

UILKA ELISA TAVARES

**DEPENDÊNCIA ESPACIAL E COMPORTAMENTO FÍSICO E  
MECÂNICO DE UM ARGISSOLO DE TABULEIROS COSTEIROS DE  
PERNAMBUCO**

RECIFE

2011

UILKA ELISA TAVARES

DEPENDÊNCIA ESPACIAL E COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DE  
UM ARGISSOLO DE TABULEIROS COSTEIROS DE PERNAMBUCO

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal Rural de  
Pernambuco, como parte do requisito  
do Programa de Pós – Graduação em  
Engenharia Agrícola para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia  
Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Mário Monteiro  
Rolim

Co – Orientador: Prof. Dr. Veronildo  
Souza de Oliveira.

RECIFE – PE

Março – 2011

### Ficha catalográfica

Tavares, Uilka Elisa

Dependência espacial e comportamento físico e mecânico de um Argissolo de Tabuleiros Costeiros de Pernambuco / Uilka Elisa Tavares. 2011.

52 f.: il.

Orientador: Mário Monteiro Rolim

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Água e Solo)

CDD

1. Geoestatística
  2. Atributos físicos e mecânicos
  3. Carbono orgânico
  4. Compactação do solo
- I. Rolim, Mário Monteiro
- II. Título

**UILKA ELISA TAVARES**

Dependência espacial e comportamento físico e mecânico de um Argissolo de  
Tabuleiros Costeiros de Pernambuco

Dissertação defendida e aprovada em 02 de março de 2010 pela Banca Examinadora:

Orientador:

---

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim  
UFRPE

Examinadores:

---

Prof. Dr. Abelardo A. A. Montenegro  
UFRPE

---

Prof. Dr. Veronildo de Souza Oliveira  
UFRPE

---

Prof. Dr. Edmundo Henrique Ventura Rodrigues  
UFRRJ

Dai-nos força, Senhor,  
Para aceitar com serenidade  
Tudo o que não possa ser mudado.  
Daí-nos coragem para mudar  
O que pode ser mudado.  
E daí-nos sabedoria  
Para distinguir uma coisa da outra.

A Deus,  
A meu pai Ernesto e a minha mãe Inácia,  
por todo amor, apoio e incentivo em mim depositados.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, agradeço pela oportunidade de ter conduzido as pesquisas em uma época muito boa, onde minha família e eu tivemos muita saúde e prosperidade, permitindo assim que eu me dedicasse plenamente às pesquisas.

A minha família, irmãos e sobrinhos que muito me alegram e especialmente aos meus pais, Inácia e Ernesto, que sempre me incentivam pela busca de mais conhecimento e sempre me apóiam nos meus sonhos. A eles dedico o meu amor e a minha gratidão.

Agradeço ao professor Mario pelo apoio, orientação e pela oportunidade de realizar estudos na área da mecânica dos solos.

Aos amigos da Pós-Graduação, que foram companheiros maravilhosos nessa jornada, onde pude trocar experiências e receber muito apoio para realizar minhas pesquisas. Agradeço em especial as amigas Adriana, Marcela, Liliane e Thais pela participação nas viagens, nos ensaios e nas discussões sobre a revisão. Agradeço ao estagiário do Pibic Gleyzon pela ajuda nas viagens e participação na realização dos ensaios. Também agradeço aos estagiários Diego e Karina, pela presença e apoio no Laboratório de Mecânica dos Solos e das viagens para a usina.

A Robertson e Patrícia, agradeço pelas sugestões, explicações e apoio quanto as dúvidas sobre geoestatística.

Aos amigos Waleska e Silvano, pelo apoio, torcida pelo meu sucesso e pela paciência.

Agradeço muito ao professor Veronildo pela participação nas viagens, demonstrando *in situ* como realizar os ensaios corretamente.

A todos os professores do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, e agradeço em especial aos professores Abelardo pela oportunidade de cursar a disciplina de Geoestatística; Enio, pela orientação nos ensaios de curva característica; e Elvira, pelas sugestões e conhecimentos transmitidos.

Agradeço a Usina Santa Teresa pela confiança e credibilidade recebida para realizar as coletas em sua propriedade. Agradeço aos funcionários da usina: Gledson, pela supervisão e apoio; Bola, Doido e aos outros funcionários que participaram na coleta das amostras de solo.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, especialmente ao DTR pela oportunidade de realização do mestrado e a seus funcionários Lulinha, Sônia, Ednaval, e Zeca pela ajuda na marcação das viagens.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), agradeço pela concessão da bolsa de estudos.

Às demais pessoas que contribuíram para a realização das pesquisas. Muito obrigada!

## SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS.....  | x    |
| LISTA DE TABELAS.....  | xii  |
| RESUMO.....  | xiii |
| ABSTRACT.....  | xv   |
| CAPÍTULO I.- Introdução Geral.....   | 1    |
| LITERATURA CITADA .....  | 7    |
| CAPÍTULO II - Variabilidade espacial de atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar.....  | 10   |
| RESUMO.....  | 11   |
| ABSTRACT .....   | 11   |
| INTRODUÇÃO.....  | 12   |
| MATERIAL E MÉTODOS.....  | 14   |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO.....  | 16   |
| CONCLUSÕES .....   | 25   |
| LITERATURA CITADA .....  | 26   |
| CAPÍTULO III - Variabilidade espacial da compactação e do carbono orgânico e relações entre atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar..... | 29   |
| RESUMO.....  | 30   |
| ABSTRACT .....   | 30   |
| INTRODUÇÃO .....   | 31   |
| MATERIAL E MÉTODOS .....   | 33   |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 35   |
| CONCLUSÕES .....   | 45   |
| LITERATURA CITADA .....  | 46   |



