), bem como a porosidade do solo (%) (CRESTANA et al., 1985; CRUVINEL et al., 1990; PEDROTTI et al., 2003; BERALDO et al., 2014).

Adicionalmente, em 2006 foi apresentado o primeiro tomógrafo de espalhamento Compton de laboratório para fins agrícolas, operando com resolução espacial de 2 mm e com fontes radioativas de 662 keV (^{137}Cs) e 59,6 keV (^{231}Am), para medições de densidade e conteúdo de água no solo respectivamente (CRUVINEL & BALOGUN, 2006).

Em 2011, uma evolução instrumental baseada em espalhamento Compton de um densitômetro de campo com fonte de raios X e processamento digital de sinal para medir a densidade de solos aráveis foi apresentado (CRUVINEL & SCANNAVINO JUNIOR, 2011).

Na última década, avanços de conhecimentos sobre sensores e computação inteligente têm oportunizado novas tecnologias para atender os paradigmas do manejo baseado em técnicas da agricultura de precisão. Inserido neste contexto, este trabalho tem por objetivo apresentar a customização de um tomógrafo de espalhamento para estudos da variabilidade espacial de compactação de solos agrícolas diretamente em áreas de lavoura. Após esta introdução, segue-se com material e métodos, considerando os principais aspectos e em seguida com resultados e discussões, bem como com as conclusões e considerações finais.

MATERIAL E MÉTODOS: Para a customização instrumental foi considerado o uso de uma mesa de coordenadas (XYZ) construída em alumínio, controlada por conjunto de três motores de passo e automatização com eletrônica e algoritmos embarcados. Toda a estrutura é sustentada por três pés reguláveis, sendo dois em cada extremidade do quadro da mesa de coordenadas e um centralizado no lado oposto para facilitar o nivelamento. À mesa, foi acoplado o conjunto de fonte de Raios- γ e um detector de estado sólido de alta performance (Figura 1).

O posicionamento do detector é estabelecido a partir da seleção do ângulo de espalhamento, que determina a seção de choque Klein-Nishina e a energia dos fótons espalhados. Para este trabalho foi utilizado um ângulo fixo de 90° . Além disso, foram ensaiados colimadores com diâmetros de 2 mm, 4 mm e 10 mm tanto na frente da fonte de Raios- γ como na frente do detector, de forma a se estabelecer um volume de interseção do campo de visão para a varredura estabelecida pelo par de coordenadas (X, Y).

Foi utilizado um detector comercial de estado sólido de alta eficiência (*Silicon-Drift-Detector* – SDD) e considerado o fato de que para medidas de espalhamento de fótons a fonte e o detector devem estar localizados do mesmo lado em relação à amostragem a ser realizada. Dessa forma, não há necessidade de abertura de trincheiras para análise de solo, como é necessário quando se utiliza a técnica tomográfica de transmissão.

Esse detector tem um transistor de efeito de campo externo discreto (FET) e usa um capacitor de realimentação dedicado que permite operar com estabilidade permitindo medidas e resposta em energia mais precisas (WANG et al., 2023).

Para a reconstrução das imagens foi utilizado um algoritmo de retroprojeção filtrada (FBP).

Nas medidas por espalhamento (processo Compton) o número de fótons é dado por:

$$dS = \varphi_0 \exp\left(\int_{x_1} \mu_1 dx\right) \frac{d\sigma^{KN}}{d\Omega} \rho \cdot \frac{N_A Z \xi t}{A} \exp\left(\int_{x_2} \mu_2 dx\right) dV d\Omega \quad (1)$$

em que:

dS – número final de fótons espalhados

μ_1 e μ_2 - coeficientes de atenuação linear, tanto para a energia de incidência como para de dispersão respectivamente

$d\sigma^{KN}/d\Omega$ - seção transversal diferencial de Klein-Nishina

t - tempo de contagem em segundos

ξ - eficiência na contagem de fotopicos do detector na energia do fóton espalhado

x_1 e x_2 - comprimentos dos caminhos do fóton da fonte para o volume de solo e do centro de dispersão até o detector respectivamente

