

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR NORTE - RS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA:
AGRICULTURA E AMBIENTE**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA A
PENETRAÇÃO, GRANULOMETRIA E UMIDADE DO
SOLO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Luciano Campos Cancian

Frederico Westphalen, RS, Brasil

2015

VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO, GRANULOMETRIA E UMIDADE DO SOLO

Luciano Campos Cancian

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Agronomia – Agricultura e Ambiente, da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva

Frederico Westphalen, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Cancian, Luciano Campos
Variabilidade espacial da resistência a penetração,
granulometria e umidade do solo / Luciano Campos
Cancian.-2015.
59 p.; 30cm

Orientador: Vanderlei Rodrigues da Silva
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, CESNORS-FW, Programa de Pós-Graduação em Agronomia -
Agricultura e Ambiente, RS, 2015

1. Compactação do solo 2. Malha amostral 3. Atributos
de solo 4. Subamostras I. Silva, Vanderlei Rodrigues da
II. Título.

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Luciano Campos Cancian. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
E-mail: lucianocancian@msn.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Educação Superior Norte – RS
Programa de Pós-Graduação em Agronomia:
Agricultura e Ambiente**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA A
PENETRAÇÃO, GRANULOMETRIA E UMIDADE DO
SOLO**

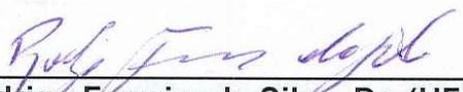
elaborada por
Luciano Campos Cancian

como requisito parcial para obtenção de grau de
Mestre em Agronomia

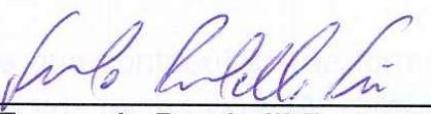
COMISSÃO EXAMINADORA:



Vanderlei Rodrigues da Silva, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Rodrigo Ferreira da Silva, Dr. (UFSM)



Fernando Perobelli Ferreira, Dr. (UFFS)

Frederico Westphalen, 27 de fevereiro de 2015.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e por tudo que tem proporcionado.

Aos meus pais, Nelso Piovesan Cancian e Lucia Campos Cancian, e todo o restante da família, por todo o amor e carinho e por serem à base de apoio que sempre me fortaleceu. Por sempre terem confiado e acreditado que eu estava no caminho certo. Essa vitória dedico a vocês.

À minha namorada, Amanda Grassmann, por ser esse presente que Deus me deu. Por todo o apoio e incentivo em todos os momentos, pela compreensão, pela ajuda nos trabalhos e pelos conselhos que sempre acalmam. Tudo isso me faz cada dia mais forte!

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, pela oportunidade de realizar o mestrado.

A CAPES pela concessão de bolsa de estudos.

Ao professor Eng Agr. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva, por sua valiosa orientação, compreensão, incentivo, confiança e amizade ao decorrer do Mestrado.

À Universidade Federal Fronteira Sul pela disponibilização do equipamento para realização das análises.

Aos colegas de laboratório de física do solo, Jaison, Jackson, Valdecir, Carlos Pires, Lucas Alves, Lucas Perin, Jonas, Valéria, Rose, Daniel, Marcela e Daiane pela colaboração na execução das atividades, em especial ao Felipe Bonini, Cicero Ortigara e Patrícia Pessotto.

Aos amigos Altamir, Ezequiel, Geomar e Cassiano pela amizade, colaboração e auxílio ao longo do período de mestrado.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta na concretização desta importante etapa de minha vida, **MEU MUITO OBRIGADO!**

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Agricultura e Ambiente
Universidade Federal de Santa Maria

VARIABILIDADE ESPACIAL DA RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO, GRANULOMETRIA E UMIDADE DO SOLO

AUTOR: LUCIANO CAMPOS CANCIAN
ORIENTADOR: VANDERLEI RODRIGUES DA SILVA
Frederico Westphalen, 27 de fevereiro de 2015.

A produtividade de uma área é caracterizada por uma série de fatores de solo, clima, potencial genético e ataque de doenças e pragas e matocompetição. Dentre estes vários fatores, no solo, a qualidade física não é levada em consideração para se determinar o potencial produtivo de uma lavoura. A resistência à penetração do solo (RP) deve receber atenção quando se busca melhorar a qualidade do solo, pois é um atributo que tem reflexo direto na produtividade das culturas. A variabilidade espacial das propriedades físicas do solo pode ter uma melhor avaliação através da Geoestatística, onde se determina a dependência espacial de cada atributo. Além da determinação da resistência à penetração, é recomendável relacionar informações complementares ao tipo de solo tais como, teor de água e granulometria, pois podem ser indicativos da confiabilidade dos resultados. Somado a isto, é importante determinar o número de subamostras que devem ser utilizadas, ou seja, quantas amostras devem ser realizadas em um ponto para que se tenha a maior precisão. Desta forma, o objetivo deste estudo foi verificar a variabilidade espacial dos valores de RP, granulometria e umidade do solo, bem como verificar a influência da granulometria e da umidade do solo no momento da determinação dos valores e definir qual o número mínimo de subamostras que devem compor cada amostra. Para tanto, o trabalho constitui-se em dois estudos. No primeiro, foram realizadas análises em 12 pontos equidistantes entre si, onde em cada uma das repetições foram realizadas determinações de RP em forma de cruz, espaçadas 0,20 m entre si, dentro de um raio máximo de 2 metros totalizando 41 amostras, onde foram testadas quatro metodologias de coleta. No segundo, em uma área de 4,58 ha, foi gerada uma malha amostral de 10 x 10 m, totalizando 425 pontos. Foram realizadas determinações de RP, granulometria e umidade do solo em quatro profundidades. Verificou-se que o uso de uma metodologia com coleta de menor número de subamostras não apresenta alterações significativas nos valores de coeficiente de variação, além de que a determinação de subamostras próximas ao ponto central, em malhas adensadas, elimina a possibilidade de embutir médias errôneas que possam pertencer ao ponto vizinho. Além disso, a malha amostral foi eficiente para demonstrar a variabilidade e os atributos apresentaram comportamento espacial diferenciado. O grau de compactação da área variou conforme a profundidade. Quanto à análise de correlação, somente o atributo umidade apresentou correlação negativa com a RP.

Palavras-chave: Compactação do solo. Malha amostral. Atributos de solo. Subamostras.

ABSTRACT

Master Dissertation
Graduate Program in Agronomy: Agriculture and Environment
Federal University of Santa Maria

SPATIAL VARIABILITY OF RESISTANCE TO PENETRATION, PARTICLE SIZE AND SOIL MOISTURE

AUTHOR: LUCIANO CAMPOS CANCIAN
ADVISOR: VANDERLEI RODRIGUES DA SILVA
Frederico Westphalen, February 27th, 2015.

Productivity of an area is characterized by a series of factors of soil, climate, genetic potential and attack of diseases and pests and competition. Among these various factors, in the soil, the physical quality is not taken into consideration in order to set the production potential of a crop. The resistance to penetration of the soil (RP) should receive attention when it seeks to improve the quality of the soil, because it is an attribute that has direct reflection on crop productivity. Spatial variability of soil physical properties may have a better evaluation by Geostatistics, which determines the spatial dependence of each attribute. In addition to the determination of resistance to penetration, it is recommended connecting additional information such as soil type, water content and particle size, as they may be indicative of the reliability of the results. Added to this, it is important to determine the number of subsamples which must be used, i.e. how many samples must be carried out at one point to provide greater precision. Thus, the objective of this study was to verify the spatial variability of the values of RP, particle size and soil moisture, as well as verify the influence of the particle size and soil moisture at the time of determination of the values and define what the minimum number of subsamples which must compose each sample. To this end, the work is in two studies. In the first one, analysis were performed in 12 equidistant points among themselves, where in each of the repetitions were made determinations of cross shaped RP, spaced 0.20 m between each other within a maximum radius of 2 m totaling 41 samples, where four collection methodologies were tested. In the second one, in an area of 4.58 ha, was generated a sample of 10 x 10 m, with a total of 425 points. RP determinations were performed, particle size and soil moisture in four depths. It was found that using a methodology to collect least number of subsamples shows no significant changes in the values of coefficient of variation and the determination of subsamples near the midpoint, in densely populated meshes, eliminates the possibility of embedding medium which may belong to the erroneous point neighbor. Furthermore, the sampling mesh was efficient to demonstrate the variability and attributes presented spatial differential behaviour. The degree of compression of the varied depending on the depth. The correlation analysis, only the attribute humidity presented negative correlation with the RP.

Keywords: Soil compaction. Sampling grid. Soil properties. Subsamples.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1 – Metodologias de coleta utilizados para determinação do número de subamostras. Boa Vista das Missões/RS, 2014..... 19

CAPÍTULO II

- Figura 1 – Imagem do grid de coleta, totalizando 4,58 ha. Boa Vista das Missões/RS, 2014.30
- Figura 2 – Modelo de coleta para determinação de Resistência a penetração. Boa Vista das Missões/RS, 2014.31
- Figura 3 – Espacialização dos valores de resistência mecânica do solo a penetração (MPa) em quatro profundidades, em que: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo Vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.....40
- Figura 4 – Espacialização dos valores de umidade do solo (kg kg^{-1}) em quatro profundidades, em que: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo Vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.42
- Figura 5 – Espacialização dos valores de argila (%) em quatro profundidades, em que: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo Vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.43
- Figura 6 – Espacialização dos valores de Areia (%) em quatro profundidades, em que: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.45
- Figura 7 – Espacialização dos valores de Silte (%) em quatro profundidades, em que: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo Vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.46
- Figura 8 – Correlação de Pearson entre RP (MPa) e Umidade Gravimétrica, em quatro profundidades, em que: ((A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo Vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.....47

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 – Teste de normalidade (W) para os fatores Metodologia e Profundidade, Boa Vista das Missões/RS, 2014.....	20
Tabela 2 – Tabela da análise de variação (ANOVA) das médias de resistência mecânica do solo à penetração (MPa) das 4 metodologias testadas, em diferentes profundidades. Boa Vista das Missões/RS, 2014.	21
Tabela 3 – Médias de resistência mecânica do solo à penetração (MPa), em diferentes profundidades. Boa Vista das Missões/RS, 2014.	21
Tabela 4 – Coeficientes de variação (%) obtidos das diferentes metodologias de determinação da resistência mecânica do solo à penetração, em diferentes profundidades. Boa Vista das Missões/RS, 2014.....	22

CAPÍTULO II

Tabela 1 – Análise descritiva dos teores de umidade do solo (Ug; kg kg ⁻¹), teor de argila, areia e silte (%) e resistência à penetração (MPa) em cada profundidade da área de estudo.....	35
Tabela 2 – Parâmetros geoestatísticos dos valores umidade do solo (kg kg ⁻¹), teores de argila, areia e silte (%) e resistência à penetração (MPa) em diferentes profundidades. Boa Vista das Missões/RS, 2014.....	37

LISTA DE EQUAÇÕES

CAPÍTULO II

Umidade gravimétrica = $Ug = \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}}$ 32

Semivariograma = $\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$ 33

LISTA DE APÊNDICES

CAPÍTULO II

Apêndice A – Semivariogramas da variável Resistência a penetração para as profundidades: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m. Boa vista das Missões/RS, 2014.....	55
Apêndice B – Semivariogramas da variável Umidade Gravimétrica para as profundidades: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m. Boa vista das Missões/RS, 2014.....	56
Apêndice C – Semivariogramas da variável Argila para as profundidades: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m. Boa vista das Missões/RS, 2014.....	56
Apêndice D – Semivariogramas da variável Areia para as profundidades: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m. Boa vista das Missões/RS, 2014.....	57
Apêndice E – Semivariogramas da variável Silte para as profundidades: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m. Boa vista das Missões/RS, 2014.....	58

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	12
CAPÍTULO I.....	14
NÚMERO DE SUBAMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM UM LATOSSOLO	14
2.1 Introdução.....	15
2.2 Material e Métodos	17
2.3 Resultados e Discussão	20
2.4 Conclusões	23
2.5 Referências Bibliográficas	23
CAPÍTULO II	26
3.1 Introdução.....	27
3.2 Material e Métodos	29
3.2.1 Área de estudo	29
3.2.2 Amostragem de solo.....	30
3.2.3 Determinações	31
3.2.4 Análise dos dados	32
3.3 Resultados e Discussão	34
3.4 Conclusões	48
3.5 Referências Bibliográficas	49
CONCLUSÃO GERAL.....	59

INTRODUÇÃO GERAL

A importância da qualidade física do solo muitas vezes é desconsiderada quando se fala em produtividade, mas representa uma função de extrema importância ao pleno desenvolvimento das culturas.

Um dos indicadores mais utilizados para avaliar a qualidade física de um solo é a resistência do solo à penetração. A realização de avaliações da qualidade física do solo através da resistência do solo a penetração é uma boa forma de se verificar a eficiência de diferentes sistemas de manejo, e com isso, as suas implicações na qualidade física do solo, refletindo diretamente no desenvolvimento radicular da planta.

A produtividade de uma área é diferenciada por zonas distintas, de modo que algumas partes possuem alta produtividade, enquanto outras ficam abaixo da média. Esse fato pode estar diretamente ligado com a variabilidade espacial do estado de compactação do solo.

A análise da correlação entre a produtividade de uma área e o atributo resistência a penetração poderia revelar dados importantes referentes aos futuros manejos desta área, possibilitando que possíveis intervenções que possam ser realizadas para potencializar maiores produtividades e a obtenção de áreas mais homogêneas.

A variabilidade espacial das propriedades físicas do solo pode ter uma melhor avaliação através da Geoestatística. Além de considerar cada ponto amostral da área como um valor, ela associa a posição geográfica em que o ponto se encontra, possibilitando que variáveis amostradas mais próximas tenham valores mais semelhantes e sejam mais bem correlacionadas entre si do que amostras mais distantes do ponto.