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Curva genérica de compactação do solo.....  | 5  |
| Figura 2. Semivariograma ilustrativo com os respectivos parâmetros.....   | 7  |
| Figura 3. Esquema de amostragem da área experimental.....   | 15 |
| Figura 4. Semivariogramas dos parâmetros: densidade (A), umidade (B) e porosidade (C).....  | 19 |
| Figura 5. Semivariogramas dos atributos granulométricos do solo, areia (A), silte (B) e argila (C).....   | 20 |
| Figura 6. Semivariogramas do carbono orgânico (A) e RP (B).....   | 21 |
| Figura 7. Mapas dos atributos (A) densidade do solo (0,0-0,2m), (B) densidade do solo (0,2-0,4m), (C) umidade (0,0-0,2m), (D) umidade (0,2-0,4m), (E) porosidade (0,0-0,2m) e (F) umidade (0,2-0,4m)..... | 23 |
| Figura 8. Mapas dos atributos areia (A) 0,0-0,2 m e (B) 0,2-0,4 m, silte (C) 0,0-0,2 m e (D) 0,2-0,4 m, argila (E) 0,0-0,2 m e (F) 0,2-0,4 m.....   | 24 |
| Figura 9. Mapas carbono orgânico (A) 0,0-0,2 m e (B) 0,2-0,4 m, e resistência a penetração (C) 0,0-0,2 m.....   | 25 |
| Figura 10. Croqui da área experimental.....   | 33 |
| Figura 11. Semivariogramas dos parâmetros: densidade (A), umidade (B), porosidade (C), Limite de liquidez (D), limite de plasticidade (E) e índice de plasticidade (F).....                               | 39 |
| Figura 12. Semivariogramas Densidade seca máxima (A), Umidade crítica (B), grau de compactação (C) e Carbono orgânico (D) .....   | 40 |
| Figura 13. Mapas dos atributos densidade do solo (A) (0-20 cm) e (B) (20-40 cm); umidade (C) (0-20 cm) e (D) (20-40 cm); e porosidade (E) (0-20 cm) e (F) (20-40 cm).....                                 | 42 |
| Figura 14. Mapas Limite de liquidez (A) (0-20 cm) e (B) (20-40 cm); limite de plasticidade (C) 20-40 cm; e índice de plasticidade (D) (0-20 cm) e (E) (20-40  | 43 |

cm).....

Figura 15. Mapas da densidade seca máxima (A) (0-20 cm) e (B) (20-40 cm);  
umidade crítica (C) (0-20 cm) e (D) (20-40 cm); e grau de compactação (E) (0-20  
cm) e (F) (20-40 cm)..... 44

Figura 16. Mapas carbono orgânico (A) 0-20 cm e (B) 20-40  
cm..... 45

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1. Medidas descritivas dos dados de densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ ) e teor de água (%), porosidade total (%); areia, silte e argila (em $\text{g kg}^{-1}$ ), resistência penetração (MPa) e carbono orgânico ( $\text{g kg}^{-1}$ ).....   | 17 |
| Tabela 2. Modelos, parâmetros dos semivariogramas experimentais e validação cruzada para a variável densidade do solo, teor de água, porosidade total, areia, silte, argila, carbono orgânico e resistência à penetração.....   | 18 |
| <b>Tabela 3.</b> Medidas descritivas dos dados de densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ ) e umidade do solo (%), porosidade total (%), areia, silte e argila (em $\text{g kg}^{-1}$ ), carbono orgânico ( $\text{g kg}^{-1}$ ), densidade seca máxima ( $\text{g cm}^{-3}$ ), umidade crítica (%), limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade (em %) e grau de compactação (%). ..... | 36 |
| Tabela 4. Modelos, parâmetros dos semivariogramas experimentais e validação cruzada para a variável densidade do solo, teor de água, porosidade total, limites de consistência, densidade seca máxima, umidade crítica, grau de compactação e carbono orgânico.....   | 38 |
| <b>Tabela 5.</b> Matriz de correlação linear entre os atributos do solo e o carbono orgânico.....   | 41 |

## RESUMO

Na agricultura atual existe grande preocupação com a qualidade do solo, em virtude desta interferir no pleno desenvolvimento das culturas, onde a compactação é um dos fatores mais investigados devido a sua grande probabilidade de ocorrência em solos manejados com implementos agrícolas. Para esta investigação, alguns parâmetros têm proporcionado boa precisão da qualidade do solo, entre eles, pode-se estacar os índices físicos, o carbono orgânico do solo, a resistência mecânica do solo a penetração, a tensão de pré-compactação e o índice de compressibilidade. Desta forma, o objetivo dessa pesquisa foi analisar parâmetros físicos, mecânicos e químicos que indicassem provável compactação do solo e sua estrutura de dependência espacial ao longo da área. Foi selecionada uma área de Argissolo Coeso de Tabuleiro Costeiro, cultivada com cana-de-açúcar, de aproximadamente 1,44 ha na qual foi estabelecida uma malha quadrada de 49 pontos, equidistantes 20 m entre si, para a retirada de solo para análise. Foram coletadas amostras em duas profundidades: 0,00 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m. Foram analisadas a textural do solo, densidade, umidade, porosidade, densidade seca máxima e umidade crítica, ambas obtidas pelo ensaio de Proctor Normal, grau de compactação, carbono orgânico, Resistência a penetração, índice de compressão e tensão de pré-compactação, obedecendo-se a metodologia da Embrapa ou ABNT para as análises citadas. Os resultados obtidos foram submetidos a análise estatística descritiva e correlação de Pearson. Também, investigou-se a dependência espacial das variáveis, através da ferramenta geoestatística, com obtenção de semivariograma e os mapas de distribuição das variáveis. Foi encontrada dependência espacial em todas as variáveis, cujos alcances variaram de 20,25 a 90 m de distancia, indicando que algumas variáveis podem ser coletadas em maiores distâncias, no caso de pesquisas futuras na mesma área. A umidade e a textura do solo apresentaram boa correlação entre si e com as demais variáveis. O documento está estruturado em 3 capítulos: no primeiro, apresenta-se uma revisão das pesquisas científicas referentes às áreas de Tabuleiros

Costeiros, suas características, bem como problemas que este tipo de solo pode sofrer devido ao mau manejo, suas conseqüências e métodos identificação da degradação do solo. No Capítulo 2, foi investigada a ocorrência de dependência espacial de atributos físicos do solo e do carbono orgânico presente em sua estrutura. No Capítulo 3, a susceptibilidade do solo a compactação foi investigada através de seus atributos físicos e mecânicos e posterior correlação entre os dados.

