

Comparação entre o método laboratorial e o penetrômetro de Stolf na análise da densidade do solo: um estudo utilizando abordagens geoestatísticas

Alex M. Nhancololo^{†1}, Wélson A. Oliveira¹, Fernandes A. C. Pereira², Bruno M. Silva³, João D. Scalon⁴

¹*Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária, UFLA.*

²*Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, UFLA.*

³*Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras (UFLA).*

⁴*Departamento de Estatística, Universidade Federal de Lavras (UFLA).*

Resumo: O setor agrícola é um pilar do desenvolvimento econômico em diversos países, incluindo o Brasil, pois contribui significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) e a criação de empregos. No entanto, a busca por maior produtividade agrícola, tem resultado no uso de equipamentos pesados, como colheitadeiras e retroescavadeiras, levando à modificação da estrutura do solo. Como consequência, quando se deseja cultivar determinada cultura, estudar os fatores físico-químicos do solo se torna crucial e o estudo destes é dispendioso e pode representar um obstáculo financeiro, pois nem todos os pesquisadores têm a capacidade de arcar com os custos e na ausência dum financiador abandonam a pesquisa. Esta problemática demonstra a necessidade de se investigar por técnicas menos dispendiosas e com resultados tão próximos quanto aos obtidos na análise laboratorial. Este estudo teve objetivo de avaliar a precisão da densidade estimada no penetrômetro de impacto de Stolf, utilizando métodos geoestatísticos e tomando como referência a densidade laboratorial. Fora isso, a pesquisa incluiu descrição dos métodos de amostragem do solo, determinação da densidade do solo e conceitos básicos de geoestatística. Para a realização da pesquisa foram coletadas 78 amostras de solo e mesmo número de impactos, ambos numa plantação de café em Minas Gerais, Lavras, Brasil. Com base nesses dados, foram ajustados modelos exponenciais e a densidade do solo foi mapeada utilizando krigagem ordinária. Os resultados revelaram que o penetrômetro de Stolf tende a superestimar a densidade do solo, embora ainda apresente uma forte correlação positiva (79,3%) com as medições laboratoriais. Portanto, concluiu-se que, em situações em que a precisão não é imperiosa, essa abordagem econômica é uma opção viável na análise da densidade do solo pesquisa de solo.

Palavras-chave: Densidade do solo; amostragem do solo; Geoestatística; Krigagem Ordinária; Penetrômetro de Stolf.

Comparison between the laboratory method and the Stolf penetrometer in soil density analysis: a study using geostatistical approaches

Abstract: The agricultural sector is a cornerstone of economic development in several countries, including Brazil, as it significantly contributes to the Gross Domestic Product (GDP) and job creation. However, the pursuit of higher agricultural productivity has led to the use of heavy machinery, such as combine harvesters and backhoes, resulting in soil structure modification. Consequently, when desiring to cultivate a specific crop, the study of the soil's physical-chemical factors becomes crucial, yet this study is costly and may pose a financial obstacle, as not all researchers have the capacity to cover the expenses, leading some to abandon their research in the absence of funding. This issue underscores the need to investigate less costly techniques with results closely approximating those obtained through laboratory analysis. The aim of this study was to assess the accuracy of soil density estimated by the Stolf impact penetrometer using geostatistical methods and taking laboratory density as a reference. Additionally, the research included a description of soil sampling methods, soil density determination, and basic geostatistical concepts. For this research, 78 soil samples and an equal number of impact measurements were collected in a coffee plantation in Minas Gerais, Lavras, Brazil. Based on these data, exponential models were fitted, and soil density was mapped using ordinary kriging. The results revealed that the Stolf penetrometer tends to overestimate soil density, although it still exhibits a strong positive correlation (79.3%) with laboratory measurements. Therefore, it was concluded that in situations where precision is not imperative, this cost-effective approach is a viable option for soil density analysis in soil research.

Keywords: Soil density; Soil sampling; Geostatistics; Ordinary Kriging; Stolf's penetrometer.

[†]Autor correspondente: lxmonito@gmail.com.

Introdução

O setor agrícola desempenha um papel relevante no desenvolvimento de diversos países, e o Brasil não é uma exceção, uma vez que, segundo a EMBRAPA (2020), além de ser competitivo e gerar mais oportunidades de emprego, contribui significativamente para o produto interno bruto (PIB). Porém, embora apresente maior potencial econômico, o alto potencial na produtividade exige o uso de sistemas de produção mais sofisticadas e grandes áreas de produção. Como consequência empregam-se equipamentos pesados como colheitadeiras, retroescavadeiras, etc., e o uso destes, associado ao mau manejo do solo, tem causado diversos problemas nos campos agrícolas, como perda de fertilidade, degradação da estrutura do solo, entre outros.

Esta afirmação é sustentada na obra de Eash et al. (2016), quando afirmam que alguns solos têm camadas naturalmente compactadas, que podem ter uma alta densidade aparenteⁱⁱ. Tais densidades restringem a penetração das raízes e o movimento da água. Em outros casos, tratores e máquinas pesadas podem causar compactação séria, o que limita o crescimento das plantas.

Devido a estes problemas, quando se deseja cultivar determinada cultura, torna-se crucial estudar os fatores físico-químicos da lavoura, como a densidade do solo, e o estudo desta, demanda muito dinheiro e nem todos os pesquisadores o tem para pagar, sendo obrigados a procurar um financiamento e em caso de não obterem, abandonam as pesquisas.

Esta problemática, que também é sustentada por (MARTINS et al., 2010), quando afirma que no uso intensivo de práticas agrícolas inadequadas, incorre a modificações na estrutura e características originais do solo e pode resultar no aumento da compactação do solo, maior resistência à penetração e redução da porosidade, demonstra a necessidade de se investigar outras técnicas que minimizem os custos e deem resultados tão próximos quanto os obtidos pela análise laboratorial.

Assim, sendo o penetrômetro de Stolfⁱⁱⁱ, instrumento portátil que mede a resistência à penetração do solo e que consiste em uma haste metálica, inserida no solo com uma força constante e registrada em uma escala de leitura, onde a profundidade de penetração e a resistência encontrada são submetidos no programa computacional Excel-VBA que além de medir a compactação, estima a densidade do solo, que usando métodos geoestatísticos se pode prever a densidade em locais não amostrados, o objetivo desta pesquisa é analisar a precisão da densidade estimada neste penetrômetro, tomando como referência a densidade estimada no laboratório.

Densidade do solo: conceitos e métodos da sua determinação

Conceitos

Para compreender o conceito de densidade do solo, é fundamental primeiro entender os conceitos, poro no solo e porosidade.

