

**Artigos Completos**



# CONBEA 2011

GERAÇÃO DE TECNOLOGIAS  
INOVADORAS E O DESENVOLVIMENTO  
DO CERRADO BRASILEIRO

XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola  
Cuiabá-MT - 24 a 28 de julho de 2011

## EVOLUÇÃO DE UM INSTRUMENTO PARA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE SOLOS AGRÍCOLAS COM ESPALHAMENTO COMPTON

PAULO E. CRUVINEL<sup>1</sup>, FRANCISCO A. SCANNAVINO JUNIOR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pesquisador, Embrapa Instrumentação, Rua XV de Novembro, 1452 - 13560-970 - São Carlos, SP, Fone: 16 21072826, cruvinel@cnpdia.embrapa.br.

<sup>2</sup> Doutorando, Embrapa Instrumentação e Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

Apresentado no  
XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2011  
24 a 28 de julho de 2011 - Cuiabá-MT, Brasil.

**RESUMO:** A física de solos estuda as propriedades físicas e sua medição visando a compreensão dos mecanismos que dirigem a funcionalidade dos solos e sua função na biosfera. A grande importância da compreensão do comportamento físico do solo está associada ao seu uso e manejo adequado, como orientar irrigação, drenagem, preparo e conservação de solo e água. O tráfego de máquinas pesadas e o pisoteio animal promovem modificações alterações nas propriedades físicas como a textura do solo, aumentando desta forma a probabilidade de sua compactação, oferecendo riscos ao crescimento radicular. A compactação exercida por forças externas diminui a qualidade física do solo. O uso de medidas Compton na agricultura é visto como uma nova abordagem em instrumentação avançada com potencial uso em aplicações agrícolas. O uso da radiação espalhada pode ser útil para idealizar instrumentos que proporcionem mapeamento por simples varredura espacial ou que possibilitem a reconstrução das projeções obtidas. Este trabalho apresenta a evolução instrumental obtida no desenvolvimento de um densitômetro de campo que utiliza fonte de raios X e o processamento digital de sinais para a medida da compactação de solos agricultáveis.

**PALAVRAS-CHAVES:** compactação, instrumentação para solo, agricultura.

## EVOLUTION OF AN INSTRUMENT FOR ASSESSMENT OF SOIL COMPACTION WITH COMPTON SCATTERING

**ABSTRACT:** Soil physics studies are related with the properties of soils and their measurements to understand the mechanisms that drive function in the biosphere. The importance of understanding the physical behavior of soil is associated with its use and proper management, how to guide irrigation, drainage, tillage and soil conservation. The traffic of heavy machinery and animal trampling promote changes in physical properties such as soil texture, thus increasing the likelihood of compaction, posing risks to root growth. The compression exerted by external forces decreases the soil physical quality. The use of Compton measures in agriculture is seen as a new approach in advanced instrumentation with potential use in agricultural applications. The use of scattered radiation can be useful to devise instruments that provide simple mapping or spatial scan to enable the reconstruction of the projections obtained. This paper presents the instrumental evolution obtained for a densitometer that uses X-ray source and digital signal processing to measure the compaction of agricultural soils.

**KEYWORDS:** compaction, soil instrumentation, agriculture

**INTRODUÇÃO** - A física de solos estuda e define, qualitativa e quantitativamente, as propriedades físicas, como sua medição, predição e controle, a fim de compreender os mecanismos que dirigem a funcionalidade dos solos e sua função na biosfera. A grande importância da compreensão do comportamento físico do solo está associada ao seu uso e manejo adequado, como orientar irrigação, drenagem, preparo e conservação de solo e água (REINERT *et al.*, 2006).

A densidade do solo expressa a relação entre a quantidade de massa de solo seco por unidade de volume do solo. A importância da quantificação da medida de densidade do solo está na indicação da compactação, assim como medir alterações da estrutura e porosidade do solo. A porosidade, espaço ocupado pela água ou pelo ar, é responsável pela melhor distribuição e menor impedimento mecânico ao sistema radicular da planta (BEULTER e CENTURION, 2004).