## ABSTRACT

In agriculture there is now great concern about the quality of the soil, because of this interfere with the full flowering of the cultures, where compaction is one of the most investigated due to their probability of occurrence in soils managed with farm implements. For this study, some parameters have provided good precision of soil quality, among them, the physical indices, organic carbon, soil mechanical resistance to penetration, tension precompaction and compressibility index. Thus, the purpose of this study was to analyze the physical, mechanical and chemical properties to indicate soil compaction and structure of spatial dependence into the area. It was selected an area of Cohesive Argissolo from Tabuleiro Costeiro, cultivated with cane sugar, from about 1.44 ha was established in which a square mesh of 49 points, evenly spaced 20 m apart, for the removal of soil for analysis. Samples were collected at two depths: 0.00 to 0.20 I 0.20 to 0.40 m. It was analyzed the soil texture, bulk density, water content, porosity, moisture content and maximum dry bulk density, both obtained by the Proctor Normal test, degree of compaction, organic carbon, resistance to penetration, compress index and tension precompaction, obeying Embrapa's or ABNT's methodology for the analysis. The results were submitted to descriptive statistical analysis and Pearson correlation. Was also investigated the spatial dependence of variables by geostatistical tool, obtaining semivariogram and the maps of distribution of variables. Spatial dependence was found in all variables, whose scope ranged from 20.25 to 90 m away, indicating that some variables can be collected at longer distances, in case future research in the area. The moisture and soil texture showed a good correlation among themselves and with other variables. The document is divided into three chapters: the first presents a review of scientific research concerning the areas of Tabuleiros Costeiros, its characteristics and problems that this type of soil may suffer due to bad management, its consequences and methods of identification soil degradation. In chapter 2, was investigated the occurrence of spatial dependence of soil physical

properties and organic carbon present in its structure. In chapter 3, the susceptibility of soil compaction was investigated using mechanical and physical attributes and subsequent correlation between data.

## **CAPÍTULO I**



## INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, a comunidade internacional está considerando a qualidade ambiental como um fator de grande influência para as próximas gerações. Novas alternativas vêm sendo empregadas a fim de se diminuir a poluição causada pelos combustíveis fósseis. A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das opções empregadas como fonte alternativa de energia, pois é renovável e agride menos o meio ambiente (Cunha, 2008). Na época de sua pesquisa, este autor verificou que o Brasil possuía 16% de sua geração de energia baseada em fontes limpas.

A cana-de-açúcar além de proporcionar a substituição do combustível fóssil pelo etanol apresenta a capacidade de reabsorver o CO<sub>2</sub>, um dos causadores do efeito estufa, considerado um grande degradador do meio ambiente.

A agricultura canavieira é o setor mais importante do Brasil desde o século XVI, sendo a cultura considerada como aquela que sustentou os novos habitantes do Brasil em seu período de colonização. O primeiro centro de produção de açúcar na nova colônia foi estabelecido na Capitania de Pernambuco, que prosperou durante aquele período. Atualmente, a produção da cana-de-açúcar concentra-se no centro-sul e no norte-nordeste do Brasil com produção média de 55% de álcool e 45% de açúcar (Cuenca et al., 2007). O Brasil detém em média 44% do comércio internacional (Hamerski, 2009).

A grande extensão territorial brasileira tem favorecido à produção da cana e contribuído o Brasil a destacar-se no cenário internacional com sua produção, onde é cultivada em vários tipos de solos e clima. Em Pernambuco funcionam, atualmente, 24 usinas, sendo 5 destilarias, 3 de açúcar e 16 unidades mistas, produzindo açúcar e álcool. Após um período de baixa na produção de etanol hidratado nos anos de 2001 à 2007, o Estado de Pernambuco volta a apresentar aumento na produção devido ao incentivo do uso de biocombustíveis (Unica, 2009).

A cultura da cana-de-açúcar é dependente de fatores externos e internos que atuam

sobre todas as culturas, como a interação edafoclimática, o manejo da cultura, a cultivar escolhida, o tipo de solo, os quais desempenham importante papel no sucesso agrícola. (Maule et al., 2001). Em termos de paisagem, muitas destas áreas destinadas à produção da cana-de-açúcar encontram-se cultivadas em solos de Tabuleiros Costeiros.

Segundo Oliveira (2008) e Beltrão et al. (2005), os solos de Tabuleiros situam-se em boa parte do litoral brasileiro e apresentam cobertura sedimentar formada no terciário com vales e encostas suaves, o relevo varia de plano a levemente ondulado. Tais solos, quando classificados como coesos, podem apresentar esta característica devido a condições climáticas e ao relevo, constituído pelo Grupo Barreiras, que favorecem a formação dos horizontes coesos. Os horizontes coesos apresentam consistência dura a muito dura, quando seco, e friável quando úmido.

A coesão dos solos de Tabuleiros Costeiros ocorre tanto em áreas florestais como as cultivadas, indicando que a coesão pode ser devida a transformação do material de origem (Paiva et al., 2000). As áreas de ocorrência abrangem grande parte dos Estados do Nordeste, especialmente a Bahia, Alagoas e Rio Grande do Norte, onde o uso atual, na região mais úmida, é predominantemente ocupado pela cana-de-açúcar (Cintra et al., 1998).

Como solos de Tabuleiros Costeiros ocorrem ao longo da costa brasileira, as classificações do solo varia bastante, com predominância dos Latossolos (Oliveira, 2008) e de Argissolos, Espodossolos e Neossolos quartzarênicos (Sobral et al., 2008).

Além do tipo de solo, outros fatores influenciam o crescimento das plantas. A mecanização por meio de tratores e subsoladores e os processos de umedecimento e secagem natural do solo podem influenciar negativamente nos atributo físicos, químicos e biológicos do solo, alterando-os e resultando em uma produção aquém do esperado.