A geoestatística é uma técnica que permite analisar uma determinada variável que apresenta ou não estrutura espacial, e uma vez que se conheça o modelo dessa dependência espacial, é possível fazer o mapeamento da área.

Todavia, um dos maiores entraves na aplicação de métodos para estudo de atributos físicos do solo é a grande quantidade de amostras necessárias para definir como devem ser gerados os valores médios, através de suas subamostras. Desta

forma, o conhecimento da variabilidade de atributos físicos é importante para a tomada de decisão das técnicas de manejo a serem utilizadas numa determinada área, por meio de uma metodologia amostral adequada.

Desta forma, os objetivos deste estudo foram: i) verificar a variabilidade espacial dos valores de resistência à penetração, granulometria e umidade do solo; ii) verificar a influência da granulometria e da umidade do solo no momento da determinação dos valores de RP; e iii) definir qual o número mínimo de subamostras que devem compor cada amostragem de RP em campo.

CAPÍTULO I

NÚMERO DE SUBAMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM UM LATOSSOLO

RESUMO

O monitoramento periódico da qualidade dos atributos físicos do solo através da resistência a penetração é uma boa alternativa de avaliar diferentes sistemas de manejo. A dificuldade para obter representatividade em amostras de solo para determinar seus atributos físicos está na desuniformidade espacial dos seus valores, conhecida como variabilidade do solo. Todavia, um dos maiores entraves na aplicação de métodos para estudo de atributos físicos do solo é a grande quantidade de amostras necessárias para definir como devem ser gerados os valores médios, através de suas subamostras. Dessa forma, o objetivo deste estudo foi avaliar diferentes intensidades e metodologias de amostragem, bem como verificar o número de subamostras necessárias para compor um ponto amostral em determinações de resistência mecânica do solo à penetração (RP). Para isso, foram realizadas determinações em 12 pontos equidistantes entre si, onde em cada uma das repetições foram realizadas determinações de RP em forma de cruz, espaçadas 0,20 m entre si, dentro de um raio máximo de 2 m do ponto central de coleta, totalizando 41 amostras. As metodologias de coleta testadas foram: Média das 5 amostras centrais; Média das 13 amostras centrais, dentro de um raio de 0,5 m distante do ponto central; Média das 21 amostras centrais, dentro de um raio de 1 m; Média das 41 amostras centrais, dentro de um raio de 2 m distante do ponto. As médias de RP obtidas pelas metodologias não apresentaram significância. Quando comparadas em profundidade, todas as metodologias apresentaram a mesma diferença. Com isso, conclui-se que o uso uma metodologia com coleta de menor número de subamostras não apresenta alterações significativas nos valores de coeficiente de variação, além de que a determinação de subamostras próximas ao ponto central, em malhas adensadas, elimina a possibilidade de embutir médias errôneas que possam pertencer ao ponto vizinho.

Palavras-chave: amostragem; metodologias; coleta.

SOIL PENETRATION RESISTENCE AND SUBSAMPLING INTENSITY IN A SOUTH BRAZIL OXISOL

ABSTRACT

Periodic monitoring of the quality of the physical attributes of soil through the resistance to penetration is a good alternative to evaluate different management systems. The difficulty to obtain representativity in soil samples to determine the soil's physical attributes is in space unevenity of its values, known as soil variability. However, one of the biggest obstacles in the application of methods for study of physical attributes of the soil is the large amount of samples required to define how they should be generated average values, through their subsamples. Thus, the objective of this study was to evaluate different intensities and sampling methodologies, as well as verify the number of subsamples required to compose a sample point in determinations of soil mechanical resistance to penetration (RP). To do this, were held in 12 equidistant points determinations among themselves, where in each of the repetitions were made determinations of cross shaped RP, spaced 0.20 m between each other within a maximum radius of 2 m from the center point of collection, totaling 41 samples. The collection methodologies tested were: average of 5 core samples; Average of 13 core samples, within a radius of 0.5 m away from the center point; Average of 21 core samples, within a radius of 1 m; Average of 41 core samples, within a radius of 2 m away from the point. RP averages obtained by methodologies do not have significance. When compared in depth, all the methodologies presented the same difference. With this, it is concluded that using a methodology to collect least number of subsamples shows no significant changes in the values of coefficient of variation and the determination of subsamples near the midpoint, in densely populated meshes, eliminates the possibility of embedding medium which may belong to the erroneous point neighbor.

Keywords: Subsamples; methodologies; collection.

2.1 Introdução

Dentre as propriedades físicas do solo afetadas pela compactação, a resistência do solo à penetração é uma das mais estudadas, sendo investigada através da penetrometria (BEUTLER et al., 2007).

A dificuldade para se obter representatividade em amostras de solo para determinar seus atributos físicos ocorre devido a desuniformidade espacial dos seus valores, o que é conhecido como variabilidade do solo. A variabilidade espacial encontrada em solos pode ser atribuída a ação dos fatores de formação ativos

(clima e organismos) sobre o material de origem durante a pedogênese, caracterizando, principalmente variabilidade em maiores distâncias, e a ação antrópica, através das atividades agrícolas, em menores distâncias.

Em razão da existência dessa variabilidade, faz-se necessário estabelecer um critério rigoroso de amostragem para determinação de resistência a penetração que permita extrair informações representativas e com acurácia para os atributos do solo de uma determinada área.

Todavia, um dos maiores entraves na aplicação de métodos para estudo de atributos físicos do solo é a grande quantidade de amostras necessárias para definir como devem ser gerados os valores médios, através de suas subamostras. Desta forma, o conhecimento da variabilidade de atributos físicos é importante para a tomada de decisão das técnicas de manejo a serem utilizadas em determinada área, por meio de uma metodologia amostral adequada.

Os princípios da experimentação, estabelecidos por meio do método estatístico clássico, consideram que a variabilidade do solo ocorre de forma totalmente aleatória, admitindo-se que suas variáveis apresentem uma distribuição de frequência do tipo normal (SANTOS e VASCONCELOS, 1987).

A metodologia aplicada para mapear a variabilidade espacial dos solos é de suma importância, pois só a partir de sua modelagem é possível gerar mapas mais detalhados e com maior precisão das áreas estudadas para uma determinada variável analisada. Desta forma, o estudo dos aspectos da amostragem do solo com o intuito de subsidiar a tomada de decisão para a utilização e recomendação destas técnicas em ambientes distintos tem sido preocupação constante da pesquisa (GROENIGEN et al., 1999; LARK, 2000).

A alteração do comportamento de atributos físicos dos solos em diferentes locais da paisagem pode ser entendida pela caracterização da variabilidade espacial deles mediante técnicas de geoestatística, identificando locais específicos na área estudada. Devido à existência dessa variabilidade, faz-se necessário estabelecer critérios rigorosos para determinação de atributos que permitam, a partir do uso de técnicas de amostragem, extrair informações representativas de uma área com nível de confiabilidade adequado.

A melhor forma de se estabelecer um plano de amostragem deve ter relação com variabilidade espacial dos atributos físicos de um solo, bem como a melhor densidade para compor amostras representativas desse solo. Tavares Filho e Ribon

(2008) citam que pesquisas sobre número de amostras representativas para estudos de compactação, utilizando-se penetrômetro, são escassas e as repetições feitas em campo são variáveis, o que pode tornar as repetições insuficientes para avaliação, gerando resultados não representativos e não confiáveis.

Souza et al. (1997) relataram que o conhecimento do alcance da dependência espacial dos atributos do solo pode ser um critério para definir o intervalo das amostragens. Contudo, o número de amostras pode variar com a densidade de coleta ou da malha amostral utilizada.

De acordo com Coelho (1983), atributos como pH, porosidade total, densidade do solo, teor de argila e silte, por possuírem baixo valor de coeficiente de variação (CV), podem ser estimadas com menor número de subamostras. Da mesma forma, Souza (1992) obteve resultados comprovando que para as variáveis porosidade total, densidade do solo, silte e areia, recomendam-se de 10 a 15 subamostras com uma variação em torno da média inferior a 5%.

Desta forma, o objetivo deste estudo foi analisar diferentes intensidades e metodologias de amostragem, bem como verificar o número de subamostras necessárias para compor um ponto amostral e testar diferentes intensidades de subamostragem em determinações de resistência mecânica do solo à penetração.

2.2 Material e Métodos

O estudo foi realizado em março de 2014, em uma área de cultivo agrícola de uma propriedade rural no município de Boa Vista das Missões, no norte do Estado do Rio Grande do Sul situada nas coordenadas 27° 44' 12" S e 53° 21' 08". O relevo da região é suave ondulado e o solo é caracterizado como Latossolo Vermelho distrófico típico (SANTOS et al., 2013). Na área é adotado o Sistema de Plantio Direto com rotação de culturas há 7 anos. As últimas culturas cultivadas foram aveia preta, soja, nabo forrageiro e, a mais recente, milho.

De acordo com a classificação de Peel et al. (2007), o clima da região é do tipo Cfa – temperado chuvoso, com precipitação média anual elevada, geralmente entre 1.800 e 2.100 mm, bem distribuída ao longo do ano e subtropical do ponto de vista térmico. A média de temperatura anual é em torno 18°C, com máximas no

verão podendo atingir 41°C e mínimas no inverno atingindo valores inferiores a 0° C (MORENO, 1961).

As análises de resistência a penetração (RP) foram realizadas até a profundidade de 0,40 m, utilizando um penetrômetro eletrônico automatizado modelo Falker Solo Track PLG 5300, com resolução de 10 mm, velocidade constante de 10 mm s⁻¹. As medições foram obtidas a partir de um cone de 30°.

Foram realizadas análises em 12 pontos, sendo estes considerados como repetições, equidistantes entre si, em uma área previamente selecionada, onde foram excluídas as extremidades da lavoura, locais de manobra de máquinas, curvas de nível, processos erosivos e outras possíveis fontes de variação sazonal que pudessem interferir de forma temporal. Assim, buscou-se selecionar pontos homogêneos do ponto de vista visual.

Para o experimento, foram criados os modelos de coleta (Figura 1), onde em cada uma das 12 repetições foram realizadas determinações de RP em forma de cruz, espaçadas 0,20 m entre si, dentro de um raio máximo de 2 m do ponto central de coleta, totalizando 41 amostras.

As metodologias de coleta testadas foram os seguintes: Metodologia 1 – Média das 5 amostras centrais; Metodologia 2 – Média das 13 amostras centrais, dentro de um raio de 0,5 m distante do ponto central; Metodologia 3 – Média das 21 amostras centrais, dentro de um raio de 1 m; Metodologia 4 – Média das 41 amostras centrais, dentro de um raio de 2 m distante do ponto.

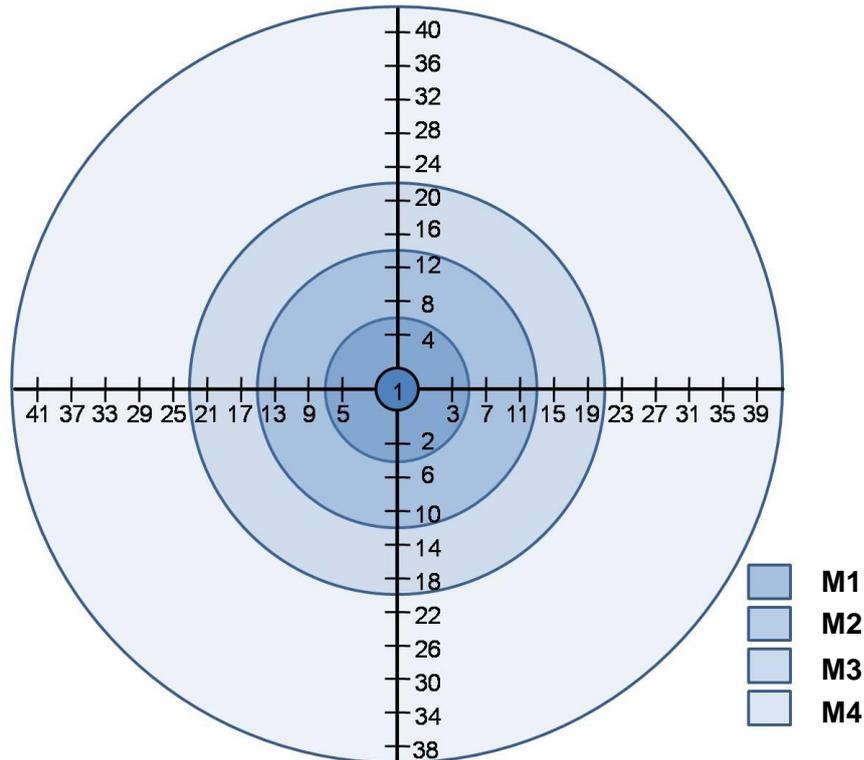


Figura 1 – Metodologias de coleta utilizados para determinação do número de subamostras. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

O solo foi dividido nas profundidades de: 1) 0,00-0,10 m; 2) 0,11-0,20 m; 3) 0,21-0,30 m; 4) 0,31-0,40 m. Além das médias, foram calculados os coeficientes de variação das metodologias. Os dados foram analisados estatisticamente em modelo fatorial, com auxílio do pacote estatístico Statistical Analysis System – SAS 8.0 (SAS INSTITUTE, 1999). A dependência central dos dados foi verificada por meio do Teste W ($p < 0,05$) (SHAPIRO e WILK, 1965). Foram considerados como distribuição de probabilidade normal os dados que obtiveram resultado de p-valor $> 0,05$, ou seja, valor não significativo em nível de 5% de significância. Os dados também foram submetidos ao teste T, a 5% de probabilidade.

2.3 Resultados e Discussão

Através da análise do teste W, verificou-se que todas as metodologias testadas, em ambas as profundidades, apresentavam normalidade dos dados (Tabela 1). Segundo Ivo e Fonteles Filho (1997), a normalidade da distribuição dos dados é a premissa básica para a aplicação da maioria dos testes de significância. Isso determina a necessidade de uma maior atenção a esta medida quando se comparam dados. Isso indica também a validação do uso da média como uma medida de tendência central de determinado conjunto de dados.