ϕ_0 - fluxo de fótons incidente de energia E_0

ρ - densidade do solo

A - número de massa

N_A - número de Avogadro

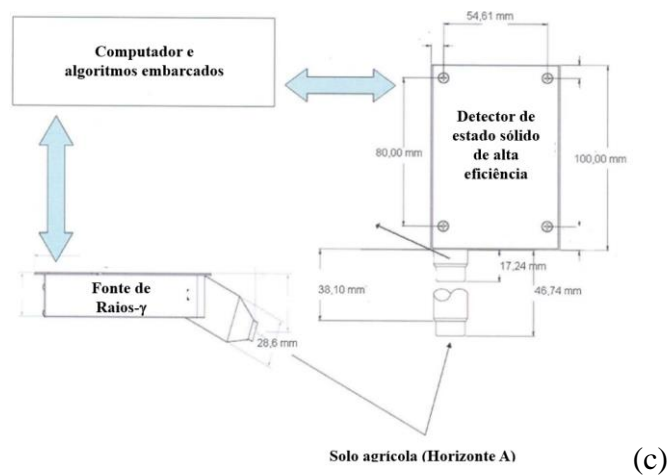
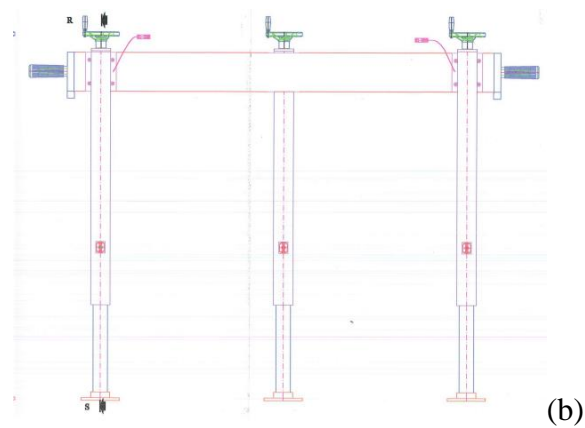
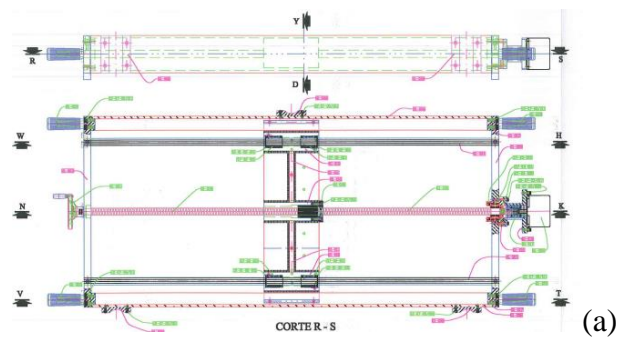


FIGURA 1. (a) Estrutura da mesa de coordenadas, (b) estrutura de apoio da mesa de coordenadas, (c) arranjo fonte-detector para o tomógrafo de espalhamento customizado.

Para a obtenção da compactação de solos foi considerado uma etapa de calibração das medidas relacionadas ao número de fótons espalhados e a compactação em amostras preparadas em laboratório, tendo como base o uso da norma ABNT NBR-6457, que trata sobre preparação de amostras de solo para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Assim, um conjunto de 14 amostras foram preparadas para a calibração considerando a correlação cruzada de medidas obtidas com um penetrômetro tradicional e medidas obtidas com espalhamento de fótons em amostras de um Latossolo Vermelho Distrófico (LVD), previamente preparadas em um laboratório com o uso de uma prensa. A Figura 2 ilustra a curva de calibração.

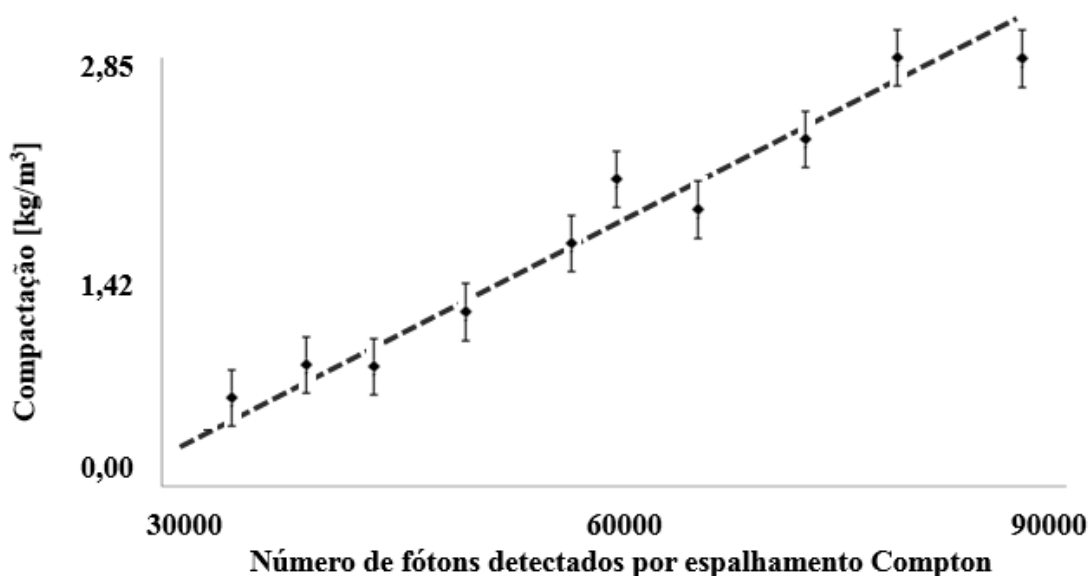


FIGURA 2. Curva de calibração obtida para um Latossolo Vermelho Distrófico (LVD) com janela de contagem de 10 segundos, ângulo entre fonte e detector de 90° e energia de 662 keV (137Cs).

Optou-se pelo delineamento experimental inteiramente casualizado, pelo fato de ser a classe taxonômica de solo homogênea em toda área de avaliação do estudo.