Na maioria das vezes, a ação externa que o solo sofre pode ocorrer através da atuação de tratores e implementos agrícolas na lavoura, o que prejudica a estrutura do solo mesmo quando se busca melhorar determinada característica deste. A mecanização aumenta as cargas mecânicas aplicadas no solo e como consequência ocasiona a degradação física deste corpo tanto na superfície como na subsuperfície (Cavaliere et al., 2008).

Além da mecanização, o sistema de cultivo, o manejo da lavoura e o clima influenciam na intensidade e frequência dos eventos de compactação (Defosse & Richard, 2002). Jung et al. (2010) citam que o grau de compactação criado pelo manejo

e peso das máquinas do solo é função da textura do solo, densidade inicial, estrutura do solo, matéria orgânica e clima.

O manejo pelo preparo convencional, que busca revolver e descompactar o solo na faixa arável promove a compactação da faixa mais profunda do solo, devido ao peso do trator. O manejo pelo sistema de plantio direto, o qual só revolve o solo na linha de cultura acaba por compactar a camada superficial do solo com o passar dos anos.

Segundo Silva et al. (2009), em trabalho desenvolvido para avaliar e estimar as propriedades dinâmicas como indicadores de mudança na estrutura do solo cultivado com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, concluíram que a tensão de pré-consolidação e a resistência ao cisalhamento foram eficientes para avaliar alterações na estrutura do solo cultivado com cana de açúcar, evidenciando que estas propriedades podem ser usadas como indicadores do manejo do solo, uma vez que elas estão relacionadas ao contato solo/pneu e solo/implemento.

A compactação do solo pode ser definida como a compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento da densidade do solo em consequência da redução de seu volume (Caputo, 2003). Tal efeito proporciona o incremento da densidade do solo, a aproximação das partículas sólidas entre si, e a redução da macroporosidade (Canillas & Salokhe, 2002), sem praticamente alterar a microporosidade (Dias Junior, 1996). Em solos agricultáveis, a compactação encontra-se na zona de formação das raízes (Defosse & Richard, 2002).

Com a redução do espaço poroso, propriedades físicas e químicas do solo são afetadas, o que influenciará de forma negativa no crescimento das raízes da cultura. A infiltração e a mobilidade de ar no solo serão prejudicadas (Jung et al., 2010).

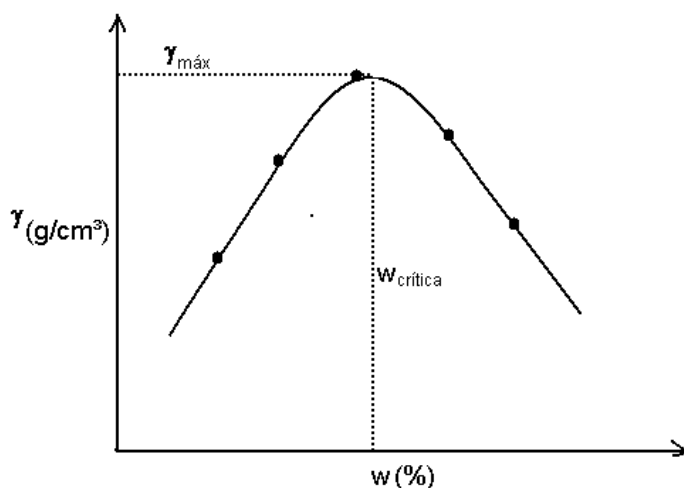
Segundo Oliveira (2008) e Camargo & Alleoni (2006), a compactação do solo decorrente da mecanização agrícola ocorre logo após as primeiras passadas do implemento sobre o solo, onde a compactação adicional ocorre apenas com o aumento da carga ou umidade. Quanto maiores e mais pesados forem os implementos, maior é o incremento na compactação do solo (Cavaliere et al., 2008).

A água funciona como um lubrificante para as partículas do solo, que podem se reorganizar de acordo com a carga aplicada e assim apresentar-se de forma dispersa. Na curva de compactação, apresentada na Figura 1, observa-se que a densidade do solo aumenta com o incremento de água no solo até que se alcance o teor de umidade crítico do solo, que corresponde à máxima compactação. Após este valor, que depende da

textura específica de cada solo, a capacidade de compactação diminui visto que o solo encontra-se praticamente saturado e a água é incompressível (Richardt, 2005).

Ainda segundo Richardt (2005), a umidade do solo limita o sucesso da produção agrícola a partir de seu intervalo hídrico ótimo, que corresponde ao limite superior e inferior de água no solo, a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente tornam-se limitantes.

O momento para se manejar o solo adequadamente com implementos de preparo seria aquele antes da umidade crítica, no qual o solo está na sua condição friável. Próximo a este valor de umidade crítica e após ele, o uso de implementos pode ocasionar a máxima contração do solo, como esquematizado na Figura 1 (Oliveira, 2008).



**Figura 1.** Curva genérica de compactação do solo.

Desta forma, muitos estudos são realizados a fim de se prevenir à compactação do solo, através de estudos em diferentes manejos e correlações entre atributos físicos e químicos do solo. Para Suziki et al. (2008), a compactação também pode ser estimada pelo estudo da resistência a penetração do solo.

Penetrômetros e penetrógrafos têm sido utilizados no campo para caracterizar a compactação provocada pelo manejo do solo. Esses equipamentos proporcionam uma melhor estimativa de impedimento mecânico do solo ao crescimento das raízes (Benghough & Mullins, 1990).

Em seu estudo, Dias Junior et al. (2004) encontraram relação significativa, positiva e linear entre a tensão de pré-consolidação e a resistência do solo à penetração, medida no laboratório e no campo. Este fato se deve ao fato de que com o aumento da tensão de

pré-consolidação, a resistência do solo aumenta e a alongação das raízes, consequentemente, cessa.

Segundo Suzuki et al. (2008), a densidade do solo e sua resistência dependem de atributos de cada solo. Na busca de se obter relações de pedotransferência, este autor correlacionou a susceptibilidade à compactação e capacidade de carga com propriedades físicas de diferentes solos, como a resistência, densidade e umidade. Como resultado, os autores encontraram correlação entre a resistência a penetração (RP) estimada e a observada com  $R^2$  de 0,52. Também se constatou que o solo sob sistema de plantio direto, o qual normalmente apresenta maior densidade na camada mais superficial do solo, apresentou menor susceptibilidade à compactação e maior resistência a penetração, sendo que a susceptibilidade a compactação e capacidade de carga podem ser estimadas pela densidade inicial do solo e pela resistência.