O tráfego de máquinas pesadas (SILVA *et al.*, 2000) e o pisoteio animal promovem modificações alterações nas propriedades físicas como a textura do solo (CASTRO FILHO *et al.*, 1998), aumentando desta forma a compactação do solo e oferecendo riscos ao crescimento radicular.

O índice de sucesso no cultivo das culturas agrícolas depende fortemente da qualidade física do solo, a qual é um componente importante não só para a definição da produtividade, como também para a sua conservação e sustentabilidade. A compactação exercida por forças externas diminui a qualidade física do solo e isto ocorre principalmente devido ao descuido no manejo com o tráfego excessivo ou inadequado de máquinas e equipamentos (MANTOVANI, 1987). O decréscimo do volume total de poros, destacadamente os de maior diâmetro, prejudica a infiltração e drenagem da água, a aeração, bem como provoca um aumento da coesão do solo e da resistência à penetração das raízes das plantas, diminuindo seu desenvolvimento e produtividade (KATOU *et al.*, 1987).

Para avaliar a compactação do solo são utilizados alguns atributos físicos como a porosidade, resistência à penetração e densidade do solo. Porém, esses atributos variam muito de solo para solo dificultando o estabelecimento de valores limitantes similares para todos os tipos de solo. A densidade do solo é dada pela relação massa de sólidos pelo volume total ocupado pela massa, incluindo espaço ocupado pelo ar e pela água. Para avaliar a compactação do solo atributos físicos como a porosidade (LIMA & LIMA, 1996), resistência à penetração (STOLF, 1990; RABELLO & CRUVINEL, 2009) e densidade do solo são utilizados (FERRAZ & MANSELL, 1979; PEDROTTI *et al.*, 2003). Neste contexto, dentre as diferentes técnicas para a medida de densidade e avaliação da compactação encontram-se a tomografia e densitometria de raios X, bem como instrumentos baseados em medidas Compton (PETROVIC *et al.*, 1982; HAINSWORTH & AYLMOORE, 1983; CRESTANA *et al.* 1985; CRESTANA, 1986; CRUVINEL, 1987; CRUVINEL *et al.* 1990; MACEDO, 1997; SCANNAVINO JUNIOR & CRUVINEL, 2009; NAIME, 1994; NAIME *et al.* 2000; CRUVINEL & BALOGUN, 2000; BALOGUN & CRUVINEL, 2003; CRUVINEL & BALOGUN, 2006).

Este trabalho apresenta a evolução de um instrumento laboratorial que opera na configuração de um densitômetro Compton para medida da compactação de solos agrícolas.

**MATERIAL E MÉTODOS** - A aplicação da técnica Compton para análises quantitativas requer calibração na medida do número de fótons espalhados. Essas medidas devem estar dentro de classe de erros aceitáveis. Entre estes fatores se encontram incertezas devido às atenuações do feixe incidente e do feixe espalhado no objeto de estudo, contribuições de efeitos secundários do espalhamento dos fótons e o volume de espalhamento de onde se deriva o verdadeiro sinal a ser processado na medida.

É importante observar que no processo de interação da radiação com a matéria, nos seus vários modos, a faixa de influência de cada modo é claramente observada. A secção de choque diferencial de Klein-Nishina para um elétron livre é dada unicamente pela relação entre energia e ângulo de espalhamento, a dependência é com a geometria, ou seja:

$$\frac{d_e \sigma^{KN}(E)}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \left[ \frac{1 + \cos^2 \xi}{(1 + \alpha(1 - \cos \xi))^2} \left[ 1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \xi)^2}{(1 + \cos^2 \xi)(1 + \alpha(1 - \cos \xi))} \right] \right] \quad (1)$$

em que:

$\frac{d_e \sigma^{KN}(E)}{d\Omega}$  é a secção de choque diferencial de Klein-Nishina na energia E para um elétron livre,

$d\Omega$  é o ângulo diferencial relacionado com a secção de choque diferencial de Klein-Nishina,

$r_0$ : é o raio clássico do elétron, numericamente igual a  $2.818 \times 10^{-15}$  m,

$\xi$ : é o ângulo do espalhamento, ou do fóton espalhado,

$\alpha$ : é a razão entre a energia E do fóton incidente e a energia de repouso de um elétron (511 keV).