Tabela 1 – Teste de normalidade (W) para os fatores Metodologia e Profundidade de coleta, Boa Vista das Missões/RS, 2014.

Fator	W ⁽¹⁾
Metodologia	0,83 _{ns}
Profundidade	0,85 _{ns}

⁽¹⁾ Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: () significativo em níveis de $p < 0,05$ e (ns) não significativo

Considerando a necessidade de reduzir o número de coletas de amostras em campo, sem, no entanto, diminuir a acurácia e a confiabilidade dos dados, buscou-se determinar uma metodologia adequada às análises de campo. Os dados da análise de variância (Tabela 2) demonstram a inexistência de diferença significativa entre as metodologias testadas.

Tabela 2 – Tabela da análise de variação (ANOVA) das médias de resistência mecânica do solo à penetração (MPa) das 4 metodologias testadas, em diferentes profundidades. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

Fator de Variação	GL	SQ	QM	Fc	P>F
Metodologia	3	0,004	0,001	0,03	0,991
Profundidade	3	43,242	14,414	303,35	<0,001
Interação Metod. x Prof.	9	0,119	0,013	0,28	0,979
Repetição	11	17,486	1,589	33,45	<0,001
Erro	165				
Total	191				
Média	38,2				
CV (%)	11,65				
R ²	0,88				

Embora não tenha ocorrido interação significativa entre os fatores de variação e também efeito simples para o método, houve efeito significativo apenas para profundidade (Tabela 3), a fim de demonstrar a semelhança com que as metodologias expressam as diferenças e modificações, mesmo quando comparadas em profundidade.

Tabela 3 – Resistência mecânica do solo à penetração (MPa), em diferentes profundidades. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

Profundidade (m)	Met 1 ⁽¹⁾	Met 2 ⁽²⁾	Met 3 ⁽³⁾	Met 4 ⁽⁴⁾	Média
0,00-0,10	1,099	1,073	1,024	1,011	1,05 c
0,10-0,20	2,140	2,182	2,151	2,130	2,15 ab
0,20-0,30	2,176	2,203	2,203	2,221	2,20 a
0,30-0,40	2,056	2,055	2,081	2,119	2,07 b

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de significância.

Pode-se verificar a ausência de discrepância entre os dados, seja na Metodologia T1 (onde são coletadas apenas 5 subamostras) quanto na T4, que faz

uso de um número maior de subamostras (42 subamostras). Isso demonstra a indiferença entre fazer uso de um ou de outro método, ao passo que a diferença entre a primeira profundidade com as demais foi detectada por ambas as metodologias de coleta.

Um menor número de subamostras na coleta, além de um menor custo e maior eficiência, em se tratando de grandes áreas, também pode trazer dados mais confiáveis em determinadas situações. Vários trabalhos (VIEIRA, 1997; CARVALHO et al., 2001) têm relatado que a variabilidade das propriedades do solo apresenta dependência espacial, ou seja, o valor em qualquer ponto amostrado depende, de algum modo, de seu vizinho, o que leva a constatação de um problema: em malhas de coleta adensadas, onde os pontos situam-se muito próximos de seus vizinhos, o uso de um número elevado de repetições, bem como a determinação de subamostras em um raio fora do ponto central, levaria a aquisição de dados inconsistentes e conclusões errôneas sobre estados de compactação real daquele ponto.

É possível verificar também a ocorrência de coeficientes de variação muito semelhantes entre os métodos (Tabela 4). Enquanto o Método 1 apresentou um CV médio das profundidades de 22,34 %, os Métodos 2 e 3 apresentaram ligeira redução. No entanto, o Método 4 apresentou valor médio de CV mais elevado, se assemelhando ao valor encontrado no Método 1.

Tabela 4 – Coeficientes de variação (%) obtidos das diferentes metodologias de determinação da resistência mecânica do solo à penetração, em diferentes profundidades. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

Profundidade (m)	M1	M2	M3	M4
0,00-0,10	22,04	19,35	20,79	20,63
0,10-0,20	25,26	21,54	20,84	20,68
0,20-0,30	24,81	21,07	22,49	21,43
0,30-0,40	17,23	14,88	13,19	17,82
Média	22,34	19,21	19,33	20,15

Montesinos et al., (2002), considerando a necessidade de reduzir o número de coletas de amostras no campo sem, contudo, imprimir aos resultados um erro

elevado em torno da verdadeira média populacional, afirma que é admissível que um erro de até 20 % em torno da média para obter resultados confiáveis.

É possível verificar que a Metodologia 1 apresenta boa representatividade e comportamento relativamente semelhante. Este fato pode servir de embasamento para a utilização de tal metodologia em coletas com malha amostral mais adensada. Desta forma, abrindo-se mão de obter valores mais distantes do ponto central, que por sua vez podem carregar consigo valores dependentes do ponto vizinho, esta pode ser a melhor alternativa para a coleta.

Quanto às demais metodologias, verifica-se que possuem comportamento semelhante quando visualizadas a distribuição de suas médias em profundidade.

2.4 Conclusões

O uso uma metodologia com coleta de 5 subamostras, para o solo testado, não obteve alterações significativas nos valores de coeficiente de variação.

A determinação de subamostras próximas ao ponto central, em malhas adensadas, elimina a possibilidade de embutir médias errôneas que possam pertencer ao ponto vizinho, sendo, desta forma, recomendada a utilização de cinco determinações para compor uma amostra.

2.5 Referências Bibliográficas

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 146-151, 2007.

CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R.; MARINHO, P. R.; DECHEN, S. C.; MARIA, I. C.; POTT, C. A. & DUFRANC, G. **Avaliação da variabilidade espacial de parâmetros físicos do solo sob plantio direto em São Paulo– Brasil**. Campinas, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (Comunicado Técnico, 12), 2001.

COELHO, M. G. Variabilidade espacial de características físicas e químicas em um solo salino-sódico. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 14, n. 01/02, p. 149-156, 1983.

IVO, C. T. C. e FONTELES FILHO, A. A. **Estatística pesqueira: Aplicações em engenharia de pesca**. Fortaleza, Tom Gráfica, 1997.193p.

GROENIGEN, V. J. W.; SIDERIUS, W.; STEIN, A. Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the kriging variance. **Geoderma**, Amsterdam, v. 87, n. 3-4, p. 239-259, 1999.

LARK, R. M. Designing grids from imprecise information on soil variability, an approach based on the fuzzy kriging variance. **Geoderma**, Amsterdam, v. 98, n. 1-2, p. 35-39, 2000.

MONTESINOS, M. G.; CÁMARA, J. M. F.; TOMÉ, J. M.; CÁMARA, M. A .O.; GARCÍA, F. H.; VICENTE, R. M. & DÍEZ, M. B. Número de submuestras necesarias para la obtención de una muestra de suelo representativa. **Agríc. Vergel**, 241:9-18, 2002.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Secção de Geografia, 46 p. 1961.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Australia. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644. ISSN 1027-5606, 2007.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, H. L. e VASCONCELLOS, C. A. Determinação do número de amostras de solo para análise química em diferentes condições de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 11:97-100, 1987.

SAS INSTITUTE – **Statistical Analysis System**. SAS/STAT User´s Guide 8.0. North Caroline, NC: SAS Institute Inc., 1999. 3365p.

SARAIVA, O. F.; ALVAREZ, V. H. & COSTA, L. M. Variabilidade de algumas características físicas e químicas de um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico distrófico. **Revista Ceres**, 39:529-541, 1992.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

SOUZA, L. S. **Variabilidade espacial do solo em sistema de manejo**. 1992. 162 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.2 1, n. 3, p. 367-372, 1997.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 487-494, 2008

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos de uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, 56:181-190, 1997.

CAPÍTULO II

VARIABILIDADE ESPACIAL VERTICAL E INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E UMIDADE NA RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO DO SOLO

RESUMO

O sistema de plantio direto aplicado de forma incorreta, associado ao grande número de operações com máquinas pesadas acarreta a um aumento na compactação do solo. Para determinar tal compactação, a propriedade física que melhor descreve o dano causado nas plantas é a resistência mecânica do solo a penetração (RP). Tal atributo pode correlacionar-se com outras variáveis, ocasionando aumento ou redução de seu valor durante a determinação, e o solo, por mais homogêneo que seja, apresenta variabilidade tanto em superfície quanto em profundidade no solo. O objetivo deste estudo foi verificar a variabilidade espacial e vertical da resistência a penetração, granulometria e da umidade gravimétrica do solo. Para isso, em uma área cultivada no município de Boa Vista das Missões/RS, com 4,58 ha, foi gerada uma malha amostral de 10 x 10 m, totalizando 425 pontos. As profundidades estudadas foram 0-0,10 m, 0,11-0,20 m, 0,21-0,30 m e 0,31-0,40 m. Para a determinação da RP foi utilizado um penetrômetro automatizado com velocidade de inserção no solo constante. As coletas de umidade e granulometria foram realizadas com um trado, nas diferentes profundidades. Mapas foram gerados através de análise geoestatística para cada atributo, e posteriormente, comparadas as correlações entre as variáveis. Os resultados mostraram que a malha amostral foi eficiente para demonstrar a variabilidade e os atributos apresentaram comportamento espacial diferenciado. O grau de compactação da área variou conforme a profundidade. Quanto à análise de correlação, somente o atributo umidade apresentou correlação negativa com a RP.

Palavras-chave: Resistência à penetração; geoestatística; amostragem.

ABSTRACT

The no tillage system applied incorrectly, associated with the large number of operations with heavy machinery leads to an increase in soil compaction. To determine such compaction, physical property that best describes the damage

caused in plants is the mechanical resistance of soil to penetration (RP). Such attribute can correlate with other variables, causing increase or decrease of its value during the determination, and the soil which is more homogeneous, presents variability both at the surface and in depth in the soil. The aim of this study was to verify the spatial and vertical variability of resistance to penetration, granulometry and gravimetric soil moisture. To do this, in a cultivated area of the Boa Vista das Missões city, North of Rio Grande do Sul state, Brazil. with 4.58 ha, it was generated a sample of 10 x 10 m, with a total of 425 points. The depths studied were 0-0.10 m, -0.20 m, -0.30 0.21 0.11 m and 0.31 -0.40 m. For the determination of resistance to penetration was used a penetrometer automated with constant ground insertion speed. The collections of humidity and granulometry were performed with an Auger, in different depths. Maps were generated through geostatistic analysis for each attribute, and then compared the correlations between the variables. The results showed that the sample fabric was efficient to demonstrate the variability and attributes presented spatial differential behaviour. The degree of compression of the varied depending on the depth. When it comes to the correlation analysis, only the attribute humidity presented negative correlation with resistance to penetration.

Key words: resistance to penetration; geostatistics; sampling.

3.1 Introdução

O não revolvimento do solo associado ao tráfego de máquinas provoca áreas com maior compactação, tanto verticalmente quanto horizontalmente. Vários pesquisadores sugerem que a resistência do solo a penetração de raízes (RP) é o principal indicativo do estado de compactação do solo (SILVA et al., 2000; ARSHAD et al., 1996), possuindo relação direta com o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e sendo mais eficiente na identificação de locais de compactação, quando comparada a outros atributos (SILVA et al., 2004).

Conforme os princípios fundamentais da experimentação agrícola, a variabilidade do solo ocorre de forma aleatória. Contudo, a variabilidade das propriedades químicas e físicas do solo apresenta correlação com outras variáveis ou dependência espacial de seus valores (REICHARDT, 1986).

No estudo da variabilidade espacial podem-se utilizar duas formas que diferem, basicamente, na maneira em que os dados são analisados. Os métodos

estatísticos que geralmente são utilizados nas amostras de populações exigem a validade de algumas hipóteses básicas, como independência entre as observações e a distribuição normal dos dados, enquanto a geoestatística permite a análise dos dados conforme a estrutura da sua variabilidade, supondo a existência de dependência espacial no local onde foi realizada a amostragem (CARVALHO, 1991).

Gonçalves et al. (1999), afirmam que a geoestatística além de avaliar e modelar a forma de dependência espacial pela interpolação geoestatística através da Krigagem, possibilita também verificar a existência ou não de correlação espacial entre as variáveis em análise.

O uso dessa técnica permite que possa ser realizada a detecção da existência de variabilidade e distribuição espacial dos atributos analisados e constitui uma importante ferramenta na análise e descrição detalhada da variabilidade das propriedades do solo (VIEIRA, 2000).

O uso do semivariograma é de extrema importância na geoestatística, descrevendo tanto qualitativa quanto quantitativamente a variação espacial de determinada área, além de ser o principal item na determinação do preditor geoestatístico que é a krigagem, mostrando a importância do ajuste e seleção dos modelos de semivariância (MELLO et al., 2005).

A krigagem utiliza a interpolação linear de forma não tendenciosa e com variância mínima, o que garante a melhor estimativa possível. Ela tem como base os dados amostrados em cada ponto e as características estruturais do semivariograma alcançadas através desses dados (OLIVEIRA et al., 2006).

Os valores de RP do solo ainda sofrem influência de outros fatores, dos quais se pode citar principalmente a umidade (LIMA et al., 2007), granulometria do solo e a fração argila (TAVARES FILHO e RIBON, 2008), porém sendo a umidade do solo a que melhor se correlaciona (BUSSCHER et al., 1997).

Um aspecto que não se conhece é a relação da umidade do solo no momento da amostragem com o valor real da medição. Busca-se por meio de equações, efetuar a correção ou normalização dos valores para que não se tenha alteração do resultado real (MORAES et al., 2012). Segundo Klein et al. (1998), em condições de solo muito úmido, regiões compactadas não são detectadas.

Da mesma forma, Beltrame et al. (1981) verificaram que para uma alteração da umidade do solo, ocorre variação no sentido oposto nos valores de RP, pois o teor de água atua alterando a coesão entre as partículas do solo.