Além dos aspectos agronômicos, a matriz do solo pode ser interpretada por aspectos geoestatísticos, os quais podem fornecer uma visão mais ampla sobre o complexo de influências que o solo recebe.

Landim (2003) observa que existe uma grande variedade de testes para o tratamento dos dados pela estatística clássica, mas que não há uma grande preocupação por parte desta estatística em verificar correlações existentes de uma mesma variável em diferentes pontos no espaço ou, a dependência espacial. Mesmo que os métodos tradicionais de classificação do solo e análises estatística não considerem a dependência espacial entre atributos dos solos e produtividade, diversos trabalhos apresentam resultados que corroboram a variabilidade como ferramenta na tomada de decisão no manejo do solo.

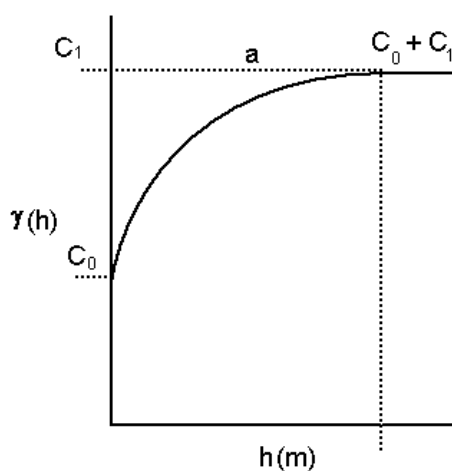
Diversas propriedades do solo influenciam na sua variabilidade física. As mais citadas na literatura são a textura, a densidade do solo e a densidade das partículas as quais influenciam diretamente a porosidade total e, por conseqüência, regulam o armazenamento de água e ar no solo.

O manejo do solo influencia fortemente na variabilidade do solo (Schaffrath, 2008). Semelhanças na pedologia do solo não resultam sempre na mesma variabilidade de atributos, da mesma forma que áreas pedologicamente diferentes, podem apresentar-se semelhantes em seus atributos, por influência do manejo.

Um valor medido, de uma variável qualquer, pode ser explicado em parte por um modelo estatístico e em parte pela variação derivada do acaso. A dependência espacial

entre amostras somente pode ser modelada através da geoestatística, por meio das teorias das variáveis regionalizadas (Matheron, 1963).

Através da geoestatística, é possível se usar métodos de interpolação para a geração de mapas, sendo a krigagem o método interpolador mais utilizado. Nesse caso, a geoestatística é usada para se obter um semivariograma segundo o modelo que melhor se ajuste a distribuição de pontos. Esses semivariogramas são constituídos de valores estimados do efeito pepita ( $C_0$ ), que corresponde à descontinuidade do semivariograma ( $\gamma(h)$ ) para distâncias ( $h$ ) menores que as amostradas; do patamar ( $C_1$ ), que corresponde à semivariância que apresenta dependência espacial; do alcance ( $a$ ), que é considerada a máxima distância em que ocorre dependência espacial; da soleira ( $C_0 + C_1$ ), que é a diferença entre o efeito pepita e o patamar (Figura 2).



**Figura 2.** Semivariograma ilustrativo com os respectivos parâmetros.

A partir do conhecimento da variabilidade espacial, é possível verificar as correlações espaciais entre os atributos do solo, o que contribui para a escolha das melhores estratégias para o manejo do solo (Schaffrath, 2008).

## LITERATURA CITADA

- Beltrão, B. A., Mascarenhas, J. C., Souza Junior, .: C., Trindade, M. J., Miranda, J. L. F. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Goiana, Estado de Pernambuco. Recife: CPRM/PRODEEM, 21 p., 2005.
- Benghough, A.G.; Mullins, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of

- experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.41, p.341-58, 1990.
- Camargo, O. A. & Alleoni, L. R. F. 2006. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/Comp1.htm>
- Canillas, E. C.; Salokhe, V. M. Modeling compaction in agricultural soils. *Journal of Terramechanics*, v.9, p.71-84, 2002.
- Cavaliere, C. M. V.; Arvidsson, J.; Silva, A. P.; Keller, T. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil & Tillage Research*, V.98, n.1, p.17-26, 2008.
- Caputo, H.P. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003. 225p.
- Cintra, F.L.D.; LIBARDI, P.L.. Caracterização física de uma classe de solo do ecossistema do tabuleiro costeiro. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.55, p.367-378, 1998.
- Cuenca, M. A. G., Mandarino, D. C. *Novos rumos da atividade canavieira nos principais municípios produtores do Estado do Ceará; 1990, 1995, 2000 e 2005*. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2007.
- Cunha, R. A. P. A era das energias limpas. *Folha de Pernambuco*, pg. 8, 2008
- Defosse, P.; Richard, G. Models of compaction due to traffic and their evaluation *Soil & Tillage Research*, v.67, p.41-64, 2002.
- Dias Junior, M. S.; Pierce, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *Revisão de Literatura. Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.20, p.175-182, 1996.
- Dias Junior, M. S.; Silva, A. R.; Fonseca, S.; Leite, F. P.. Método alternativo de avaliação da tensão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.805-810, 2004.
- Hamerski, F. *Estudo de variáveis no processo de carbonatação do caldo de cana-de-açúcar*. Paraná, 2009, 150 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia dos alimentos) - Universidade Federal do Paraná.
- Jung, K. Y.; Kitcone, N. R.; Sudduth, K. A.; Lee, K. S.; Chung, S. O. Soil compaction varies by crop management system over a claypan soil landscape. *Soil & Tillage Research* v.107, p.1-10, 2010.
- Landim, P. M. B. *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: Editora UNESP, 2003. 2. ed. Rev. E ampl. 253 p.