Logo, o arranjo instrumental deve considerar a disposição geométrica que viabilize melhor eficiência de medida em relação ao solo com a melhor relação Sinal/Ruído. Assim, a portabilização do instrumento laboratorial deve considerar o uso de fonte de raios X, instrumentação para detecção de fótons espalhados, contagem e processamento digital de sinais para medidas densitométricas e algoritmos para interpretação de mapas de densidade e compactação de solos.

O arranjo instrumental em diagrama de blocos pode ser observado na Figura 1. Fonte e detector de Raios X devem trabalhar sincronizados e são controlados com uma interface conectada a um Laptop operando com Windows XP®. Tomando por base a equação (1) a fonte de Raios X foi estabelecida considerando as seguintes características:

- Material do alvo Prata (Ag);
- Espessura do alvo igual a 1,5  $\mu$ m;
- Voltagem do tubo: operação entre 10 to 40 kV;
- Fluxo de fótons:  $1,3 \times 10^6$  fótons por segundo/mm<sup>2</sup>;
- Potencia de operação de 4W quando operando com 100% de *duty cycle*;  
Tamanho do ponto focal de aproximadamente 2 mm;
- Cone angular de até 120°.

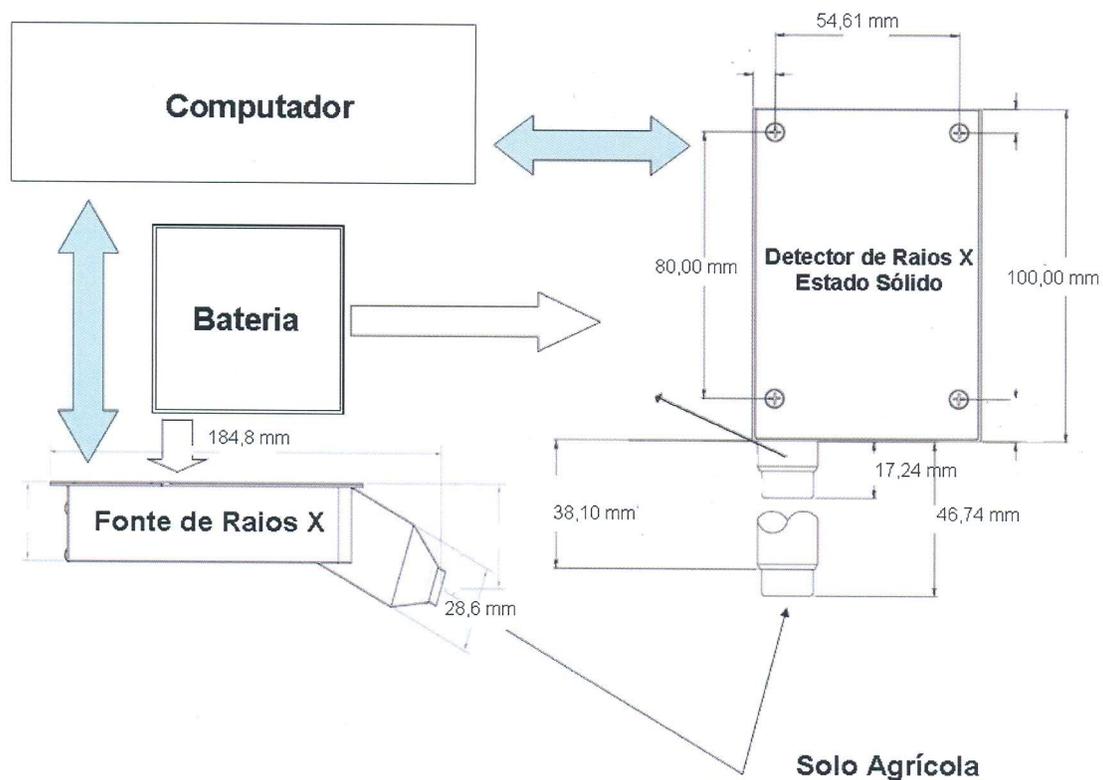


Figura 1 - Diagrama de blocos e detalhes mecânicos para a evolução instrumental do espectrômetro Compton para uso em ambiente de campo.

O detector de Raios X é um fotodiodo de Si-PIN. Raios-X interagem no silício e criam uma média de um par elétron / lacuna para cada 3,62 eV de energia perdida no silício, que é o sinal de entrada. Ele é montado em um *cooler* termoelétrico junto com transistor FET de entrada