Poros no solo - são espaços vazios ou cavidades presentes entre as partículas sólidas do solo e estes podem ser subdivididos em: macroporos, que são poros maiores que permitem a passagem de ar e a drenagem da água e podem ser encontrados nos solos arenosos; e microporos, que são poros menores, que retêm a água com mais firmeza, e podem ser encontrados nos solos argilosos (CARTER; GREDORICH, 2008).

ⁱⁱVeja a definição na seção sobre densidade do solo.

ⁱⁱⁱProfessor Titular da UFSCar, Graduado em Agronomia, Esalq-USP; mestre em Energia Nuclear na Agricultura CENA-USP e doutor em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas) USP. Pós-doutorado na North Carolina State University (EUA) e na University of California (EUA), Davis. Atua na área de Manejo e Conservação do Solo e na área de mecanização agrícola: cana-de-açúcar, compactação, trator/ implemento.

Porosidade (S_t) - corresponde ao volume ocupado pelos poros no solo. À medida que o material parental do solo sofre intemperismo, afrouxamento e mistura por várias forças, o espaço poroso se desenvolve, proporcionando um local para a retenção de ar e água. Assim, solos com boa estrutura devem ter 50% de seu volume composto por poros, são exemplos desses solos, os siltitos^{iv} e loames^v (solo fraco) (EASH et al., 2016). Porosidade (S_t) é a porcentagem do volume do solo ocupado por espaços porosos e os tipos de poros presentes em um solo são tão importantes quanto a quantidade de espaço poroso, e sua expressão matemática é descrita na equação 4 (CARTER; GREDORICH, 2008).

Densidade do solo (ρ) - é a razão entre a massa do solo e o volume do solo. Esta é comumente expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm^3), megagramas por metro cúbico (Mg/m^3), sendo 1 Mg correspondente a 1000 kg, mas também pode ser representada em libras por pé cúbico (lbs/ft^3), (LAL; SHUKLA, 2005). Segundo os mesmos autores, a densidade do solo pode ser classificada de 4 maneiras diferentes que são:

- a) **Densidade de partículas (ρ_p)** - O solo é composto por partículas sólidas (minerais e matéria orgânica) de diferentes tamanhos e espaços (poros) entre as partículas. O peso do solo na ausência de espaços porosos, ou seja, densidade das partículas sólidas apenas, chama-se densidade de partículas. Esta densidade de partículas, também designada densidade real, é a razão entre a massa de sólidos (M_s) pelo volume de sólidos (V_s), conforme ilustra a equação 1 (LAL; SHUKLA, 2005; CARTER; GREDORICH, 2008; PLASTER, 2014; EASH et al., 2016; WEIL; BRADY, 2017).

$$\rho_p = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_{in} + M_o}{V_{in} + V_o} \quad (1)$$

- b) **Densidade de Granel (ρ_b)** - Também designada densidade aparente, é a razão entre a massa de sólidos (M_s) e o volume total (V_t) (que inclui os sólidos e os poros). A densidade de grenel (densidade aparente) do solo pode ser definida como úmida (ρ'_b), quando inclui a massa de água e é expressa pela equação 2, e seca (ρ_b), quando não inclui a água e é expressa pela equação 3, (LAL; SHUKLA, 2005; CARTER; GREDORICH, 2008; WEIL; BRADY, 2017).

$$\rho'_b = \frac{M_s + M_w}{V_t} = \frac{M_{in} + M_o + M_w}{V_s + V_w + V_g} \quad (2)$$

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_{in} + M_o}{V_s + V_g} \quad (3)$$

$$S_t = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (4)$$

- c) **Densidade relativa ou gravidade específica (G_s)** - é a razão entre a densidade de partículas de um solo e a densidade da água, e é expressa pela equação 5 (LAL; SHUKLA, 2005).

$$G_s = \frac{\rho_p}{\rho_w} \quad (5)$$

^{iv}Siltito é um tipo de solo composto principalmente de partículas de silte (partícula de solo que é menor do que a areia, mas maior do que a argila em termos de tamanho de partícula).

^vLoame é um tipo de solo resultante da mistura de areia, silte e argila, com quantidades relativamente iguais de cada componente, e é considerado ideal para a maioria das plantas e culturas, devido à sua textura equilibrada

- d) **Volume específico a seco (V_b)** - o recíproco da densidade a granel seca e é expressa pela equação 6, (LAL; SHUKLA, 2005).

$$V_b = \frac{1}{\rho_b} \quad (6)$$

Nota: Os subscritos (índices) g, w, o, in, s e t referem-se a gases, água, orgânico, inorgânico, sólido e total, respectivamente (LAL; SHUKLA, 2005).

Compactação do solo - a densidade indica a soltura ou a compactação de um solo. Se um solo é compactado, a quantidade de espaço poroso é reduzida e o peso de um determinado volume de solo é aumentado. A medida da densidade, é uma comparação com a água de densidade de $1g/cm^3$ e geralmente considera-se a densidade de granel. Os grãos minerais no solo têm uma densidade de cerca de $2,6g/cm^3$. O volume total do solo é de cerca de 40-60% de espaço poroso, portanto, usando um valor médio de 50% para a porosidade, a densidade a granel seria de $1,3g/cm^3$ (EASH et al., 2016).

Métodos de determinação da densidade do solo

A determinação da densidade do solo desempenha um papel fundamental em diversas áreas e a agricultura não é exceção. A densidade do solo, que se refere à quantidade de massa de solo por unidade de volume, fornece informações valiosas sobre a compactação do solo, sua porosidade e sua capacidade de retenção de água, entre outras propriedades essenciais.

Segundo Teixeira et al. (2017), a determinação da densidade do solo compreende duas fases distintas: a primeira consiste em medir a massa da amostra por pesagem, enquanto a segunda etapa envolve a determinação do volume da amostra, que está relacionada com a porosidade total, composição orgânica e mineralógica do solo.

Para Klute e Page (1986), a determinação da densidade do solo consiste geralmente em secar até $105^\circ C$ e pesar uma amostra de solo, cujo volume é conhecido (método do núcleo) ou deve ser determinado (método do torrão e método de escavação).

Desta feita, para medir a densidade do solo, vários métodos são empregados, sendo cada um adequado a diferentes contextos e objetivos. Estes métodos incluem técnicas de campo e laboratoriais, que variam desde procedimentos diretos, até métodos mais avançados, como o uso de medidores de densidade nuclear.