- Matheron, G. 1963. Principles of Geostatistics. Economic Geology, Vol.58, p.1246-1266.
- Maule, R. F.; Mazza, J. A.; Martha JR., G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. Scientia Agricola, Piracicaba, v.58, p.295-301, 2001.
- Oliveira, V. S. Compactação em solos coesos dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. Recife, 2008, 81 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- Paiva, A. Q., Souza, L. S., RIBEIRO, A. C., Costa, L. M. Propriedades físico-hídricas de solos de uma topossequência de tabuleiro do estado da Bahia. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.35, p.2295-2302, 2000.
- Silva, R.B.; Lanças, K.P.; Miranda, E.E.V; Silva, F.A.M.; Baio, F.H.R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State – Brazil . Soil & Tillage Research, v.103, p.265–270, 2009.
- Richart, A.; Tavares Filho, J.; Brito, O. R.; Fuentes Llanillo, R.; Ferreira, R. Compactação do solo: causas e efeitos. Semina: Ciências Agrárias, v.26, p.321-344, 2005.
- Schaffrath, V.R.; Tormena, C.A.; Fidalski, J.; Gonçalves, A.C.A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v.32, p.1369-1377, 2008.
- Sobral, L. F., Silveira, K. R., Viana, R. D. Correlações entre os Métodos Mehlich 1, Mehlich 3 e resina para análise de P e K em solos dos Tabuleiros Costeiros. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 35, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2008.
- Suzuki, L. E. A.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Lima, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade a compactação e suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do rio grande do sul. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.963-973, 2008.
- ÚNICA, e MAPA. Produção de etanol do Brasil. 2009. Disponível em: <http://www.unica.com.br/downloads/estatisticas/PRODUÇÃO%20DE%20ETANOL.xls> Acessado em: 25/11/2009.



## **CAPÍTULO II**

## **Variabilidade espacial de atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar**

**Resumo:** Objetivou-se neste trabalho estudar a variabilidade espacial de atributos físicos de um Argissolo Coeso cultivado com cana-de-açúcar e seu teor de matéria orgânica como indicadores da degradação do solo. As amostras foram coletadas em 49 pontos georreferenciados, com espaçamento de 20,00 m, formando malha de 120 × 120 m. Trincheiras foram abertas nos diversos pontos e coletadas 98 amostras de solo deformadas e indeformadas nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m. As variáveis apresentaram distribuição Normal. Foi observada que a densidade média encontrava-se acima de  $1,47 \text{ g cm}^{-3}$ , a qual pode ser restritiva ao desenvolvimento das raízes. Observou-se forte grau de dependência espacial para a maioria das variáveis, e moderada dependência para umidade e porosidade. Os maiores alcances encontrados foram para a areia (nas duas profundidades) e os menores para densidade (0,00–0,20 m) e a porosidade (0,20–0,40 m). Os mapas de krigagem apontaram correlação inversa entre densidade e porosidade e forte semelhança entre argila e carbono orgânico como também entre resistência mecânica a penetração e densidade. Todas as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial até 20,00 m, indicando que para análises paramétricas as amostras devem ser coletadas em distâncias superiores a esse valor.

**Palavras-chave:** solo coeso, vinhaça, dependência espacial

## **Spatial variability of physical attributes and organic carbon of an Argissolo under sugarcane cultivation**

**Abstract:** The purpose of this study was to evaluate the spatial variability of physical attributes of a Cohesive Argissol and its organic matter content as indicators of soil degradation. Soil samples were collected in 49 georeferenced points, with spacing of 20.00 m, forming a 120 × 120 m-mesh. Trenches were opened on the points, being collected 98 disturbed and undisturbed soil samples at depths of 0.00-0.20 and 0.20-0.40 m. Data presented normal distribution. Density means were higher than  $1.47 \text{ g cm}^{-3}$ , which could be restrictive to root development. Most variables presented high spatial dependence in contrast to the moderate spatial dependence of moisture and porosity. Sand content presented the highest range at both deep and both density (0.00-0.20 m)

and porosity (0.20-0.40), the lowest ones. Kriging maps pointed out inverse correlation between density and porosity and high similarity between clay content and organic carbon as well mechanical penetration resistance and density. All variables presented spatial dependence up to 20.00 m, indicating samples should be spaced far than 20.00 for parametric analysis.

**Key word:** cohesive soil, vinasse, spatial dependence

## INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar apresenta grande importância no agronegócio brasileiro, representando a indústria sucroalcooleira cerca de 2% das exportações nacionais, além de reunir 6% dos empregos agroindustriais brasileiros e contribuir de maneira efetiva para o crescimento do mercado interno de bens de consumo (Bologna-Campbell, 2007). Boa parte da produção de cana-de-açúcar encontra-se em áreas de Tabuleiros Costeiros. Essa região é dominada por Latossolos e Argissolos Amarelos, principalmente derivados dos sedimentos argilo-arenosos da formação barreiras (Correa et al., 2008). Diferenças marcantes entre os graus de consistência do solo seco e úmido, principalmente em termos de incremento do grau de consistência do solo seco (dureza), podem ser observadas em alguns horizontes de solos da faixa dos Tabuleiros Costeiros, nas regiões sudeste e nordeste do Brasil (Giarola et al., 2001).

A qualidade estrutural está associada às condições favoráveis ao crescimento das raízes, a aeração e ao movimento de água no solo (Gomes et al., 2007). Analogamente, Siqueira et al. (2010) afirmam que o solo com pobre estrutura física apresenta dinâmica e estoque de água limitados, o que reduz a área explorada pelas raízes das plantas. Portanto, o processo de formação do solo como o manejo empregado no cultivo e na colheita pode alterar esta qualidade, desequilibrando os atributos físicos, químicos e biológicos (Silva & Cabeda, 2006).

As alterações na estrutura do solo incidem no arranjo das partículas, conseqüentemente, afetando a distribuição de poros, a resistência mecânica do solo à penetração e a densidade do solo (Oliveira et al., 2010; Tormena et al., 2002). Assim, a macroporosidade é drasticamente reduzida com a compactação, ocasionando o aumento da densidade do solo e sua resistência mecânica à penetração das raízes, o que faz com

que estas propriedades sirvam como indicadoras ao crescimento radicular das culturas.