e acoplado a um pré-amplificador de carga, o qual reduz o ruído eletrônico no detector e pré-amplificador. O transformador de pulso é um processador de pulso digital, que substitui o amplificador e um analisador multicanal, encontrado na maioria dos sistemas analógicos. A bateria fornece alimentação de aproximadamente 5 VDC com corrente de 200 mA e também inclui um multiplicador de alta tensão para produzir a voltagem do detector, até 400 V, e suprimento para o *cooler* termoelétrico, que prevê controle de circuito fechado com um diferencial de temperatura máxima de 85°C. Ambas as fontes são ajustadas com especificações de fábrica da AMPTEK®.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO** - O uso da tecnologia digital e detector de estado sólido melhoram os parâmetros essenciais para as medidas Compton, ou seja: (1) melhor desempenho, melhor resolução específica e operação a altas taxas de contagem; (2) uma maior flexibilidade, opções de configuração disponíveis e selecionadas por software através de uma interface; (3) uma maior estabilidade e reprodutibilidade de medidas. O sinal de entrada do detector é digitalizado na saída do pré-amplificador, proporcionando operação em tempo real para o processamento digital de sinal. O espectro é então obtido digitalmente.

Por outro lado, conforme ilustra a Figura 2 o espectrômetro encontra uma área ampla de trabalho podendo operar em uma faixa de energia de 4,0 keV até próximo a 30,0 keV. Com

base nos dados do fabricante foi possível inferir a região para uma operação com resolução em energia da ordem de 145 eV.