Para Teixeira et al. (2017), dentre os métodos da análise da densidade do solo, se destacam:

- i. **Método do cilindro ou anel volumétrico** - método preciso, porém que pode ser demorado, consiste no preenchido com solo num cilindro de volume conhecido e posterior pesá-la. A densidade do solo é calculada dividindo-se a massa do solo pelo volume do cilindro.
- ii. **Método de proveta** - Consiste em compactar a amostra de solo em uma proveta^{vi} até um volume pré-definido e posterior medir a respetiva massa.
- iii. **Método do torrão parafinado** - método adequado para solos que não absorvem água facilmente, consiste na mistura da parafina derretida com um volume conhecido de solo e a densidade é calculada com base no volume da parafina;
- iv. **Método do monolito** - consiste em coletar uma amostra de solo intacta em forma de cilindro (monolito), impermeabilizá-la com materiais como cola e resina, medir seu peso e volume através do deslocamento de água, e, finalmente, calcular a densidade do solo com base nos valores mensurados.

^{vi}Proveta é um instrumento de laboratório usado para medir com precisão o volume de líquidos ou, em alguns casos, sólidos granulares, como solo.

Para Klute e Page (1986), os métodos de determinação da densidade do solo são:

- i. **Método do núcleo ou método de soda** - um amostrador de metal cilíndrico é pressionado ou conduzido no solo até a profundidade desejada e é cuidadosamente removido para preservar um volume conhecido da amostra. Porém, este método não é satisfatório se mais do que uma pedra ocasional estiver presente no solo (KLUTE; PAGE, 1986).
- ii. **Método de escavação** - a densidade do solo é determinada escavando uma quantidade de solo, secando-a, pesando-a, e determinando o volume da escavação (KLUTE; PAGE, 1986). Este método pode ser subdividido em:
 - a) **Método do funil de areia** - o volume é determinado preenchendo o buraco com areia, cujo volume por unidade de massa é conhecido.
 - b) **Método do balão de borracha** - o volume é determinado inserindo um balão na escavação e enchendo-o com água ou outro fluido até que a escavação esteja cheia.
- iii. **Método do torrão ou agregados grossos** - envolve medir o volume do torrão por imersão em um líquido de densidade conhecida e aplicando o princípio de Arquimedes, que afirma que o empuxo exercido por um fluido em um objeto submerso é igual ao peso do fluido deslocado (KLUTE; PAGE, 1986).
- iv. **Métodos de radiação** - envolvem o uso de radiação gama, emitida ou transmitida por amostras de solo, e a interação da radiação com o solo é medida e analisada para obter informações sobre sua composição ou densidade.

Ressalta-se que, a escolha do método depende das propriedades do solo, das condições do local e dos recursos disponíveis, sendo importante seguir procedimentos padronizados e tomar precauções de segurança ao utilizar qualquer um desses métodos e ser cuidadoso, pois em qualquer estimativa sempre existe uma margem de erro envolvida, seja pelo método em si, bem como pelo fato de se utilizar uma amostra para analisar a densidade do solo.

Geoestatística na ciência do solo

Conceito da geoestatística

O termo Geoestatística é usado para se referir ao estudo estatístico dos fenômenos naturais. Isto é, fenômenos distribuídos num espaço contínuo, como mar, rio, terra, podendo ser lavoura (machamba), campo de futebol, entre outros.

Geoestatística é um ramo da estatística espacial^{vii} usado para descrever modelos e métodos para dados que apresentam valores observados $Y_i : i = 1, \dots, n$ correspondentes a um conjunto discreto de locais de amostragem x_i dentro de alguma região espacial A , sendo cada valor observado Y_i uma medida direta ou estatisticamente relacionado ao valor de um fenômeno espacial contínuo subjacente e $S(x)$, no local de amostragem correspondente x_i (OYANA, 2021; CRES-SIE, 1993).

A Geoestatística é uma área da estatística que faz o uso da amostra de fenômenos espaciais^{viii} qualitativos ou quantitativos para a caracterização espacial de uma variável de interesse por meio do estudo de sua distribuição e variabilidade espaciais, com determinação das incertezas associadas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

^{vii}Estatística espacial é um ramo da estatística que lida com dados geográficos e distribuídos no espaço bidimensional ou tridimensional, para análise de padrões, tendências e relações espaciais de um ou mais fenômenos de interesse. Ela permite a compreensão de como os fenômenos variam no espaço e como essa variação espacial está relacionada a fatores geográficos e geoespaciais.

^{viii}Fenômeno espacial é uma população que apresenta a distribuição e variabilidade espacial de interesse do pesquisador numa determinada área (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

SOARES (2006) define geoestatística como conjunto de métodos, técnicas e instrumentos estatísticos que caracterizam os fenômenos espaciais naturais e objetiva estudar a dispersão espacial ou espaço-temporal das grandezas que definem a quantidade e a qualidade de recursos naturais e outros fenômenos em que os atributos manifestem certa estrutura no espaço e/ou no tempo.

Em síntese, geoestatística estuda fenômenos distribuídos num espaço contínuo, considerando-as dependentes espacialmente a uma determinada distância (alcance) e através da Krigagem (interpolador geoestatístico), estima os valores do fenômeno em estudo em locais não amostrados.

A geoestatística difere da estatística clássica, pois incorpora a dependência espacial dos dados, reconhecendo que os valores observados em locais próximos tendem a estar mais relacionados entre si do que valores em locais distantes. Além disso, a geoestatística permite a modelagem de diferentes distribuições de probabilidade em locais diferentes e considera a variação na forma dessas distribuições, enquanto a estatística clássica frequentemente pressupõe independência e identidade na distribuição dos dados em diferentes locais.

Historial da Geoestatística

Diferentemente do que algumas literaturas afirmam quanto a origem da geoestatística, Webster e Oliveira (2007), afirmam que os primeiros registros da geoestatística aparecem num artigo de R.A. Mercer e A.D. Hall (1911), intitulado *The experimental error of field trials*, que tinha objetivo de examinar a variação nos rendimentos das colheitas em numerosas pequenas parcelas em Rothamsted.

A pesquisa de Mercer e Hall revelou que a variância entre as parcelas diminuía à medida que o tamanho das parcelas aumentava até certo limite e os rendimentos em parcelas adjacentes eram mais semelhantes do que entre outras não adjacentes. Eles também propuseram duas fontes de variação: uma que era autocorrelacionada e outra completamente aleatória. Esse artigo é considerado um marco na origem da geoestatística moderna, pois introduziu conceitos fundamentais, como dependência espacial, intervalo de correlação, efeito de suporte e pepita, essenciais para a análise de dados espaciais.

Em 1919, R. A. Fisher começou a trabalhar em Rothamsted, onde sua principal preocupação era entender e estimar como as culturas respondiam a diferentes práticas agronômicas e variedades. Embora Fisher tenha reconhecido a variação espacial no ambiente de campo, ele a via como uma interferência para os objetivos de seus experimentos (WEBSTER; OLIVEIRA, 2007).