Outros fatores que incidem fortemente na qualidade do solo são os teores de matéria orgânica e carbono orgânico, os quais exercem também grande influência na estrutura do solo, por atuarem na estabilidade de agregados. A matéria orgânica no solo pode aumentar ou diminuir a resistência do solo, dependendo de seu efeito conjunto sobre a densidade, o cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação do solo (Braidá et al., 2010). Os mesmos autores verificaram que a matéria orgânica aumentou a força de ligação entre as partículas, o que fez com que o solo apresentasse maior resistência à compactação.

Dessa forma, a matéria orgânica tem a capacidade de aumentar o intervalo de teor de água no solo. Isto faz com que a resistência à penetração diminua mesmo quando o solo está seco. A matéria orgânica ocasiona mudança no arranjo das partículas do solo, tornando-o mais susceptível à compactação devido ao aumento da macroporosidade e a diminuição do número de pontos de contato entre as partículas (Braidá, 2004; Toermana et al., 2010).

Os atributos físicos do solo e o teor de carbono orgânico podem variar no tempo e no espaço e estas características são consideradas, atualmente, o princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas (Grego & Vieira, 2005).

Segundo Cruz et al. (2010), o conhecimento da variabilidade do solo tem conduzido a uma reavaliação do manejo convencional das culturas. O conhecimento da variabilidade existente no solo é de grande importância para a agricultura devido à possibilidade de prevenir tanto quedas na produtividade como gastos na manutenção da qualidade do solo (Souza et al., 2010).

Ao verificarem a dependência espacial de alguns atributos físicos do solo e o carbono orgânico em um Argissolo Vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar, Cruz et al. (2010) identificaram zonas de manejo, que auxiliam na tomada de decisão. Os autores observaram que o relevo é um fator importante na distribuição espacial dos atributos do solo e que, por consequência, isto afeta o desenvolvimento vegetal (Siqueira et al., 2010). Simões et al. (2006) apontam que a forma da paisagem pode gerar rotas preferenciais para o fluxo d'água, o que afeta também os atributos do solo.

A partir deste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar a dependência espacial de atributos físicos de um Argissolo Coeso e seu teor de carbono orgânico, quanto ao manejo empregado na área.

## MATERIAL E MÉTODOS

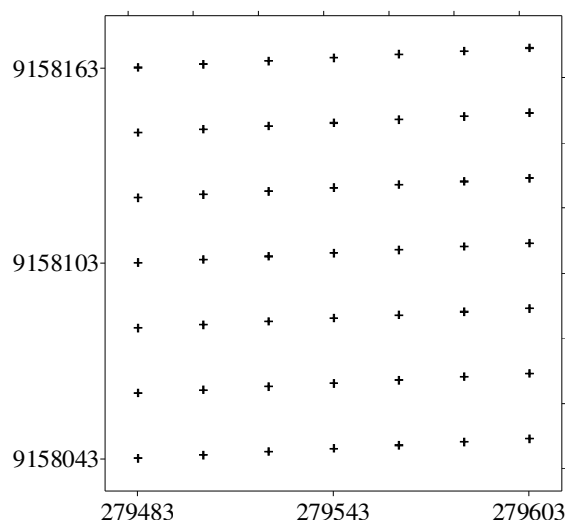
O estudo foi realizado em uma área de 1,44 ha, de um Argissolo Coeso cultivado com cana-de-açúcar, variedade RB 92579, na Usina Santa Tereza, Goiana, PE, localizada na mesorregião Mata e na microrregião Mata setentrional do Estado de Pernambuco, próximo às coordenadas 7° 33' 38'' de latitude sul e 35° 00' 09'' de longitude oeste, distando 65,7 km da cidade de Recife. À área é disponibilizada a fertirrigação com vinhaça e são realizados o preparo convencional do solo, com utilização de grade aradora e niveladora, subsolador e sulcador.

As amostras de solo foram coletadas em 49 pontos georreferenciados, com espaçamento de 20,00 m, formando malha de 120 × 120 m, conforme a Figura 3, constituída de sete ruas e sete pontos em cada rua. Em cada ponto foi aberta uma trincheira e coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, totalizando 98 amostras.

Na determinação do teor de água do solo, foram feitas coletas de amostras deformadas, com auxílio de enxadeco e pá; após coletado o solo foi armazenado em cápsulas metálicas, devidamente referenciado e embalado em filme de PVC para preservar a sua umidade. Para a densidade do solo, amostras indeformadas foram coletadas com auxílio do amostrador de Uhland e o anel de 0,05 m de altura e 0,02 m de diâmetro.

Nos 49 pontos georreferenciados foram determinadas a resistência mecânica do solo à penetração (RP) com o penetrógrafo digital PNT-2000, da SoilControl, realizando cinco repetições. Devido ao solo apresentar resistência na sua estrutura na época de amostragem da RP, e a inadequação do aparelho utilizado, não foi possível avaliar a resistência mecânica do solo na profundidade de 0,20-0,40m.

Todas as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos e Aproveitamento de Resíduos da Universidade Federal Rural de Pernambuco. O teor de água do solo foi obtido conforme Embrapa (1997), sendo as amostras pesadas, colocadas em estufa com temperatura de 105° C, e aferidos novamente os pesos após atingir constância de massa.



**Figura 3.** Esquema de amostragem da área experimental

As frações granulométricas foram determinadas pelo densímetro de Boyoucos, com dispersão de 50 g de terra fina seca ao ar com 25 ml de hexametáfosfato de sódio tamponado com carbonato de sódio. A areia foi separada por tamisação, enquanto a argila por sedimentação e o silte por diferença. A densidade das partículas e a densidade do solo foram determinadas pelo método do balão e do anel volumétrico, respectivamente. A porosidade total (Pt) foi calculada indiretamente a partir da relação entre a densidade das partículas (Dp) e do solo (Ds); e o teor de carbono orgânico obtido pela digestão da amostra em ácido sulfúrico e dicromato de potássio, todos segundo metodologia prevista na Embrapa (1997).