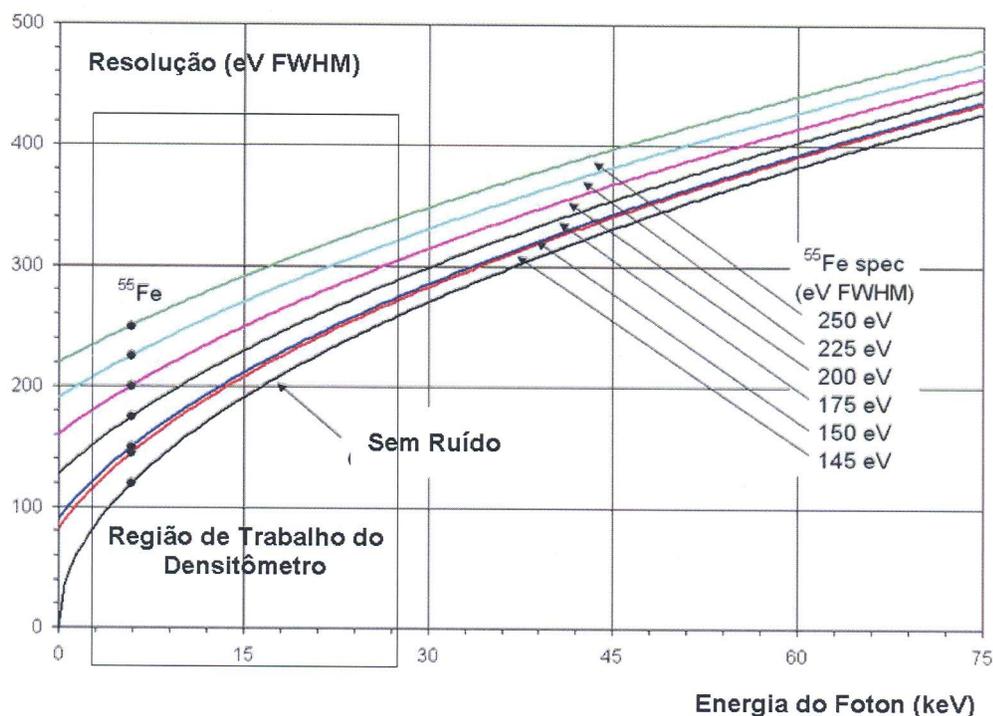


Figura 2 – Avaliação da região de trabalho com base na resolução em energia como função da energia do fóton (avaliação feita a partir de informação disponibilizada pelo fabricante do Detector, Fonte: AMPTEK®).

A evolução instrumental para uso no campo proporcionou a geração de uma tecnologia com qualificações que permitam o desenvolvimento de um produto a ser qualificado como densitômetro de espalhamento para caracterização e mapeamento da densidade e compactação de solos agrícolas. O nível de miniaturização de fonte e detector de Raios X possibilitou a organização de um sistema embarcado para a física de solos e de uso direto no campo.

Na era de sistemas embarcados complexos, a interface direta de novos sensores e dispositivos de sistemas integrados para o mundo real demandam o uso de sistemas analógicos de suporte. A maioria das características físicas de um sensor requer algum tipo de calibração e neste projeto, em que pese à calibração poder ser realizada de forma automática para a medida do espalhamento, um ajuste adicional em função do relevo da área a ser avaliada deverá ser observado.

**CONCLUSÕES** – Por definição não existe instrumento de medição que apresente um resultado exatamente igual ao valor real da grandeza física que se está buscando caracterizar. As avaliações iniciais do novo arranjo instrumental desenvolvido para o densitômetro de espalhamento Compton, viabilizaram o estabelecimento de uma melhor resposta para as medidas de densidade de solo dentro de uma menor faixa de incerteza. Este é um importante aspecto instrumental que merece destaque, uma vez que quanto menor a incerteza, maior será a qualidade metrológica da medida. Adicionalmente, a nova arquitetura instrumental apresentada viabilizou a portabilização de um equipamento já validado e empregado em laboratório para uso direto em campo, tomando por base o uso de fonte de raios X,

instrumentação para detecção de fótons espalhados, contagem e processamento digital de sinais para medidas densitométricas para a avaliação da compactação de solos agricultáveis.

**AGRADECIMENTO:** Este trabalho contou com o apoio da Embrapa Instrumentação (CNPDIA) e do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), processos 03.10.05.011.00.01.00 e 306988/2007-0 respectivamente.

## REFERÊNCIAS

BALOGUN, F. A.; CRUVINEL, P. E. Compton scattering tomography in soil compaction study, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Volume 505, Issues 1-2, PP. 502-507, 2003.

BEUTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do Solo no Desenvolvimento Radicular e na Produtividade da Soja. *Pesq. agropec. Bras.*, Brasília, v.39, n.6, p.581-588, jun. 2004.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade de Agregados e sua Relação com o Teor de Carbono Orgânico num Latossolo Roxo Distrófico, em Função de Sistemas de Plantio, Rotação de Culturas e Métodos de Preparo das Amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.527-538, 1998.

CRESTANA S.; MASCARENHAS S.; POZZI-MUCELLI R.S. Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning. *Soil Science*, Madison, v.140, n.5, p.326-32, 1985.