Em 1930, A. N. Kolmogorov estudando a turbulência no ar e no clima, visando descrever a sua variação e prevê-la, constatou uma correlação espacial e concebeu a uma função estrutural para representá-la, bem como usar a função para interpolar sem viés e com variância mínima. A função estrutural de Kolmogorov é atualmente designada variograma e sua técnica de interpolação como krigagem.

Segundo Webster e Oliveira (2007), em 1930 houve avanços na teoria da amostragem, a destacar: *Sampling Techniques* de Cochran (1953) e *Sampling Methods for Censuses and Surveys* de Yates (1933), que introduziu a semivariância na pesquisa de campo.

Em 1960, Nils Ake Gustaf Matérn, preocupado com a eficiência na amostragem, reconheceu as consequências da correlação espacial e nomeou a várias funções atualmente usadas na análise de covariância espacial, como processos de pontos aleatórios e mostrou os efeitos delas nas estimativas globais (WEBSTER; OLIVEIRA, 2007).

Ainda em 1960, o engenheiro das jazidas de ouro da África do Sul, Danie Gerhardus Krige, observou que poderia melhorar as estimativas dos teores de minério nos blocos de mineração se tivesse em conta os teores dos blocos vizinhos. Ou seja, havia uma autocorrelação e descobriu empiricamente como usá-la com vantagem.

Em 1962, o matemático G. Matheron, teve a mesma preocupação em fornecer as melhores estimativas possíveis dos teores minerais a partir de dados de amostras autocorrelacionadas e usou pela primeira vez a palavra Geoestatística e definiu-a nos seguintes moldes: Geoestatística

é a aplicação do formalismo de funções aleatórias na investigação e estimativa de fenômenos naturais.

A história é longa, mas importa referir que outras figuras que se destacam na história da geoestatística são: H. J de Wijs, André G. Journel e Michel David, ex-alunos de Matheron, entre outros (YAMAMOTO; LANDIM, 2013; WEBSTER; OLIVEIRA, 2007; JOURNEL; HUIJBREGTS, 1989).

Segundo Yamoto e Landim (2013), a partir 1980, os métodos geoestatísticos passaram a ser usados em muitas áreas como mineração, engenharia de petróleo, hidrogeologia, meteorologia, ciência do solo, agricultura, pesca, poluição, proteção ambiental, etc.

Principais conceitos para compreender a geoestatística

Ao empregar os métodos geoestatísticos na análise da variabilidade espacial da densidade do solo e não só, o pesquisador pode-se deparar com vários conceitos de natureza técnica como:

- i. **Variável regionalizada** - também designada variável espacial ou variável georreferenciada, é uma medida ou observação que varia em relação à localização geográfica ou espacial (os valores dessa variável estão relacionados à posição geográfica ou espacial onde foram coletados), representada por $Z(x)$ ou $Z(x + h)$, onde h representa a distância entre um ponto $Z(x)$ e outro ponto $Z(x + h)$ (OYANA, 2021);
- ii. **Estacionaridade espacial** - termo usado para referir-se a um processo em que os valores mensurados do fenômeno em estudo são estatisticamente iguais numa determinada área de estudo. Isto é, as propriedades estatísticas do fenômeno ou variável em estudo não mudam significativamente de um local para outro em uma área geográfica específica;
- iii. **Tendência** - refere-se, à parte dos dados que não é explicada pela estrutura de dependência espacial, e envolve mudanças previsíveis e regulares que ocorrem nos dados à medida que se desloca em diferentes lugares no espaço, podendo ser no sentido leste - oeste ou norte - sul ou inverso;
- iv. **Variograma ou semivariograma** - tratados como similares por alguns autores e diferentes por outros, variograma é o erro médio quadrado produzido ao atribuir o valor de $Z(x_i + h)$ ao valor $Z(x_i)$. Isto é, descreve a variabilidade entre o ponto x e $x + h$ e é matematicamente equação 7. Já semivariograma é expressa pela equação 8, onde $N(h)$ é o número de pares $[Z(x_i) - Z(x_i + h)]$, separados por uma distância h (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1989; OYANA, 2021).

$$2\gamma^*(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (8)$$

iv.i Características do semivariograma

O variograma se destaca por exibir as seguintes características:

- a) **Efeito Pepita (Nugget Effect)** - definido por OYANA (2021), como um valor de semivariância $\gamma(h)$ que é significativamente diferente de zero para defasagens (lags) muito próximas de zero e não se trata de erro de medição, mas sim, um ruído branco, sugerindo que mesmo para pontos de dados que estão próximos uns dos outros, os valores do fenômeno ou variável em estudo podem não ser necessariamente idênticos (não apresentam dependência espacial); efeito pepita é uma descontinuidade na origem do variograma (DIGGLE; RIBEIRO Jr, 2007).

Em resumo, o efeito pepita indica a variabilidade não explicada pela dependência espacial e não é devido a erros de medição.

- b) **Patamar (Sill) e Alcance (Range)** - O variograma pode aumentar indefinidamente se a variabilidade do fenômeno não tiver limites em grandes distâncias. Se, por outro lado, o variograma se estabiliza em um valor do eixo y ou $\gamma(h)$, este valor é chamado **patamar (sill)**. A distância (eixo x) na qual o variograma se estabiliza é chamada de **Alcance (Range)** (CHILÈS; DELFINER, 2012).
- c) **Dependência espacial** - está relacionada à maior semelhança entre valores em locais próximos, e a sua análise é feita usando do variograma ou envelopes de simulação.
- v. **Isotropia e Anisotropia** - Um fenômeno ou variável em estudo é isotrópico quando o variograma não varia com a direção (diferentes ângulos) e neste caso, o variograma depende apenas da distância h entre os pontos. No caso oposto (variograma ser diferente para diferentes direções angulares), o variograma é **anisotrópico** (CHILÈS; DELFINER, 2012; DELGADO; MULLER, 2021).
- Segundo Yamamoto e Landim (2013) e Delgado e Muller (2021), quando o variograma é anisotrópico, pode ser caracterizado de três formas, a saber:
- a) **Anisotropia geométrica** - ocorre quando o alcance (range) do variograma varia em diferentes direções, mantendo constante o patamar. Isto é, mesmo patamar para alcances diferentes.
- b) **A anisotropia zonal** - ocorre quando o patamar (sill) do variograma varia em diferentes direções, mantendo constante o alcance (range). Isto é, mesmo alcance para patamares diferentes.
- c) **Anisotropia mista** - ocorre quando o patamar (sill) e o alcance (range) do variograma variam em diferentes direções.
- vi. **Validação cruzada** - também designado método *leave-one-out*, consiste em avaliar o quão bem um modelo variográfico (exponencial, gaussiano, esférico, entre outros) ajustado aos dados é capaz de prever os valores do fenômeno em estudo nos locais não amostrados. Isto é, sejam N dados $Z(x_i)$ e um modelo de variograma ajustado a partir do variograma amostral calculado a partir desses dados. A validação cruzada, consiste em estimar $Z(x)$ em cada ponto de amostra x_i a partir dos dados vizinhos $Z(x_j)$, para $i \neq j$, como se $Z(x_i)$ fosse desconhecido (CHILÈS; DELFINER, 2012).
- vii. **Krigagem** - nome oriundo da tradução francesa *krigeage* e inglesa *kriging*, foi atribuído ao geólogo sul-africano Danie G. Krige pela Escola Francesa de Geoestatística em homenagem, porque desenvolveu a técnica na década de 1950 (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A krigagem é uma técnica de estimação local que fornece o melhor estimador linear e não tendencioso (abreviado como BLUE do inglês best linear unbiased estimator) da característica desconhecida em estudo e seu preditor é definido na equação 9, onde $m(u)$ é a média (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1989).