Além da determinação das leituras de resistência à penetração, segundo Campbell e O'Sullivan (1991), é importante relacionar atributos complementares ao tipo de solo, como teor de água e densidade do solo, pois podem ser indicativos da confiabilidade dos resultados. De acordo com Forsythe (1975), a consistência do solo, dentre as propriedades que descrevem a resposta do solo à ação das forças externas que tendem a deformá-lo e podem ocasionar fluxo, fratura ou compressão do solo, pode variar conforme o teor de umidade do solo. Quando o teor de água aumenta, a RP tem seus valores diminuídos pela redução das forças de coesão que atuam entre as partículas de solo, o que ocasiona um aumento das forças de adesão e mudando a consistência de friável para plástica, e dessa forma, alcançando valores limitantes ao crescimento de raízes em condições de baixo teor de água no solo (Hillel, 1998).

Dessa forma, o estudo foi desenvolvido com a finalidade de verificar a variabilidade espacial dos valores de resistência a penetração, granulometria e umidade do solo, bem como a influência da granulometria e da umidade do solo nos valores de RP medidos em um Latossolo do norte do Estado do RS.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em março de 2014, em área agrícola no município de Boa Vista das Missões, no Norte do Estado do Rio Grande do Sul, situada nas coordenadas 27° 44' 12" S e 53° 21' 08". O relevo da região é suave ondulado e o solo caracterizado como Latossolo Vermelho distrófico típico (SANTOS et al., 2013). Na área é adotado o Sistema de Plantio Direto com rotação de culturas.

De acordo com a classificação de Peel et al. (2007), o clima da região é do tipo Cfa – temperado chuvoso, com precipitação média anual elevada, geralmente entre 1.800 e 2.100 mm, bem distribuída ao longo do ano e subtropical do ponto de vista térmico. A média de temperatura anual é em torno 18°C, com máximas no

3.2.3 Determinações

Em cada ponto amostral, foram realizados 5 repetições do teste de resistência mecânica do solo à penetração (RP) em volta do ponto central, conforme a Figura 2, as quais foram realizadas até a profundidade de 0,40 m, utilizando um Penetrômetro Eletrônico Automatizado modelo Falker Solo Track PLG 5300, com resolução de 10 mm velocidade constante de 10 mm segundo⁻¹, a partir de um cone de 30°.

Os testes seguiram as recomendações de Mata (1988) e Arshad et al. (1996), sendo realizadas com a umidade do solo próxima à capacidade de campo (CC), após a ocorrência de uma precipitação de cerca de 50 mm, dois dias antes do início dos trabalhos.

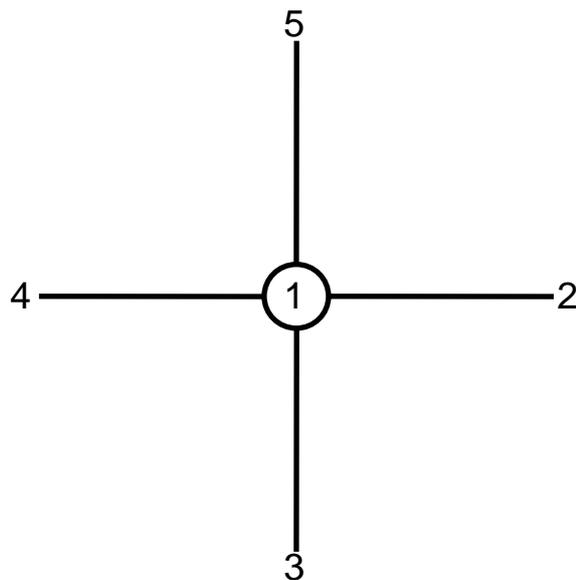


Figura 2 – Modelo de coleta para determinação de Resistência a penetração. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

Para a determinação do teor de argila, foram realizadas coletas de solo com um trado holandês, nas profundidades de 0,00-0,10, 0,11-0,20, 0,21-0,30 e 0,31-0,40 m. A distribuição granulométrica foi determinada pelo método da pipeta

(Embrapa, 1997), com dispersão de 20 g de terra fina seca ao ar com NaOH 1 mol L⁻¹.

Nas mesmas profundidades foram realizadas coletas de solo para determinação de umidade gravimétrica do solo (Ug). O solo foi coletado através de um trado holandês, acondicionado em latas de alumínio, vedadas e posteriormente encaminhadas para pesagens em laboratório. O teor de umidade foi determinado conforme a Equação 1:

$$Ug = \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \quad (1)$$

onde: Ug = Umidade gravimétrica (kg kg⁻¹); M_{su} = massa de solo úmido; M_{ss} = massa de solo seco

3.2.4 Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, com a intenção de verificar a dispersão dos dados, com o auxílio do pacote estatístico Statistical Analysis System – SAS 8.0 (SAS INSTITUTE, 1999). Os parâmetros estatísticos determinados foram: mínimo, média, mediana, máximo, desvio padrão, erro padrão e coeficientes de variação (CV%), assimetria (C_s) e de curtose (C_k).

Para a análise geoestatística, foram calculados os valores de coeficiente de curtose (C_k), que expressam a dispersão (achatamento da curva) da distribuição em relação a um padrão previamente definido, que geralmente é a curva normal, foram classificados em: $C_k = 0$ distribuição é mesocúrtica, $C_k < 0$ platicúrtica e se $C_k > 0$ leptocúrtica. Os valores referentes ao coeficiente de assimetria (C_s) que caracterizam quanto e de que forma a distribuição de frequências se afasta da simetria, foram classificados em: $C_s > 0$ distribuição assimétrica à direita; $C_s < 0$ distribuição é assimétrica à esquerda; e $C_s = 0$, a distribuição é simétrica. Também foi verificada normalidade dos dados por meio do Teste W ($p < 0,05$) (SHAPIRO e WILK, 1965). Foram considerados dados com distribuição de probabilidade normal

os dados que obtiveram resultado de p-valor >0,05, ou seja, valor não significativo ao nível de 95% de probabilidade.

A dependência espacial foi determinada com base nas pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca, avaliada pela análise de semivariogramas ajustados pelo software Gs+ (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2000). O semivariograma foi estimado através da seguinte Equação 2:

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

onde: N(h) é o número de pares experimentais de dados separados por uma distância h; Z(x_i) é o valor determinado em cada ponto amostrado; Z(x_i + h) é o valor medido num ponto mais uma distância h.

A ocorrência de anisotropia foi verificada calculando-se os semivariogramas para quatro direções, (0, 45, 90 e 135°). Dessa forma, foi verificada a inexistência de anisotropia no conjunto dos dados, assumindo-se, dessa forma, que a variabilidade espacial é unidirecional para todo o conjunto de dados.

Testaram-se os semivariogramas do tipo esférico, exponencial, linear e gaussiano. A escolha do modelo que melhor se adequou foi realizada observando-se o melhor coeficiente de correlação e a menor soma de quadrados do resíduo (SQR). O teste dos semivariogramas foi pelo método de retirar, de forma individual, cada ponto medido, e seu valor é estimado pelo modelo como se ele não existisse (SILVA et al., 2003).

Para analisar o grau de dependência espacial foi utilizada a metodologia proposta por Cambardella et al. (1994), modificada por Silva et al. (2004), subtraindo-se uma unidade do resultado da divisão entre Co e (Co + C1). Nesse caso, são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita > 0,75 do patamar; de dependência espacial moderada quando o efeito pepita está entre 0,75 e 0,25 do patamar e de fraca dependência quando o efeito pepita é < 0,25 em relação ao patamar.

A geração dos mapas foi realizada no *software* SGis, através do método de krigagem, utilizando a mesma legenda para todas as profundidades de cada variável.

Para a verificação de correlação entre os dados, foi realizada a análise de correlação linear simples de Pearson ($p < 0,05$) onde foram comparados os valores de RP, Teor de argila e umidade para cada um dos 400 pontos amostrados.

3.3 Resultados e Discussão

Na análise estatística descritiva (Tabela 1), observa-se que os valores das medidas de tendência central (média e mediana) são relativamente semelhantes para a maioria dos atributos estudados.

Baseado no critério proposto por Warrick e Nielsen (1980) para classificar o coeficiente de variação (CV%) nas classes: baixo – $CV < 12\%$, médio – $12\% < CV < 60\%$, alto – $CV \geq 60\%$. Verificou-se que são médios para RP em todas as profundidades; Areia e Silte de 0,00-0,10 m; Silte de 0,11-0,20 m; Umidade, Areia e Silte de 0,21-0,30 m e Areia e Silte de 0,31-0,40 m de profundidade. As demais variáveis foram classificadas como de CV (%) baixo.

Nota-se uma redução no CV (%) da variável RP conforme aumenta a profundidade de análise, obtendo valores na ordem de 25,43%, o que provavelmente está relacionado a interferência do mecanismo sulcador das semeadoras ser maior nas camadas mais superficiais, o que de certa forma desestrutura o solo em superfície, tornando os solos mais heterogêneos nas camadas superficiais. Além disso, Silva et al. (2004) explicam que, na superfície, o solo sofre os maiores efeitos do tráfego de máquinas, da atividade biológica e dos ciclos de umedecimento e secagem, o que também provoca grande variabilidade e dispersão dos valores de RP.

Tabela 1 – Análise descritiva dos teores de umidade do solo (U_g ; kg kg^{-1}), teor de argila, areia e silte (%) e resistência à penetração (MPa) em cada profundidade da área de estudo.

Camada	Média	Mediana	Desvio Padrão	Máx ⁽¹⁾	Mín ⁽²⁾	CV (%) ⁽³⁾	Cs ⁽⁴⁾	Ck ⁽⁵⁾	(W) ⁽⁶⁾
----- Umidade gravimétrica -----									
0,0-0,10	0,235	0,236	0,022	0,29	0,13	9,60	-0,428	1,001	0,98 _{ns}
0,11-0,20	0,242	0,243	0,021	0,35	0,14	8,78	-0,102	2,151	0,98 _{ns}
0,21-0,30	0,263	0,263	0,052	0,38	0,17	20,10	15,080	279,55	0,31 _{ns}
0,31-0,40	0,270	0,273	0,026	0,34	0,01	9,624	-2,784	22,417	0,84 _{ns}
----- Argila -----									
0,0-0,10	54,126	54,610	5,892	73,06	22,85	10,88	-1,14	4,647	0,93 _{ns}
0,11-0,20	56,489	57,020	4,997	77,54	38,95	8,84	-0,065	0,692	0,99 _{ns}
0,21-0,30	58,408	59,180	5,812	78,53	32,44	9,95	-1,152	3,530	0,93 _{ns}
0,31-0,40	60,171	60,723	5,256	72,63	34,73	8,73	-0,853	2,357	0,96 _{ns}
----- Areia -----									
0,0-0,10	16,889	16,634	2,330	24,38	0,70	13,80	-0,505	5,299	0,95 _{ns}
0,11-0,20	15,834	15,530	2,399	23,49	7,34	5,15	0,383	0,356	0,98 _{ns}
0,21-0,30	14,299	14,135	2,515	23,49	6,85	17,59	0,559	0,670	0,97 _{ns}
0,31-0,40	13,465	13,311	2,451	23,49	5,06	18,20	0,495	1,116	0,98 _{ns}
----- Silte -----									
0,0-0,10	28,984	28,415	5,695	60,97	12,86	19,65	1,433	6,169	0,91 _{ns}
0,11-0,20	27,675	27,680	5,052	44,63	3,60	18,25	-0,036	1,525	0,98 _{ns}
0,21-0,30	27,292	26,455	5,955	53,92	6,55	21,81	1,176	3,524	0,92 _{ns}
0,31-0,40	26,360	26,041	5,588	54,96	8,95	21,19	0,962	3,331	0,95 _{ns}
----- Resistência a penetração -----									
0,0-0,10	1,445	1,433	0,367	2,67	0,52	25,43	0,267	0,002	0,99 _{ns}
0,11-0,20	2,312	2,332	0,490	3,80	0,79	21,19	-0,282	1,169	0,96 _{ns}
0,21-0,30	2,034	2,009	0,279	3,12	1,12	13,74	0,236	0,901	0,98 _{ns}
0,31-0,40	1,893	1,875	0,245	2,68	1,37	12,95	0,458	0,083	0,98 _{ns}

⁽¹⁾Máximo; ⁽²⁾Mínimo; ⁽³⁾Coeficiente de variação; ⁽⁴⁾Coeficiente de Assimetria; ⁽⁵⁾Coeficiente de Curtose

⁽⁶⁾Teste W: Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: (*) significativo em níveis de $p < 0,05$ e (ns) não significativo. Quando for significativo indica, que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

Os atributos de granulometria do solo apresentaram os valores de coeficiente de variação com grande amplitude, variando de 5,15 e 21,81 nas variáveis areia 0,11-0,20 m e silte 0,21-0,30 m. Notam-se valores mais elevados principalmente na camada superficial, justamente pela maior mobilização existente nessa camada.

Todas as variáveis apresentaram distribuição normal, sendo confirmados pelos coeficientes de assimetria, deslocados à esquerda ($C_s < 0$) e a direita ($C_s > 0$) e coeficientes de curtose com distribuições platicúrticas ($C_k < 0$) e leptocúrticas ($C_k > 0$). É importante salientar que a normalidade dos dados deve ser considerada, visto que a krigagem é um estimador linear que necessita tal característica (WEBSTER e OLIVER, 1992).

Destaca-se que os valores de C_k obtiveram distribuição leptocúrtica ($C_k > 0$), com coeficiente elevado nas variáveis umidade 0,21-0,30 e 0,31-0,40 m, o que indica que estas apresentam uma grande concentração de seus valores em torno do centro da média, elevando o valor de C_k . As demais variáveis apresentaram valores de C_s e C_k mais próximos de 0, tendo estas uma curva de distribuição dos dados com maior normalidade.