CRESTANA, S., A Tomografia Computadorizada com um novo método para estudos da física da água no solo, São Carlos, USP, Tese de Doutorado, 140 páginas, 1986.

CRUVINEL, P.E.; BALOGUN F. A. Minitomography scanner for agriculture based on dual-energy Compton scattering, IEEE Computer Society Press, In: *Computer Graphics and Image Processing*, 2000. Proceedings XIII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, pp. 193-199, 2000.

CRUVINEL, P. E.; BALOGUN, F. A. Compton scattering tomography for agricultural measurements. *Eng. Agríc.*, vol.26, no.1, p.151-160, 2006.

CRUVINEL, P. E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S; MASCARENHAS, S, X and Gamma-Rays computerized mini tomography scanner for soil science, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, V.39, N.5, p745-750, 1990.

CRUVINEL, P.E. "Minitomógrafo de raios-X e raios gama computadorizado para aplicações multidisciplinares". Campinas: UNICAMP-FEE, 1987. Tese Doutorado.

FERRAZ, E. S. B.; MANSELL R. S. Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods. Gainesville: University of Florida, 51 p. (Technical Bulletin, 807), 1979.

HAINSWORTH, J.M.; AYLMOORE L.A.G. The use of Computer-Assisted Tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Austrian Journal of Soil Research*, Collingwood, v.21, p.435-43, 1983.

KATOU, H.; MIYAJI, K.; KUBOTA, T. Susceptibility of undisturbed soils to compression as evaluated from the changes in the soil water characteristic curves. *Soil Science and Plant Nutrition*, Tokyo, v. 33, n. 4, p. 539-54, 1987.

LIMA V.C.; LIMA J.M.J.C. *Introdução à pedologia*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1996.

MACEDO, A. *Construção e uso de um tomógrafo com resolução para aplicações em ciências do solo e do ambiente*, Tese de Doutorado, EESC-USP, São Carlos, 1997.

MANTOVANI, E.C. *Compactação do solo*. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 13, n.147, pp.52-55, 1987.

NAIME, J. M.; CRUVINEL, P. E.; SILVA, A. M.; CRESTANA, S. VAZ, C.M.P., *Applications of X and  $\gamma$ -Rays Dedicated Computerized Tomography Scanner in Agriculture, Advances in Agricultural Tomography*, Embrapa Agricultural Instrumentation, (Ed. Paulo E. Cruvinel & Luiz Alberto Colnago), São Carlos, Brazil, 2000, pp 96-104.

NAIME, J. M. *Projeto e construção de um minitomógrafo portátil para estudo de ciência de solo e plantas em campo*, EESC-USP, Dissertação de Mestrado, São Carlos, 1994.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J.M.; SILVA, A. M. *Planosol soil sample size for computerized tomography measurement of physical parameters* *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*, vol.60, n.4, pp. 735-740. ISSN 0103-9016, 2003.

PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E.; RIEKE, P.E. *Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning*, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982.

RABELLO, L. M.; CRUVINEL, P. E. *Intelligent instrument to facilitate decision making in the evaluation of soil resistance to root penetration* *Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)*, vol.66, n.5, pp. 573-582. ISSN 0103-9016, 2009.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. *Propriedades Física do Solo*. Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Ciências Rurais, Santa Maria, Maio, 2006 (Apostila).

SCANNAVINO JUNIOR F. A.; CRUVINEL P.E. *Instrumental opportunities of X-ray computed tomography on soil compaction characterization to sustainability in agricultural systems*. CIGR, Section V, International Symposium, 2009.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J. M. *Densidade do Solo, Atributos Químicos e Sistema Radicular do Milho Afetados pelo Pastejo e Manejo do Solo*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.191-199, 2000.

STOLF, R. *Comparação dos resultados de resistência do solo obtidos com o penetrômetro de impacto e o convencional*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 19. Anais... Piracicaba, 1990.