$$Z^*(u) = m(u) + \sum_{i=1}^n \lambda_i(u)[Z(u_i) - m(u_i)] \quad (9)$$

A Krigagem é usada para prever (estimar) valores do fenômeno em estudo nos locais não amostrados. Esta previsão ou estimação é realizada sob a condição de dependência espacial, analisada por meio do semivariograma.

Segundo Chilès e Delfiner (2012) e Yamamoto e Landim (2013), a krigagem pode ser classificada em:

- a) **Krigagem simples ou estacionária** - quando a média do fenômeno em estudo é conhecida e constante em todo o espaço de análise e é definida pela equação 9 mas $m(u)$ é dado pela equação 10, onde m é uma constante:

$$m(u) = m \quad (10)$$

- b) **Krigagem ordinária** - quando a média é desconhecida, mas pode ser estimada e é constante apenas para uma região caracterizada por uma vizinhança e é definida pela equação 9 mas $m(u)$ é dado pela equação 11:

$$m(u) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (11)$$

- c) **Krigagem universal** - considera que a média muda dependendo da localização e pode ser estimada por uma função determinística e é definida pela equação 9, mas $m(u)$ é dado pela equação 12.

$$m(u) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \dots \quad (12)$$

Além dessas, existem outras variantes da krigagem, como a Krigagem indicadora, Krigagem de regressão, cokrigagem, entre outras. Essas variantes são usadas conforme as características dos dados e os objetivos da análise espacial.

Assim, na agronomia geoestatística pode ser utilizada para analisar a distribuição espacial de propriedades do solo, como teor de nutrientes, textura, densidade, pH, entre outros, de extrema importância para a gestão agrícola, planejamento de culturas e práticas de conservação do solo.

Métodos de amostragem do solo aplicáveis a geoestatística

A amostragem para solos envolve a seleção de uma porção específica (subconjunto, parte de algo, ...) da área de cultivo ou campo de interesse, da qual uma amostra de solo será coletada. A porção selecionada é conhecida como a amostra, enquanto a área total de interesse, que inclui a plantação ou campo, é chamada de população.

Da teoria de amostragem, existem vários métodos, cada um com sua especificidade. Todavia, desde, os aplicados a solo, podem ser:

- i. **Amostragem aleatória simples (AAS)** - as localizações das amostras de solo são selecionadas de forma aleatória e independente em toda a área de estudo, permitindo que as amostras sejam representativas da variabilidade espacial do solo (CARTER; GREDORICH, 2008).
- ii. **Amostragem sistemática** - envolve a coleta de amostras de solo em intervalos (distâncias) regulares e pré-determinados em uma área específica (KLUTE; PAGE, 1986; CARTER; GREDORICH, 2008). A área amostrada deve ser percorrida em um padrão de zigue-zague para garantir uma distribuição uniforme dos locais de amostragem em toda a área (EASH et al., 2016).

Segundo Eash et al. (2016) e Carter e Gredorich (2008), a amostragem sistemática pode ser subdividida em:

- a) **Amostragem em grade (malha, grid)** - envolve a coleta de amostras em pontos igualmente espaçados em uma grade (grid, malha) e a amostragem não precisa ser em zigue-zague, podendo amostrar na vizinhança (pontos próximos ao ponto que deseja estimar) (CARTER; GREDORICH, 2008).
Segundo Eash et al. (2016), neste método o campo é dividido em quadrados (ou outra forma geométrica) de 1.2 a 2.0 ha (hectares) e em cada quadrado, se coleta 8 subamostras de solo separadamente, de seguida homogenizar-as e retirar aproximadamente 0,4 kg para submeter à análise. É importante colocar uma etiqueta que ajude a identificar cada subamostra quando mandado para análise. O conjunto de todas as subamostras constitui o tamanho da amostra, podendo variar 10 a 15 amostras individuais (EASH et al., 2016).
 - b) **Amostragem em Transectos** - as amostras são coletadas ao longo de transectos ou trilhas predefinidas, permitindo capturar a variação ao longo de uma trajetória específica, como uma linha de contorno.
- iii. **Amostragem estratificada** - mais aplicável quando há variações significativas nas características do solo, como tipo de solo. Para tal, o campo é dividido em subáreas por tipo de solo e é obtida uma amostra composta, podendo variar de 10-15 amostras individuais para cada tipo de solo, por amostragem aleatória sistemática ou aleatória simples (CARTER; GREDORICH, 2008; EASH et al., 2016).
- iv. **Amostragem preferencial** - ocorre quando as localizações das amostras não são selecionadas aleatoriamente ou de forma uniforme. O pesquisador tem informação do local onde o fenômeno em estudo ocorre com maior ou menor frequência (zona de maior e/ou menor influência), facilidade de acesso, recursos, etc. Em solos, essas zonas podem ser identificadas por meio de mapas de produtividade, histórico de gerenciamento passado, entre outros. Amostragem preferencial pode ocorrer de duas maneiras: primeiro, quando as localizações de amostragem (fenômenos em estudo) são intencionalmente concentradas em sub-regiões de A, onde se acredita que os valores subjacentes de $S(x)$ sejam maiores (ou menores) do que a média; ou, de forma mais geral, quando X e Y juntos formam um processo de ponto marcado no qual existe dependência entre os pontos X e as marcas Y (DIGGLE; MENEZES; SÚ, 2010).

Segundo Eash et al. (2016), as amostras de solo devem ser coletadas próximas ao plantio, mas, por praticidade, podem ser coletadas de 3 a 6 meses antes do plantio. O manuseio cuidadoso e o armazenamento adequado são essenciais para resultados precisos, e a coleta deve ocorrer na mesma época do ano, a cada 2 ou 3 anos, para minimizar variações sazonais nos resultados. Uma única amostra não deve representar mais de 10 ha.