Verificou-se uma grande amplitude nos valores de argila em ambas as profundidades. Essa amplitude demonstra como a adoção da média de observações no campo pode ocasionar erros no manejo realizado. Dados semelhantes foram encontrados por Ferraz et al. (2012), demonstrando a importância do estudo geoestatístico. Também é importante destacar que essa maior amplitude pode estar vinculada às dimensões da área em estudo, podendo nela ocorrerem diversos fatores os quais possibilitem alterações em seus valores, principalmente por erosão, onde ocorreria deposição de sedimentos nas partes mais baixas do relevo.

Na Tabela 2, estão apresentados os resultados dos parâmetros geoestatísticos obtidos. Através do ajuste dos semivariogramas, pôde-se verificar que todas as variáveis analisadas, com exceção do teor areia 0,00-0,10 m, apresentaram dependência espacial. Neste caso, os dados apresentaram um comportamento crescente com a distância, e assim, não havendo dependência espacial destas variáveis.

O modelo linear caracteriza-se também por não apresentar valor de alcance. Estes dados são semelhantes aos obtidos por Vieira (1997), reforçando a ideia de que apenas as camadas superficiais do solo podem possuir menor dependência

espacial. A ocorrência de modelo linear sugere que, para esta profundidade, a malha amostral não foi capaz de detectar a dependência.

As variáveis, argila 0,11-0,20 m e RP 0,00-0,10 m apresentaram semivariogramas de modelo Gaussiano. Todas as demais variáveis foram ajustadas por semivariogramas de modelo Exponencial. Estes ajustes concordam com os encontrados por Souza et al. (2001), analisando a variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo, no qual o modelo que mais se ajustou foi o exponencial, com variáveis apresentando dependência moderada.

Tabela 2 – Parâmetros geoestatísticos dos valores umidade do solo (kg kg⁻¹), teores de argila, areia e silte (%) e resistência à penetração (MPa) em diferentes profundidades. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

Variável	(Co) ⁽¹⁾	Co+C1 ₍₂₎	A ⁽³⁾	(1-(Co/Co+C1)) ⁽⁴⁾	r ² ⁽⁵⁾	Modelo
----- Umidade gravimétrica -----						
0,0-0,10	0,00044	0,00088	7,18	0,50	0,279	Exponencial
0,11-0,20	0,00037	0,00074	13,44	0,50	0,482	Exponencial
0,21-0,30	0,00264	0,05529	16,32	0,95	0,593	Exponencial
0,31-0,40	0,00064	0,00127	14,53	0,50	0,434	Exponencial
----- Argila -----						
0,0-0,10	24,9	70,78	13,26	0,64	0,97	Exponencial
0,11-0,20	23,81	47,23	16,32	0,49	0,49	Gaussiano
0,21-0,30	28,43	56,87	18,09	0,50	0,472	Exponencial
0,31-0,40	28,80	51,61	16,32	0,44	0,65	Exponencial
----- Areia -----						
0,0-0,10	5,26	10,52	-	0,50	0,002	Linear
0,11-0,20	4,77	9,54	16,11	0,50	0,50	Exponencial
0,21-0,30	4,94	9,88	10,59	0,50	0,48	Exponencial
0,31-0,40	4,68	9,36	10,74	0,50	0,78	Exponencial
----- Silte -----						
0,0-0,10	24,0	69,0	14,97	0,65	0,98	Exponencial
0,11-0,20	23,18	46,37	14,31	0,50	0,405	Exponencial
0,21-0,30	27,11	54,23	10,90	0,50	0,85	Exponencial
0,31-0,40	29,01	58,03	16,32	0,50	0,69	Exponencial

----- Resistência a penetração -----

0,0-0,10	0,130	0,262	18,65	0,50	0,26	Gaussiano
0,11-0,20	0,194	0,390	18,09	0,50	0,72	Exponencial
0,21-0,30	0,071	0,143	14,32	0,50	0,51	Exponencial
0,31-0,40	0,048	0,097	13,20	0,50	0,75	Exponencial

(¹)Efeito pepita (²)Patamar (³)Alcance (⁴)Relação Efeito pepita/patamar (⁵)Coeficiente de determinação

A maioria das variáveis apresentaram valores de r^2 elevados, mostrando que os modelos de semivariância estudados tiveram capacidade de determinar a variabilidade espacial da área. Destaca-se a variável RP 0,00-0,10 m, que apresentou valor de r^2 de 0,26, considerado baixo para uma boa estimativa da variabilidade. Este fato pode ser explicado por esta variável ser bastante afetada pela mobilização e alteração estrutural do solo recorrente das operações mecanizadas na área.

Fato semelhante foi relatado por Mello et al. (2006), que estudando propriedades físicas do solo em área intensamente cultivada, detectaram que a camada de 0,00 a 0,20 m é a mais afetada pelo processo de mecanização e erosão, o que possivelmente, influencia na distribuição das propriedades do solo em diferentes posições do terreno, em razão do arrastamento de partículas do solo, que podem ocasionar comportamento espacial irregular.

Com relação ao grau de dependência espacial, apenas a variável umidade 0,21-0,30 apresentou grau de dependência classificado como forte, ou seja, valor de efeito pepita $> 0,75$ do patamar, de acordo com os critérios estabelecidos por Cambardella et al. (1994), modificado por Silva et al. (2004). Todas as outras variáveis foram classificadas como grau de dependência moderada, devido ao valor de efeito pepita estar entre 0,75 e 0,25 do patamar. Resultados semelhantes foram obtidos por Pocay (2000), em que a maioria das variáveis estudadas apresentou grau moderado de dependência espacial, possivelmente tendo interferência dos processos mecanizados que alteram a estrutura do solo.

Com exceção da variável umidade 0,00-0,10 m, todas as demais variáveis apresentaram alcance superior à distância a qual foram realizadas as coletas. De

modo geral, pode-se afirmar que a distância utilizada entre um ponto amostral e outro foi suficiente para a determinação dos atributos.

Sobre a variável umidade 0,00-0,10 m, é possível que esta possa ter sofrido interferência de fatores como presença ou ausência de palha, que não possibilitaram a correta espacialização dos dados na distância a qual foi realizada a coleta.

Para a avaliação da qualidade física de um solo, a resistência mecânica do solo à penetração é considerada a propriedade mais apropriada para expressar o grau de compactação (SILVEIRA et al., 2010; SANTANA et al., 2006) e, devido a isso, a facilidade de penetração das raízes no solo.

Com o baixo valor médio de RP na camada de 0,00-0,10 m, fica evidente a eficiência do sistema radicular das plantas, da atividade biológica e dos órgãos ativos das sementeiras na diminuição da RP, devido a bem sucedida rotação de culturas implementada na área.

Para a criação dos mapas foi feito uso da técnica de interpolação geoestatística da Krigagem. De acordo com Wackernagel (1995), a Krigagem é um método para estimar, num contexto espacial, o valor de uma variável de interesse em um local onde não foi determinado, usando, para isso, dados obtidos em pontos adjacentes.

Na Figura 3, são apresentados os mapas de RP, em diferentes profundidades. Com relação à variável resistência mecânica do solo à penetração (RP), a maioria dos pontos analisados nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,31-0,40 m, representando 97% e 72% da área, possui valores médios dentro do limite de 2 MPa, o que é considerado adequado ao crescimento radicular (NESMITH, 1987; TORMENA et al., 1998; SILVA et al., 2004).

Observa-se também um aumento relevante nos valores médios de RP nas profundidades de 0,11-0,20 e 0,21-0,30 m, com um grau de compactação mais acentuada na primeira, com média de valores na ordem de 2,3 MPa, e valores máximos de até 3,8 MPa. Segundo Vepraskas (1994) e Tormena et al. (1998), valores de RP acima de 2 MPa são considerados limitantes ao desenvolvimento radicular da maioria das culturas.

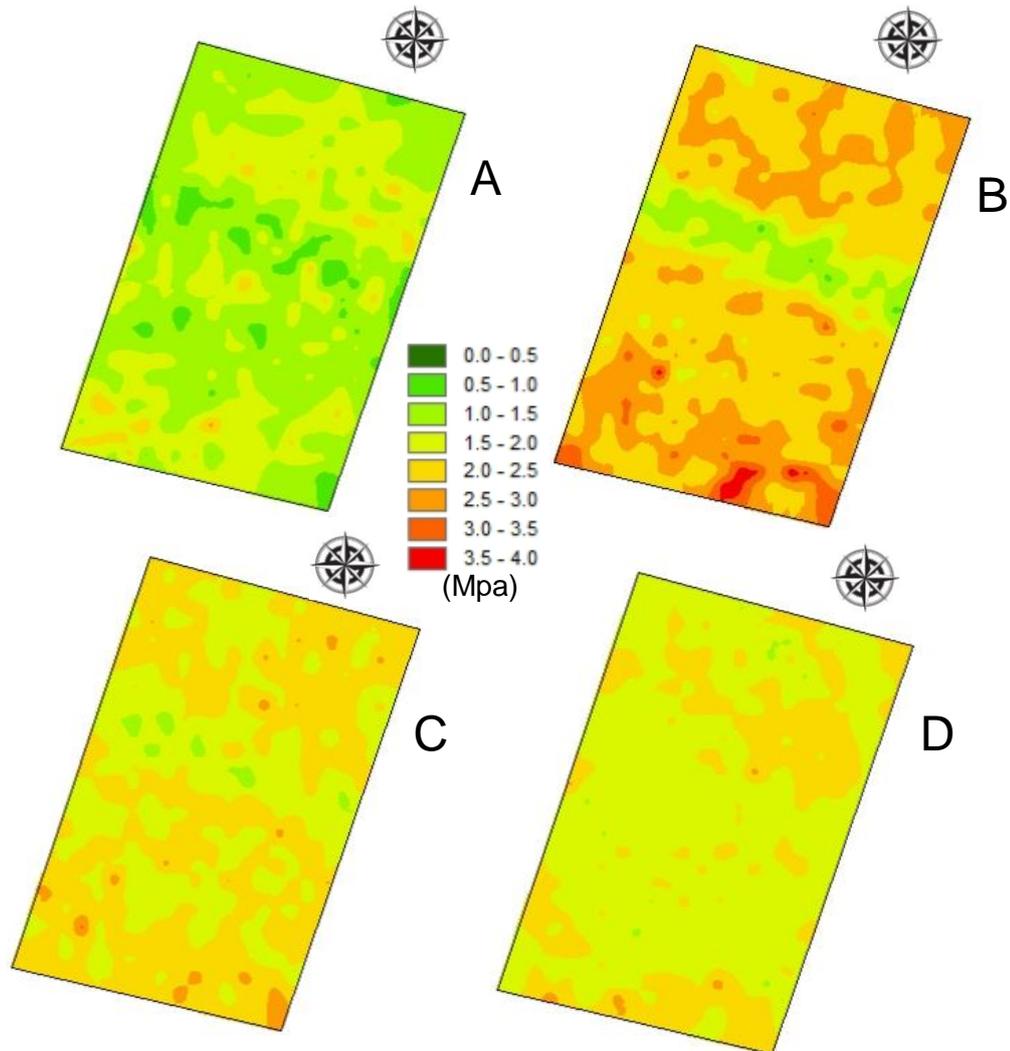


Figura 3 – Espacialização dos valores de resistência mecânica do solo a penetração (MPa) em quatro profundidades, em que: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo Vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

A maior média de RP nas profundidades 0,11-0,20 e 0,21-0,30 m pode ser justificada pelo sistema de cultivo adotado na área a alguns anos atrás, antes da adoção do sistema de plantio direto. Trata-se do sistema de cultivo convencional, que por necessitar de maior manejo, menos conservacionista, de máquinas e equipamentos agrícolas, ocasionava à formação de camada subsuperficial compactada, uma das principais causas da degradação da estrutura do solo.

O uso contínuo de arado e grade para o preparo acarretava à formação de camadas compactadas, chamadas “pé-de-arado” ou “pé-de-grade” (SILVA, 1992).

Além do histórico de compactação remanescente do sistema convencional, o tráfego de máquinas colabora para a manutenção ou aumento de tais camadas compactadas.

Nas camadas abaixo de 0,30 m, ocorre uma redução dos valores de resistência do solo à penetração, possivelmente por essas camadas mais profundas não sofrerem os efeitos de compactação impostos por máquinas e implementos utilizados. Segundo Daniel e Maretti (1990), as camadas superficiais do solo são as que mais sofrem os efeitos do tráfego de máquinas.

A espacialização dos valores de umidade (kg kg^{-1}), em ambas as profundidades (Figura 4), demonstra pequena variação de seus valores devido às análises terem sido realizadas com o solo em condição friável.

É possível verificar pontos em meio às áreas com valores mais elevados de umidade, principalmente nas profundidades de 0,21-0,30 e 0,31-0,40 m. Contudo, existe uma variação muito pequena nos valores, de modo que 73% da área apresenta médias situadas entre 0,20 e 0,25 kg kg^{-1} . É importante também frisar que nesta profundidade não foram encontrados valores acima de 0,30 kg kg^{-1} .