A área de imagem permitida pelo arranjo instrumental possibilita o estabelecimento de se obter estudos em região de interesse (ROI) igual a 1,0 m x 0,50 m.

Foram utilizados 3 tratamentos, os quais corresponderam a varreduras com resolução espacial de 2,5 mm², 5,0 mm² e 10,0 mm², bem como 6 repetições.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A Figura 3 ilustra um exemplo de resultado obtido para uma área de ensaio agrícola com coordenadas geográficas (199 21°57'13.9" S e 47°51'10.9" W), do Laboratório Nacional de Agricultura de Precisão (LANAPRE). Para os estudos realizados as repetições mostraram consistência quanto aos aspectos de reprodutibilidade e confiabilidade das medidas realizadas. Para os resultados, a escala em pseudo-cores é calibrada em (kg.m-3) e representa a compactação do solo na área analisada. Foi possível verificar a variabilidade espacial da compactação sobre a imagem considerando blocos de 25 pixels, ou mesmo considerando varreduras entre pixels.

Foi também possível observar que imagens obtidas após a aquisição de projeções em uma janela de varredura da mesa de coordenadas podem ocupar uma área de 100 mm x 50 mm com pixel igual a 2,5 mm² e quantidade total de 800 pixels por imagem reconstruída. Ensaios

com resoluções menores foram realizados considerando pixels de 5,0 mm² e 10,0 mm². Nesse estudo de validação foi utilizada uma fonte de Raios- γ com energia de 662 keV (137Cs).

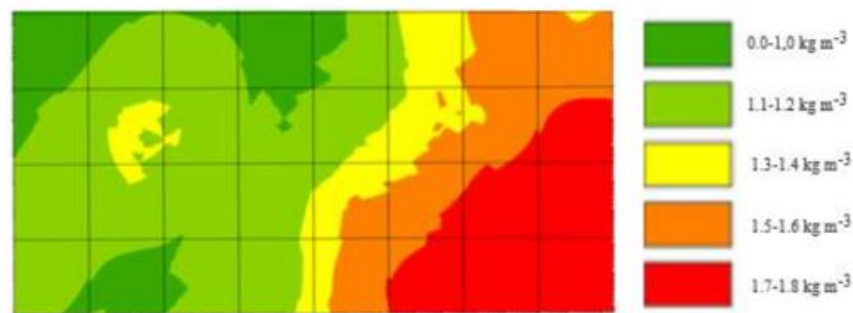


FIGURA 3. Exemplo de imagem Compton do banco de resultados.

A compactação do solo pode ter efeitos desejáveis e indesejáveis no crescimento das plantas e sua caracterização considerando a variabilidade espacial que possa apresentar em uma área de cultivo é fator que reduz risco. Na caracterização das medidas de espalhamento de fótons como uma função da compactação foi possível observar resolução de energia (FWHM) @ 662keV (keV) igual à 16,5 e relação sinal-ruído (SNR) igual a 83, o que traz robustez instrumental para medidas de compactação de solo com resolução de 0,1 kg.m⁻³.

CONCLUSÕES: Foram realizados estudos relacionados à customização de um tomógrafo de espalhamento de raios- γ para viabilizar análises da variabilidade espacial da compactação de solos em áreas de cultivo. Resultados validam o uso das imagens reconstruídas para análises da variabilidade espacial da compactação. De fato, foi apresentado ser possível análise não invasivas do nível de compactação na camada do horizonte A de solos agrícolas, diretamente no campo. Para o futuro, planeja-se incluir um sensor para a medida da umidade do solo com a expectativa de se incorporar correções em tempo real.

AGRADECIMENTOS: Esta pesquisa foi parcialmente financiada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa),

REFERÊNCIAS

BERALDO, J. M. et al., Application of X-ray computed tomography in the evaluation of soil porosity in soil management systems, **Engenharia Agrícola**, vol. 34, n. 6, pp. 1162–1174, 2014.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R. S. Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning. **Soil Science**, v. 140, n. 5, p. 326-332, Nov 1985.

CRUVINEL P. E. et al., X-and gamma-rays computerized minitomograph scanner for soil science, **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 39, n. 5, pp. 745–750, 1990.

CRUVINEL P. E.; BALOGUN, F. A. Compton scattering tomography for agricultural measurements, **Engenharia Agrícola**, vol. 26, n. 1, pp. 151-160, 2006.

CRUVINEL P.E.; SCANNAVINO JUNIOR F.A., Evolução de um instrumento para avaliação da compactação de solos agrícolas com espalhamento Compton), In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA**, vol 40, n. TR0713, 2011.

PEDROTTI A. et al., Tomografia computadorizada aplicada a estudos de um planosolo, **Brazilian Agricultural Research Journal**, vol. 38, n. 7, pp. 819–826, Brazil, 2003.

WANG L. et al., Design and fabrication of quasi-double-sided silicon drift detector for x-ray detection, **Materials Science in Semiconductor Processing**, vol.155, n. 1, pp. 107201, 2023.