Amostras de solo úmido devem ser armazenadas em uma caixa resfriada durante a coleta e em um refrigerador após a coleta. Se não for possível refrigerar ou congelar as amostras logo após a coleta, deve-se levar logo para o laboratório de análise de solo ou deixe-as secar ao ar, espalhando o solo em uma folha de plástico, com a mão na luva para evitar a contaminação do solo. Quebrar todos os torrões ou grumos e deixar secar à temperatura ambiente. Um ventilador pode ser usado para facilitar a secagem (EASH et al., 2016).

Materiais e Métodos

Este estudo foi realizado em uma lavoura de café no município de Lavras, localizado na região sudeste do Brasil, sul de Minas Gerais, tendo como coordenadas 21°14'59" de latitude sul e 44°59'59" de longitude oeste.

Na condução da pesquisa, foi utilizada uma amostragem sistemática em grid regular, e os métodos de amostragem foram o cilindro volumétrico (para amostrar o solo com estrutura conservada e enviar para o laboratório) e o penetrômetro de impacto de Stolf. Com esses métodos, foram coletadas 78 amostras de solo a uma profundidade de 20 a 40 cm, juntamente com os impactos correspondentes em 78 posições que próximas aos locais de coleta das amostras.

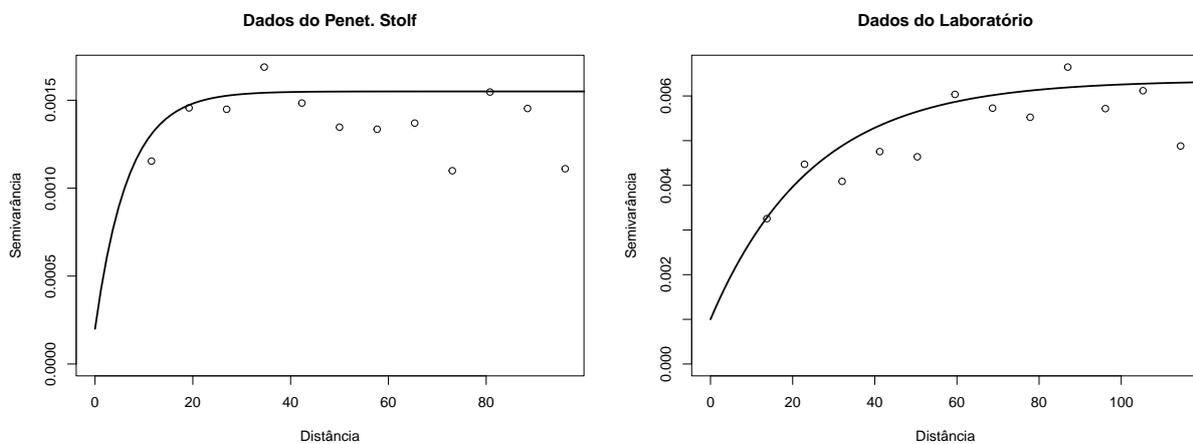
Visando mapear a densidade do solo, o modelo exponencial foi usado por ter-se ajustado aos dados, como ilustra a figura 1 e as respectivas equações foram: equação 13 para dados do penetrômetro de Stolf e equação 14 para dados laboratoriais.

$$\gamma(h) = 0.0002 + 0.00135 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{6.72}\right) \right] \quad (13)$$

$$\gamma(h) = 0.001 + 0.00535 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{24.75}\right) \right] \quad (14)$$

A partir da krigagem ordinária, fez-se mapeamento da densidade da lavoura, usando as densidades estimadas e preditas. Posteriormente, as densidades preditas foram comparadas, e foram analisados os erros de estimação envolvidos nos dois métodos.

Figura 1: Modelos exponenciais ajustados aos dados por método de estimação



Fonte: Autores.

Apresentação e discussão dos resultados

Análise descritiva

A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das densidades estimadas por método de estimação.

Nota-se na tabela 1 que ambos os métodos apresentaram uma assimetria para a esquerda (assimetria negativa), com os dados distribuídos em torno da média (desvio padrão) e também em torno da mediana (desvio absoluto da mediana). Isso ilustra que, mesmo na presença de outliers, as densidades mensuradas nos dois métodos foram estatisticamente iguais.

Tabela 1: Estatísticas das densidades estimadas pelos dois métodos

Densidade	n	\bar{x}	σ	Md	Mín	Máx	A	Assi	Curt	E.P.	D.A.M
Laboratorial	78	1.36	0.09	1.39	1.07	1.49	0.42	-1.62	2.24	0.011	0.06
Pent. Stolf	78	1.33	0.06	1.35	1.14	1.41	0.27	-1.29	0.87	0.007	0.04

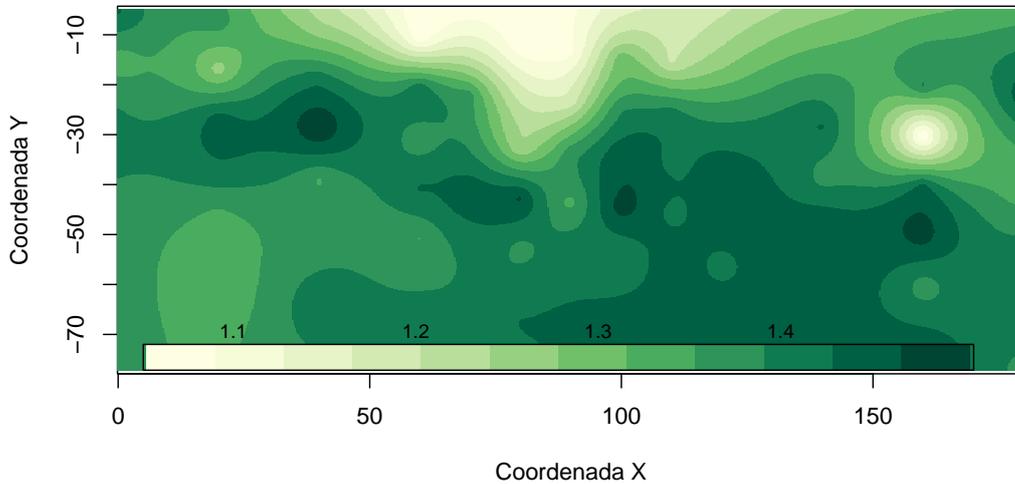
Fonte: Autores.

Legenda: n é tamanho da amostra; \bar{x} é a média; σ é o desvio padrão; Md é mediana; $Mín$ e $Máx$ são densidades mínimas e máximas respetivamente; A é a amplitude; $Assi$ é o coeficiente de assimetria; $Curt$ é curtose; $E.P$ é erro padrão médio; $D.A.M$ é o desvio absoluto da mediana.

Mapeamento da densidade do solo

As figuras 2 e 3 ilustram as densidades do solo, por método de estimação, sendo 2 densidade estimada usando dados laboratoriais e 3 densidade estimada usando dados provenientes do penetrômetro de Stolf.