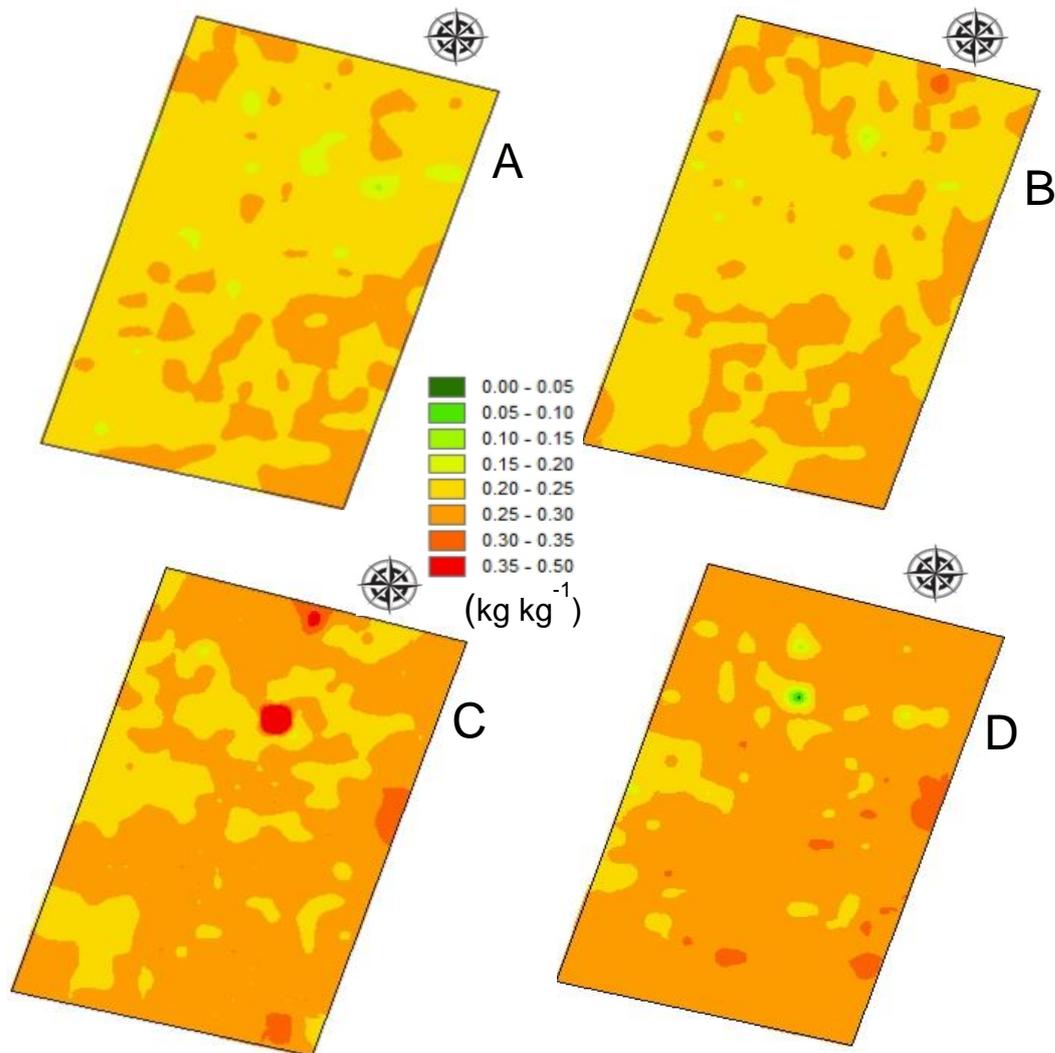


Figura 4 – Espacialização dos valores de umidade do solo (kg kg^{-1}) em quatro profundidades, em que: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo Vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

Na profundidade de 0,11-0,20 m praticamente toda a área apresenta umidade entre 0,20 e 0,30 kg kg^{-1} . Nas camadas mais profundas, nota-se uma elevação dos valores, porém com a mesma similaridade na variação da umidade, de modo que na camada de 0,31-0,40 m, 86% da área possui umidade situada entre 0,25 e 0,30 kg kg^{-1} .

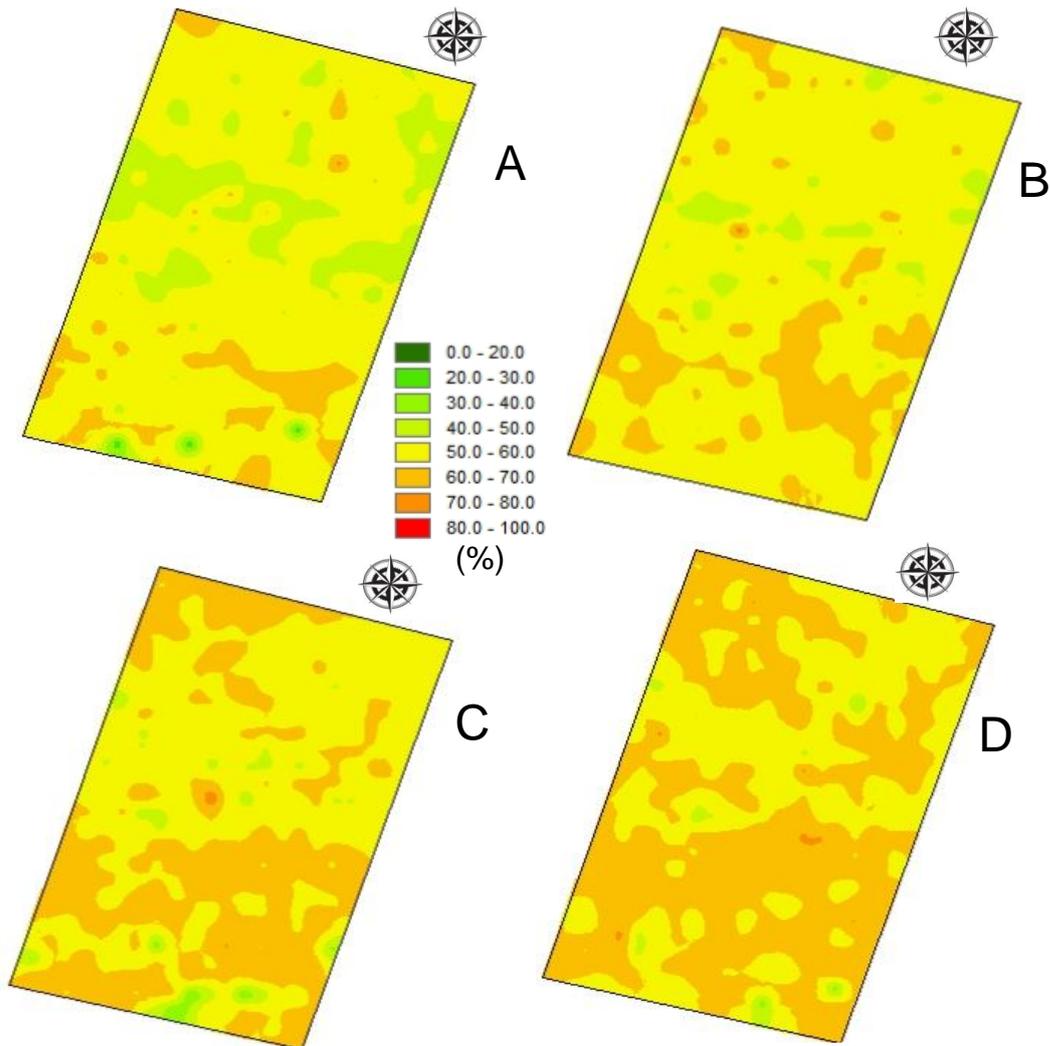


Figura 5 – Espacialização dos valores de argila (%) em quatro profundidades, em que: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo Vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

Analisando os teores de Argila (Figura 5), nas camadas de 0,00-0,10 e 0,11-0,20 m, nota-se a mesma similaridade encontrada nos valores de Umidade do solo. Nas camadas de 0,00-0,10 e 0,11-0,20 m, 74% e 76% da área, respectivamente, possui valores entre 50 e 60% de argila. No entanto, na segunda profundidade, nota-se um aumento na porção da área situada entre 60 e 70%, fato este normal com o aumento da profundidade do solo (TOGNON et al., 1998).

Nas profundidades de 0,21-0,30 e 0,31-0,40 m nota-se um aumento gradual dos valores de argila, onde 40% e 57% da área, respectivamente, possui teores de argila situados entre 60 e 70%. A variação irregular verificada proporciona maiores

diferenças nos valores encontrados. Observando os mapas, seria possível associar a variação dos teores encontrados com a declividade presente no terreno, de modo que as formas do terreno influenciam os fluxos de água.

A Figura 6 demonstra a espacialização dos teores de Areia nas quatro profundidades analisadas. Verifica-se maior presença de Areia nas camadas superficiais, a qual é mais evidente na camada de 0,00-0,10 m. Nesta profundidade, 82% da área possui valores situados entre 15 e 20% de areia. Na camada de 0,11-0,20 m, essa proporção cai para 59% da área. Nas camadas de 0,21-0,30 e 0,31-0,40 m, a maior parte da área predominam valores médios de areia que variam entre 10 e 15%.

Em ambas as profundidades nota-se que os valores máximos dessa variável não ultrapassam 24%, reflexo do elevado teor de argila a qual este solo possui.

Através da representação gráfica da variável areia 0,00-0,10 m, é possível verificar o possível motivo da falta de dependência espacial, a qual foi linear, e do baixo r^2 encontrado (0,002). A discrepância encontrada entre pontos amostrados em pequenas distâncias diminui a chamada continuidade espacial. Isso acarreta em dificuldades para a criação de modelos que definam a forma de como se dá a variabilidade da área.

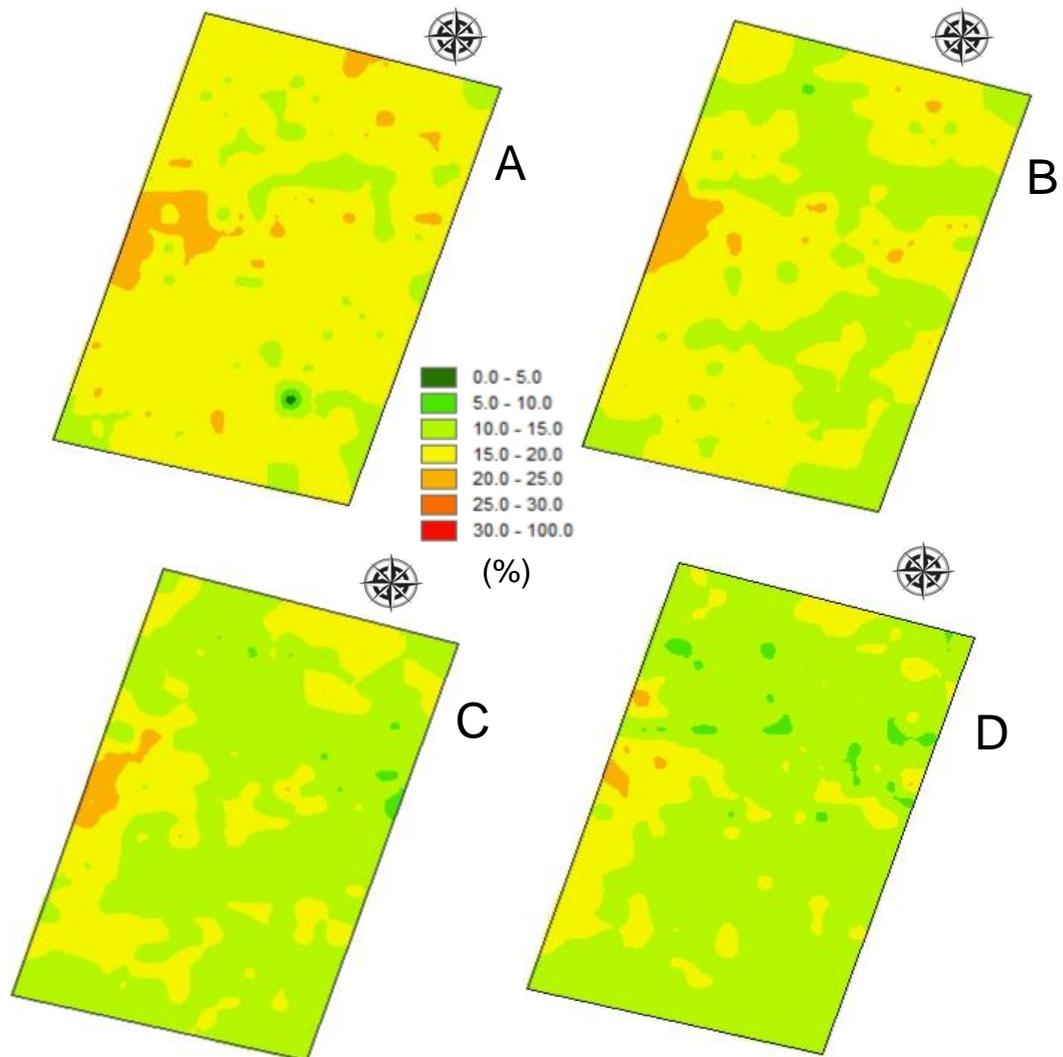


Figura 6 – Espacialização dos valores de Areia (%) em quatro profundidades, em que: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

A partir da análise é possível verificar que os teores de silte, mesmo possuindo valores mais elevados de CV (%), apresentam pequena variação horizontal na área (Figura 7). Mesmo possuindo uma grande amplitude em seus valores, a chamada continuidade espacial ocorreu de forma bem definida, permitindo ao modelo geoestatístico realizar uma boa representação gráfica, diferente do que ocorreu na variável areia 0,00-0,10, anteriormente discutida.

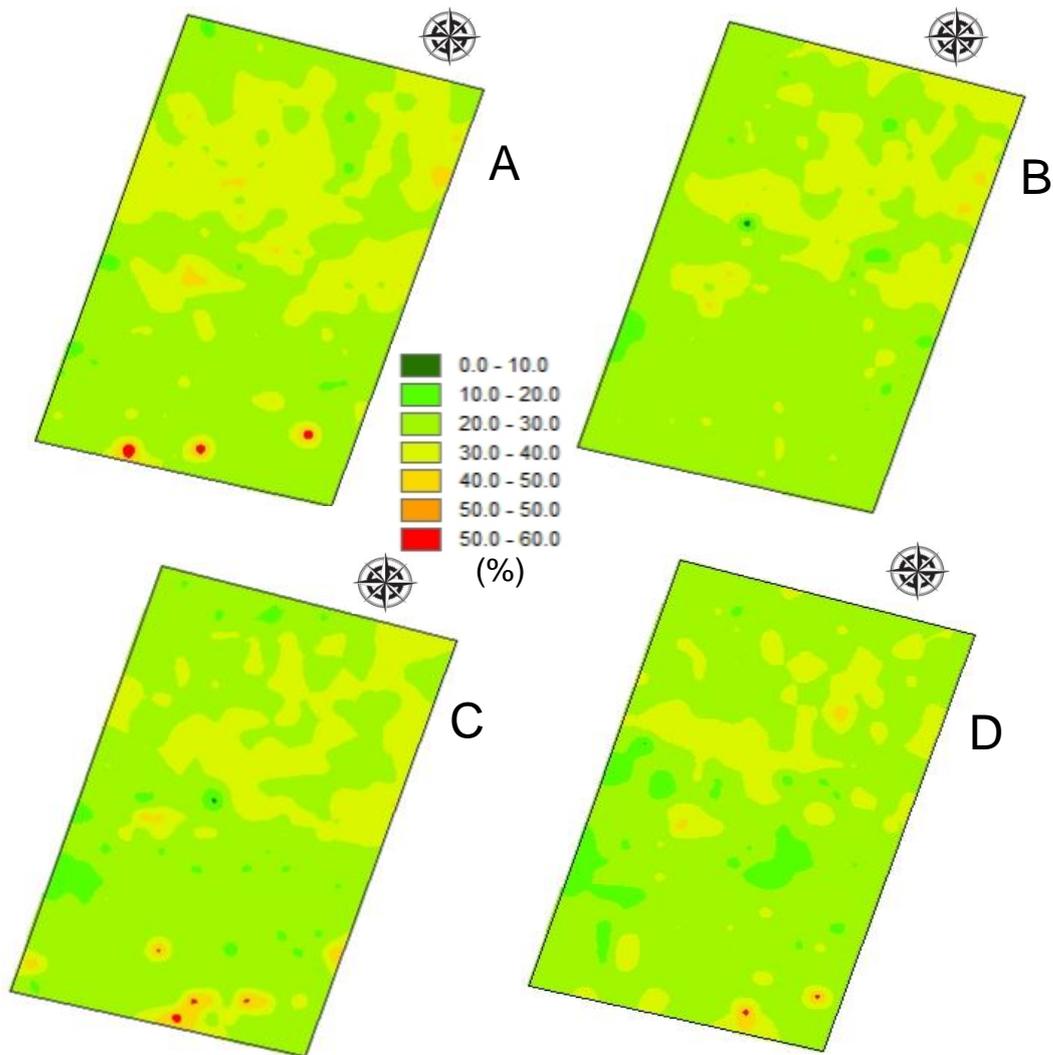


Figura 7 – Espacialização dos valores de Silte (%) em quatro profundidades, em que: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo Vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

Em ambas as profundidades, verifica-se que a área possui grande proporção de fração de silte situada entre 20 e 30%. Algumas zonas, também bem definidas também em profundidade, apresentam teores entre 30 e 40%. Aliado a isto, os elevados valores de r^2 (Tabela 2) encontrados nessa variável permitem afirmar que sua variabilidade espacial é bem definida, proporcionando bons resultados para esta variável.

Através da análise de Correlação de Pearson, foram realizadas análises de dependência entre a variável RP com as variáveis: Teor de argila e Umidade do solo, nas diferentes profundidades. Apesar de muitos autores citarem a existência de

correlação da resistência a penetração com o Teor de argila do solo (ASSIS et al. 2009; SENE et al. 1985), não foi verificada correlação entre estes atributos em nenhuma das profundidades. Possivelmente esse fator não expressou correlação com a variável RP por causa da umidade em que o solo se encontrava, pois com o solo mais úmido, camadas com maior teor de argila, mesmo que mais compactadas, podem não ser detectadas.

Na Figura 7, estão apresentados os gráficos gerados a partir da Correlação de Peason entre RP (MPa) e Umidade do solo para ambas as profundidades.

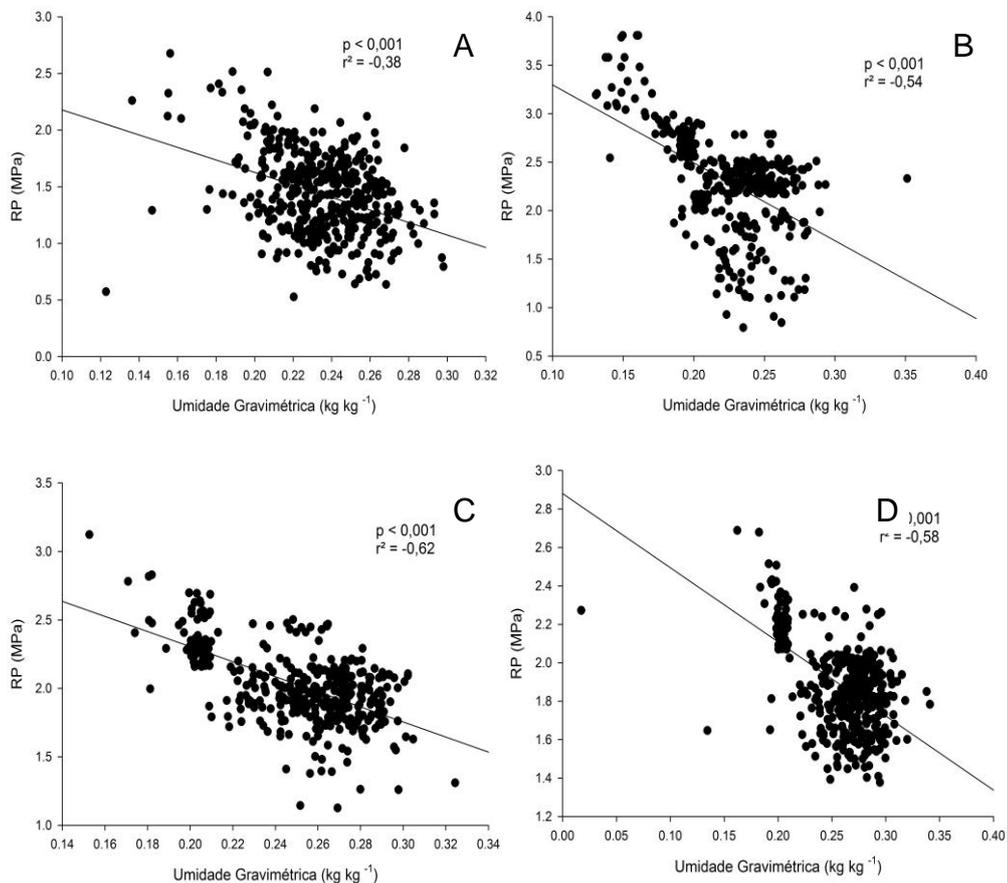


Figura 8 – Correlação de Pearson entre RP (MPa) e Umidade Gravimétrica, em quatro profundidades, em que: ((A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m, em área de Latossolo Vermelho. Boa Vista das Missões/RS, 2014.

Verifica-se que os valores de RP apresentam correlação negativa de -0,38; -0,64; -0,62 e -0,58 com os valores de umidade, nas profundidades 0,00-0,10; 0,11-0,20; 0,21-0,30 e 0,31-0,40 m, respectivamente. Ou seja, com valores mais elevados de Umidade, os valores de RP foram menores. Corroborando com esses dados, Busscher et al. (1997) e Carvalho Filho et al. (2004) afirmaram que mesmo em umidades semelhantes, a resistência mecânica do solo está correlacionada e varia inversamente com o conteúdo de água no solo.

Ocorre que, em condições de baixa umidade, a água encontra-se em maior estado de tensão nos poros do solo. Segundo Cunha et al. (2002), além da tensão, somam-se as forças de coesão e de adesão já existentes entre os sólidos do solo, resultando em maior resistência à deformação ou à penetração de raízes em condição de baixa umidade. Com a elevação do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, resultando na diminuição da RP (CUNHA et al., 2002).

Guerra et al. (2000), em estudo com penetrômetro eletrônico, constataram que a presença da água inibiu a diferenciação da compactação pelo efeito lubrificante que provoca no solo, deixando-o muito plástico e facilitando a penetração das hastes de RP com o solo com baixo teor de água, confirmando assim a forte influência do teor de água nos valores de RP.

3.4 Conclusões

Os valores de resistência a penetração demonstram a ocorrência de zonas compactadas dentro da área estudada, consideradas impeditivas ao crescimento radicular.

O atributo argila apresentou baixo coeficiente de correlação, não possibilitando uma boa estimativa de seus valores. O mesmo atributo não apresentou correlação com a variável resistência à penetração.

A umidade do solo apresentou correlação negativa com o atributo resistência à penetração em todas as profundidades, de modo que os valores de resistência à penetração decrescem com o aumento da umidade.

3.5 Referências Bibliográficas

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W. & JONES, A. J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, **Soil Science Society of America**. 1996. p. 123-141 (SSSA Special publication 49).

BELTRAME, L. F. S.; GONDIM, L. A. P.; TAYLOR, J. C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 5, p. 145-149, 1981.

BURROUGH, P. A.; VAREKAMP, C.; SKIDMORE, A. K. Using public domain geostatistical and GIS software for spatial interpolation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Maryland, v. 62, n. 7, p. 845-854, 1996.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 58, n. 4, p. 1501-1511, 1994.

CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R. P.; FERNANDES, A. L. T. **Compactação do solo em cafeicultura irrigada**. Uberaba: UNIUBE, 2004. 44 p. (Boletim Técnico, 3).

CARVALHO, T. M. **Variabilidade espacial de propriedades físico hídricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo através da Geoestatística**. 1991, 84 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1991.

DANIEL, L. A.; MARETTI, H. J. **Avaliação de camada de solo compactado e análise de crescimento de plantas**. In: Ciclo de Estudos sobre Mecanização Agrícola, 4., 1990, Campinas. Anais... Campinas: Fundação Cargill, 1990. p. 22-33.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FERRAZ, G. A. S.; SILVA, F. M.; CARVALHO, L. C. C.; ALVES, M. C.; FRANCO, B. C. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, jan./fev. 2012.

FORSYTHE, W. **Física de suelos: manual de laboratorio**. San José: IICA, 1975. 212 p.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. **Geostatistics for the environmental sciences** (version 5.1 for windows).Michigan: 2000. 1 CD.

GIOTTO, E.; ROBAINA, A. D. **Agricultura de precisão com o CR Campeiro 7**. Manual do usuário. Santa Maria: UFSM/Centro de Ciências Rurais/Departamento de Engenharia Rural/Laboratório de Geomática, 2007, 319p.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; VIEIRA, S. R. Padrões de amostragem e intensidade de krigagem na caracterização do armazenamento de água no solo, em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 23, p. 1485 - 1495, 1999.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 169-177, 2005.

GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P.; MAZETTO, F. R. **Utilização do GPS e do penetrômetro hidráulico-eletrônico para localização de pontos e avaliação da compactação do solo**. Reunião científica em ciências agrárias do Lageado, 7., 2000, Botucatu. Resumos... Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 85 p. 2000.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, n. 2, p. 45-54, 1998.

LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Revista Ciência Rural**, v. 37, p. 1166-1169, 2007.

MATA, J. D. V. **Relações entre as características físicas e os níveis de compactação de alguns Latossolos Paranaenses**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1988.

MELLO, G.; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 294–305, 2006.

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; OLIVEIRA, M. S. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*, **Scientia Forestalis**. v. 69, p. 25-37, 2005.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 06, p. 1704-1713, nov./dez. 2012.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Secção de Geografia, 1961. 46 p.

NESMITH, D. S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultissol. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 51, p. 183-186, 1987.

OLIVEIRA, M. C. N.; BARBIN, D.; SILVA, E. F.; MACEDO, J. R.; CAPECHE, C. L.; HISSA, H. R. Estimaco dos parâmetros de uma funo de covariânca no estudo da variabilidade espacial do teor de cálcio no solo. **Revista de Matemática e Estatística**. v. 24, p. 117-132, 2006.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Australia. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644. ISSN 1027-5606, 2007.

POCAY, V. G. **Relações entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de Latossolosob cultivado de cana-de-açúcar**. 2000, 177 f. Dissertação (Mestrado) FCAV/UNESP, Jaboticabal, 2000.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S. R.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 10:1-6, 1986.

SANTANA, M. B.; SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; FONTES, L. E. F. Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:1-12, 2006.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SAS INSTITUTE – Statistical Analysis System. **SAS/STAT User's Guide 8.0**. North Caroline, NC: SAS Institute Inc., 1999. 3365p.

SENE, M.; VEPRASKAS, M. J.; NADERMAN, G. C.; DENTON, H. P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 422-427, 1985.

SILVA, E. A. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; ROCHA, J. V.; SOUZA, E. G. Um Estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos do solo e planta. **Acta Scientiarum**, Maringa, v. 25, n. 2, p. 365-371, 2003.

SILVA, J. G. **Ordens de gradagem e sistemas de aração do solo: desempenho operacional, alterações na camada mobilizada e respostas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Botucatu, Universidade Estadual de São Paulo, 1992. 180p. (Tese de Doutorado).

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Revista Ciência Rural**, v. 30, p. 795-801, 2000.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 399-406, mar./abr., 2004.

SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no Recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:659-667, 2010.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. Ananalysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Sevéria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 699-707, 2001.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 487-494, 2008.

TOGNON, A. A.; DEMATTÊ, J. L. I.; DEMATTÊ, J. A. M. Teor e distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do brasil central. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, 1998.