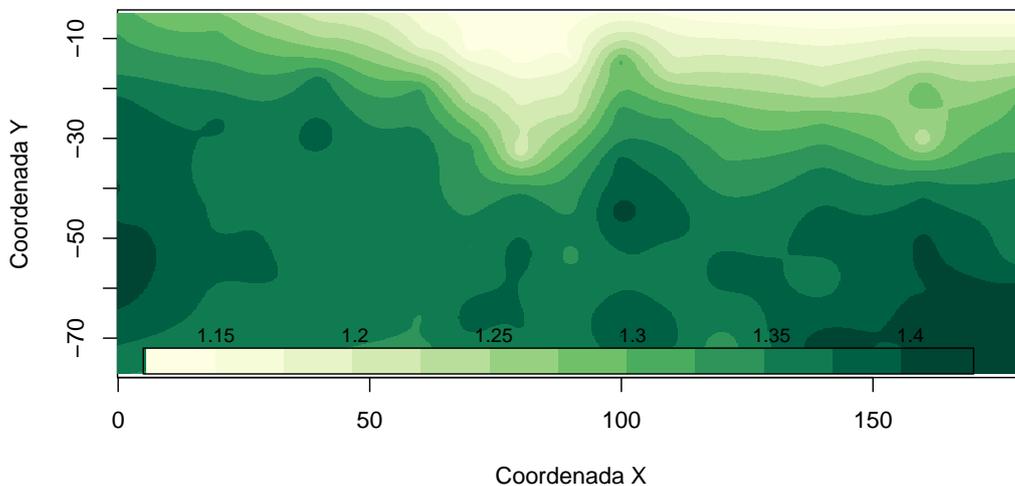
Figura 2: Mapa da densidade do solo estimada por dados laboratoriais



Fonte: Autores.

Na Figura 2, notam-se algumas manchas escuras representando maior densidade do solo e zonas muito claras, representando baixa densidade do solo.

Figura 3: Mapa da densidade do solo estimada por dados do penetrômetro de Stolf



Fonte: Autores.

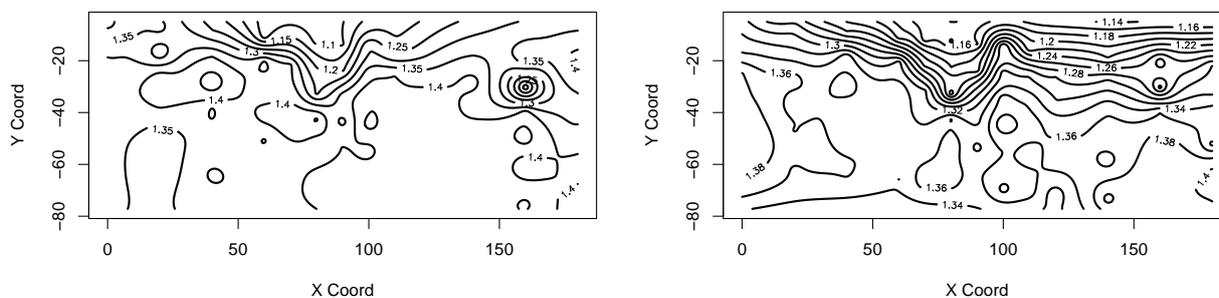
Na Figura 3, notam-se muitas manchas escuras representando maior densidade do solo, parte superior muito clara representando baixa densidade do solo e uma tendência de diminuição da densidade no sentido sul-norte.

Segundo Plaster (2014), a densidade granel dos solos superficiais não perturbados e não cultivados, varia de $0,8 \text{ g/cm}^3$ a $1,2 \text{ g/cm}^3$, mas se torna mais alta quando o solo é cultivado. Solos orgânicos têm baixa densidade ($0,1 \text{ g/cm}^3$ a $0,6 \text{ g/cm}^3$), enquanto solos arenosos são mais densos (até $1,8 \text{ g/cm}^3$), com densidades de subsolos sempre maiores e regiões glaciais particularmente densas devido à compressão do gelo.

Assim, dos dois mapas de densidade, pode-se afirmar que os dois métodos conseguiram ilustrar que a lavoura onde fez a amostragem do solo, é cultivada. Por questões de rigorosidade, não se poderá analisar a compactação usando estes mapas, pois embora haja uma escala de mensuração, não é possível visualizar todas as densidades do local amostrado, e para tal será usado o mapa de isolinhas (mapa de contornos).

As tendências gerais nos valores dos dados podem ser reveladas por um mapa de contorno, pois é uma excelente maneira de se familiarizar com um conjunto de dados (ISAACS; SRIVAS-TAVA, 1989).

Figura 4: Mapa de Isolinhas: à esquerda, dados laboratoriais; à direita, dados do Penetrômetro de Stolf



Fonte: Autores.

Segundo Plaster (2014), solo ideal consiste em cerca de 50% de partículas sólidas e 50% de espaço poroso, correspondentes a $1,3 \text{ g/cm}^3$ na densidade granel de um solo. À medida que a densidade a granel ultrapassa $1,4 \text{ g/cm}^3$, o crescimento das raízes começa a ser afetado pela falta de ar e resistência física direta. Com uma densidade a granel de $1,7 \text{ g/cm}^3$, as raízes não conseguem penetrar no solo.

Com base na Figura 4 lado esquerdo, nota-se que a densidade predita e estimada usando dados laboratoriais variou de $1,1 \text{ g/cm}^3$ a $1,45 \text{ g/cm}^3$. Destas estimativas, com base nas estimativas apresentadas por Plaster (2014), pode-se afirmar que a lavoura onde se extraiu a amostra do solo não apresenta compactação, salvo um ponto a norte, entre coordenada $y = -40$ e $y = -20$ e coordenada $x = 0$ e $x = 50$, que apresentou uma densidade de $1,45 \text{ g/cm}^3$.

Segundo Rakshit et al. (2021), a compactação resulta na diminuição da porosidade, condutividade hidráulica e permeabilidade ao ar, o que leva à deterioração das características físicas e da produtividade do solo. A mecanização pesada com práticas convencionais de preparo do solo a longo prazo é a principal causa da compactação no solo superficial ou subsolo. No entanto, solos levemente compactados podem ser propícios à produtividade devido à redução das chances de erosão.

Com base na Figura 4 lado direito, nota-se que a densidade predita e estimada usando dados do Penetrômetro de Stolf, variou de $1,14 \text{ g/cm}^3$ a $1,4 \text{ g/cm}^3$. Destas estimativas, com base nas estimativas apresentadas por Plaster (2014), pode-se afirmar a lavoura onde se extraiu a amostra do solo não apresenta compactação do solo.