VEPRASKAS, M.J . **Plant response mechanisms to soil compaction**. In: WILKINSON, R. (Ed.). *Plant environment interactions*. New York : M. Dekker, 1994. p. 263-287

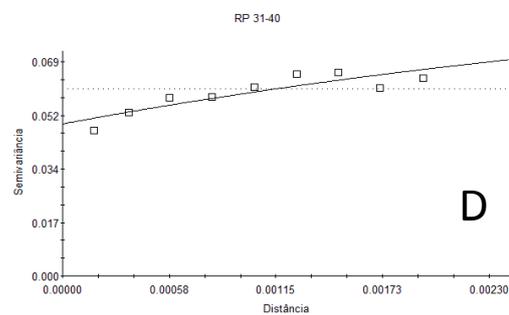
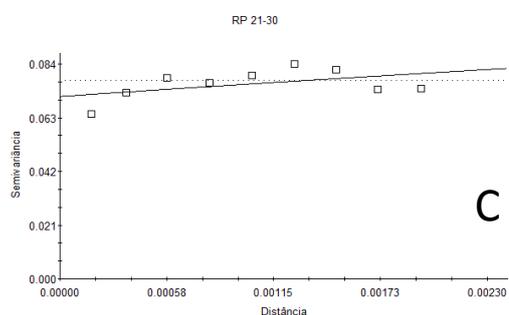
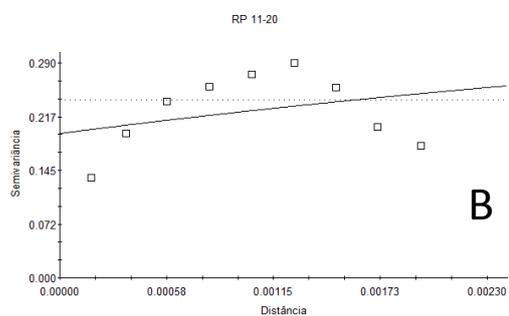
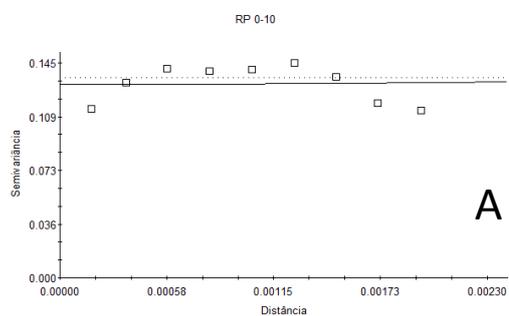
VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas, SP. **Bragantia**, 56:181-190, 1997.

WACKERNAGEL, H. **Multivariate geostatistics: an introduction with applications**. Springer, Berlin. 1995. 256 p.

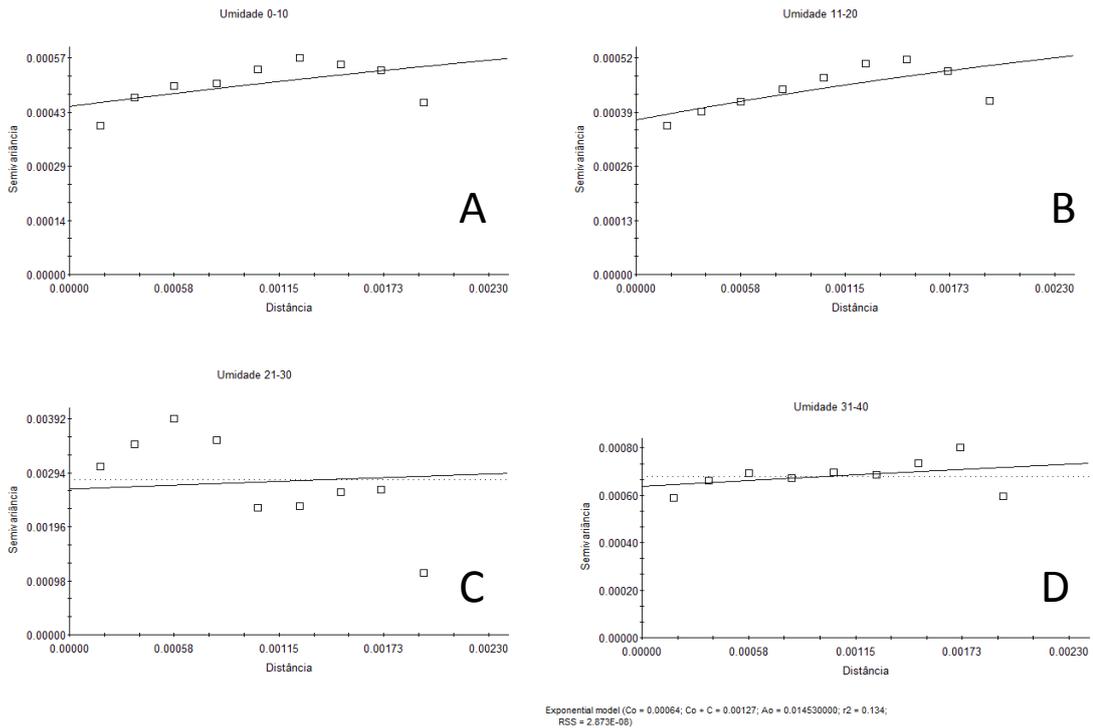
WARRICK, A. W. e NIELSEN, D. R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, 1980. p. 319-344.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. **Journal of Soil Science**, v. 43, p. 177-192, 1992.

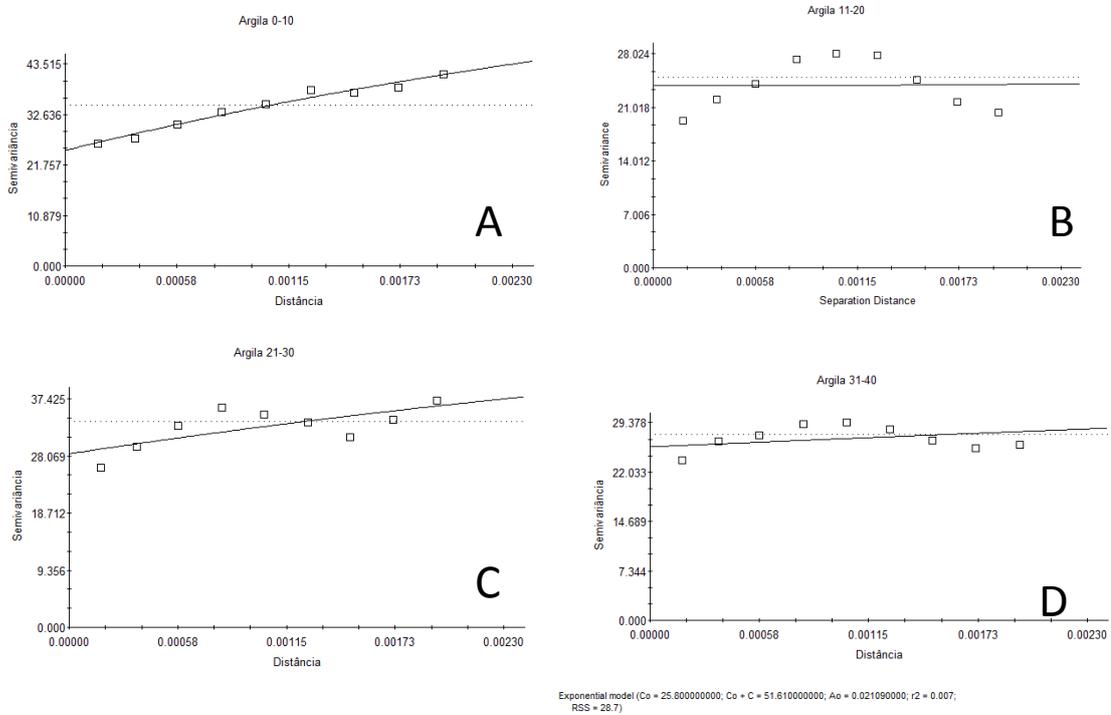
Apêndices



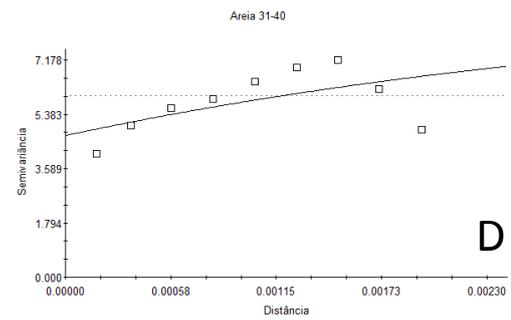
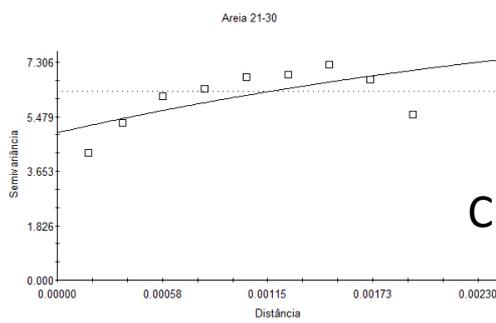
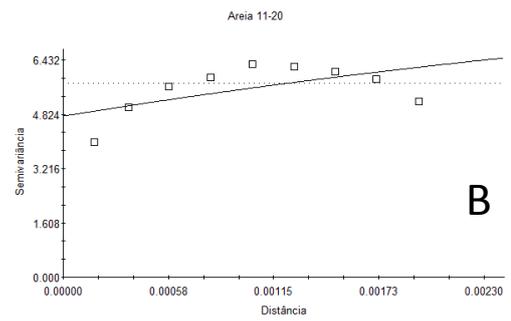
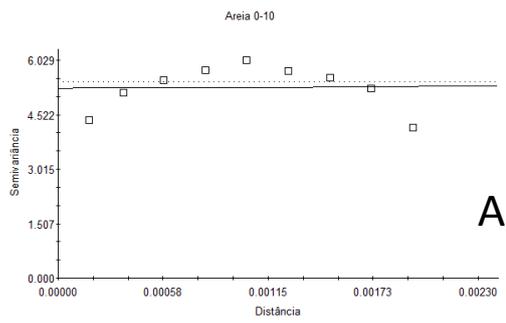
Apêndice A – Semivariogramas da variável Resistência a penetração para as profundidades: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m. Boa vista das Missões/RS, 2014.



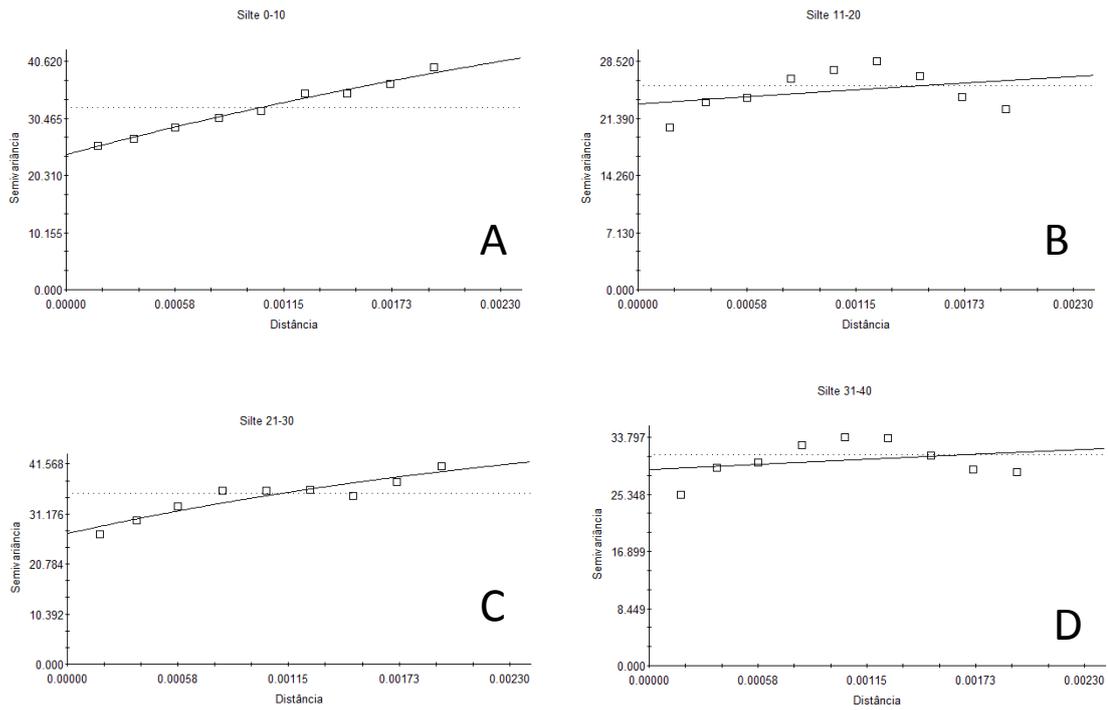
Apêndice B – Semivariogramas da variável Umidade Gravimétrica para as profundidades: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m. Boa vista das Missões/RS, 2014.



Apêndice C - Semivariogramas da variável Argila para as profundidades: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m. Boa vista das Missões/RS, 2014.



Apêndice D – Semivariogramas da variável Areia para as profundidades: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m. Boa vista das Missões/RS, 2014.



Exponential model (Co = 27.110000000; Co + C = 54.230000000; Ao = 0.003020000; r2 = 0.851; RSS = 21.3)

Apêndice E – Semivariogramas da variável Silte para as profundidades: (A) 0,00-0,10 m, (B) 0,11-0,20 m, (C) 0,21-0,30 m e (D) 0,31-0,40 m. Boa vista das Missões/RS, 2014.

CONCLUSÃO GERAL

Fazendo-se uso de 5 subamostras, não se obtém alterações nas médias em relação e métodos com maior número de subamostras. Além disso, quando utilizado em malha adensada de coleta, elimina-se a possibilidade de atribuir médias errôneas ao valor real do ponto

A malha amostral de 10 x 10 m utilizada foi capaz de representar a variabilidade do solo. Os valores de resistência a penetração demonstram a ocorrência de zonas compactadas dentro da área estudada, consideradas impeditivas ao crescimento radicular.

A umidade gravimétrica apresentou correlação negativa com o atributo resistência à penetração em todas as profundidades, de modo que os valores de resistência à penetração decrescem com o aumento da umidade.