Assim, com base nas densidades estimadas e preditas usando dados laboratoriais Figura 2 e do penetrômetro de Stolf Figura 3 se pode afirmar que no contexto agrícola dever-se-ia

selecionar culturas que se adaptem melhor ao solo não compactado, havendo necessidade de adicionar matéria orgânica onde se identificou ligeira compactação, Figura 2.

A partir dos mapas apresentados, se pode observar que embora a densidade do solo tenha ilustrado que a lavoura não é compactada, é notório, nos dados do Penetrômetro de Stolf (Figura 3) tendência de superestimação da densidade em locais que é muito baixa quando comparada com a densidade predita e estimada no laboratório Figura 4 à direita e respectivo mapa na Figura 2). Todavia, é importante notar que, apesar dessa superestimação, a direção-geral das variações na densidade do solo é consistente entre os dois métodos, ou seja, os padrões de variação da densidade são semelhantes, diferindo principalmente nas quantidades estimadas.

Estatísticas descritivas da diferença entre as densidades preditas

A Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas da diferença entre densidades preditas usando dados laboratoriais e dados do penetrômetro de Stolf.

Tabela 2: Estatísticas das densidades estimadas pelos dois métodos

Densidade	<i>n</i>	\bar{x}	σ	Md	Mín	Máx	A	Assi	Curt	E.P.	D.A.M
Labor (a)	490000	1.32	0.06	1.35	1.14	1.41	0.27	-1.29	2.24	0.62	0.03
P.Stolf (b)	490000	1.36	0.07	1.38	1.07	1.49	0.41	-1.72	0.87	3.04	0
<i>a - b</i>	490000	-0.04	0.06	0.05	-0.18	0.16	0.35	0.07	0.87	0.63	0

Fonte: Autores.

Legenda: Veja a legenda da Tabela 1.

Teste de correlação de Pearson

$$t = 911.13, df = 489998, p - value < 2.2e^{-16}$$

$$IC(\mu)_{95\%} \Rightarrow 0.7919 < \mu < 0.7940, cor : 0.7929888$$

A Tabela 2 mostra que a média das diferenças entre os dois métodos é aproximadamente -0,04, sugerindo que, em média, o Penetrômetro de Stolf resulta em valores ligeiramente mais altos do que o método laboratorial. Todavia, o teste de correlação de Pearson revelou uma forte correlação positiva 79,3% entre os dois métodos, sugerindo que, em geral, os resultados obtidos pelos dois métodos tendem a variar juntos.

Conclusão

Nesta pesquisa científica, o foco central foi a análise da precisão das estimativas de densidade de solo realizadas através do penetrômetro de Stolf-programa computacional Excel-VBA, tendo como referência as densidades obtidas a partir de análises laboratoriais. Os resultados deste estudo apontam para algumas conclusões importantes:

Observou-se que o penetrômetro de Stolf-programa computacional Excel-VBA tende a superestimar a densidade do solo em relação às medições laboratoriais. No entanto, é crucial destacar que o coeficiente de correlação de Pearson, que atingiu um valor de 0.7929888 (correspondente a 79.3%), revela uma forte relação positiva entre as densidades previstas pelos dois métodos. Isso sugere que, apesar da tendência de superestimação, as estimativas obtidas com o penetrômetro de Stolf estão significativamente associadas às obtidas em laboratório.

Portanto, o penetrômetro de Stolf pode ser considerado uma ferramenta útil em situações em que a precisão máxima não é um requisito crítico. Contudo, este método é uma opção viável e conveniente para pesquisadores e profissionais que desejam obter estimativas rápidas e acessíveis da densidade do solo, o que pode ser de grande utilidade em contextos agrícolas e de pesquisa do solo, pois é de baixo custo quando comparado com o laboratorial.

Referências Bibliográficas

- CARTER, M.R.; GREGORICH, E.G. *Soil sampling and methods of analysis*. 2nd edition. Taylor & Francis Group, LLC.
- CHILÈS, J. P.; DELFINER, P. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2012.
- CRASSIE, N. A. *Statistics for spatial data*. revised edition. John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- DELGADO, R. T.; MULLER, U. *Geostatistics for Compositional Data with R*. Springer Nature Switzerland AG. 2021.
- DIGGLE, P. J., MENEZES, R. e SU, T. (2010) Geostatistical inference under preferential sampling. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 59, 191-232.
- DIGGLE, P.J.; RIBEIRO Jr, P.J. *Model-based Geostatistics*. Springer Science + Business Media, LLC. 2007.
- EASH, N.S.; SAUER, T. J.; O'DELL, D. ; ODOI, E. *Soil Science Simplified*. 6th Edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2016.
- EMBRAPA. *VII plano diretor da EMBRAPA: 2020-2030*. Brasilia, DF : Embrapa, 2020.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *Applied geostatistics*. Oxford University Press, Inc. New York, 1989.
- JOURNAL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. *Mining Geostatistics*. ACADEMIC PRESS INC. Centre de Geostatistique, Fontainebleau, France, 1989.
- KLUTE, A.; PAGE, A. *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy, Inc., 1986.
- LAL, R.; SHUKLA, M. K. *Principles of soil physics*. Marcel Dekker, Inc. New York, 2005.
- MARTINS, C. A. S. et al. Avaliação da compactação de um latossolo vermelho amarelo sob diferentes coberturas vegetais. *Biosci. J.*, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 79-83, 2010.
- OYANA, T. J. *Spatial Analysis with R: Statistics, Visualization, and Computational Methods*. 2nd edition, Taylor & Francis Group, LLC. 2021.
- PLASTER, E.J. *Soil Science and Management*, 6th Ed. Delmar, Cengage Learning. 2014.
- R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2012. ISBN 3-900051-07-0. Disponível em: <http://www.R-project.org/>.
- RAKSHIT, A.; SINGH, S. K.; ABHILASH, P. C.; BISWAS, A. *Soil Science: Fundamentals to Recent Advances*, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2021.
- RIBEIRO Jr., P.J.; DIGGLE, P.J. *geoR: A package for geostatistical analysis*. R-NEWS, Vol 1, No 2, 15-18. ISSN 1609-3631. 2001.

STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L. C. F. d.; MARGARIDO, L. A. C. Penetrômetro de impacto stolf-programa computacional de dados em excel-vba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, SciELO Brasil, v. 38, p. 774-782, 2014.

SOARES, A. *Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente*. [S.l.]: Instituto Superior Técnico, 2006.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. et al. *Manual de métodos de análise de solo*. [S.l.]: Embrapa Brasília, DF, 2017.

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. *The Nature and Properties of Soils*. 15th edition. Pearson Education Limited. 2017.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, B. P. M. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo : Oficina de Textos, 2013.