As variáveis foram analisadas por meio de estatística descritiva, onde se obtiveram os valores da média, mediana, coeficiente de variação, valores de mínimo e máximo, assimetria e curtose. A hipótese de normalidade foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, por meio de planilha eletrônica Excel. O critério de Hoaglin (Hoaglin et al., 1992) foi aplicado para a remoção de valores discrepantes, que na maioria das vezes, são indicativos de erro na leitura dos valores das variáveis (Ângulo Filho, 2002; Guimarães et al., 2010).

O grau de variabilidade foi estimado pelo coeficiente de variação (CV) dos atributos, conforme sugerido por Warrick & Nielsen (1980), os quais consideram baixa variabilidade quando  $CV < 12\%$ ; média para o intervalo 12-60% e alta variabilidade quando  $CV > 60\%$ .

A dependência espacial foi avaliada por meio de ajuste de semivariograma (Vieira, 2000), com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca, estimada

por:

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

em que  $N(h)$  é o número de pares dos valores medidos  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i+h)$ , separados por um vetor  $h$ . O programa Geoeas (Englund & Sparks, 1991) foi utilizado para a geração do semivariograma e para a escolha do melhor modelo ajustado (exponencial, esférico, gaussiano ou linear), sendo verificado se os erros padronizados apresentaram média próxima a zero e desvio-padrão próximo à unidade, segundo o critério de Jack-Knifing (Vauclin et al., 1983). Para os modelos de semivariogramas que não apresentaram patamar definido, indicativo de não-estacionaridade, retirou-se a tendência dos dados com o auxílio do software Surfer 7.0 (Golden Software, 1999).

A análise do GDE (Grau de Dependência Espacial) foi realizada segundo Cambardella et al. (1994), que preconiza a proporção em porcentagem do efeito pepita ( $C_0$ ) em relação ao patamar ( $C_0+C_1$ ) e apresenta: (a) dependência forte < 25%; (b) dependência moderada entre 25 e 75% e (c) dependência fraca > 75%. Foram gerados os mapas de isolinhas pelo software Surfer 7.0 (Golden Software, 1999).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estatísticos das variáveis do solo e do carbono orgânico encontram-se na Tabela 1, enquanto os parâmetros do semivariograma das variáveis que apresentaram dependência espacial, na Tabela 2.

A média e a mediana das respectivas variáveis são relativamente semelhantes (Tabela 1), o que sugere uma distribuição simétrica, e os valores de assimetria e curtose apresentaram-se compatíveis com a distribuição Normal (valores próximos a 0). O teste de Komolgorov-Smirnov (d) foi significativo para todas as variáveis analisadas. O teor de silte apresentou o maior valor da curtose, nas duas profundidades.

A densidade do solo nas duas profundidades apresentou valores mais baixos do que aqueles encontrados por Lima Neto et al. (2009), cujo valor médio observado por estes autores foi  $1,59 \text{ g cm}^{-3}$  ao estudar Latossolos Amarelos e Argissolo dos Tabuleiros Costeiros cultivados com cana-de-açúcar do Estado de Alagoas. Contudo, Guimarães & Moreira (2001) descrevem que valores acima de  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$  já são restritivos para o

desenvolvimento das raízes das plantas.

O baixo teor de silte também foi observado por Lima Neto et al. (2009), que afirmam que tal valor pode ser devido a alterações de sedimentos pré-intemperizados e edáficos, no caso de Argissolo Coeso. Ainda na Tabela 1, observa-se que todas as variáveis apresentam de baixa à média variabilidade, observadas pelo CV, com os maiores coeficientes encontrados no silte, nas duas profundidades, e CO (0,00-0,20 m) (Warrick & Nielsen, 1980). Segundo Simões et al. (2006), a maior variabilidade do silte em relação à areia pode estar relacionada com a maior mobilidade dessa fração.

**Tabela 1.** Medidas descritivas dos dados de densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ ) e teor de água (%), porosidade total (%); areia, silte e argila (em  $\text{g kg}^{-1}$ ), resistência penetração (MPa) e carbono orgânico ( $\text{g kg}^{-1}$ )

| Parâmetros      | <sup>1</sup> Ds | <sup>2</sup> Ug | <sup>3</sup> Pt | Areia  | Silte  | Argila | <sup>4</sup> CO | <sup>5</sup> RP |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|--------|--------|-----------------|-----------------|
| 0,00-0,20 m     |                 |                 |                 |        |        |        |                 |                 |
| Média           | 1,47            | 13,42           | 47,43           | 587,77 | 60,68  | 351,55 | 20,33           | 2,13            |
| Mediana         | 1,49            | 13,42           | 47,67           | 580,20 | 62,00  | 353,20 | 20,24           | 2,09            |
| <sup>6</sup> DP | 0,16            | 2,25            | 5,27            | 50,07  | 35,81  | 48,39  | 8,14            | 0,15            |
| Curtose         | 0,20            | 0,11            | -0,67           | 0,02   | 0,94   | -0,58  | -0,33           | -0,10           |
| Assimetria      | 0,23            | 0,03            | -0,07           | 0,64   | 0,76   | 0,34   | 0,67            | 1,00            |
| Máximo          | 1,89            | 18,15           | 57,00           | 721,20 | 170,20 | 453,20 | 40,72           | 2,45            |
| Mínimo          | 1,17            | 7,73            | 35,18           | 501,20 | 1,76   | 263,20 | 10,11           | 1,93            |
| <sup>7</sup> CV | 0,11            | 0,17            | 0,11            | 0,09   | 0,59   | 0,14   | 0,40            | 0,07            |
| <sup>8</sup> d  | 0,07            | 0,046           | 0,073           | 0,12   | 0,073  | 0,060  | 0,019           | 0,160           |
| 0,20-0,40 m     |                 |                 |                 |        |        |        |                 |                 |
| Média           | 1,54            | 13,86           | 45,27           | 571,84 | 58,93  | 363,45 | 13,87           |                 |
| Mediana         | 1,54            | 13,88           | 44,89           | 555,60 | 59,20  | 364,28 | 14,17           |                 |
| <sup>6</sup> DP | 0,15            | 2,48            | 4,44            | 57,74  | 30,19  | 44,23  | 3,30            |                 |
| Curtose         | 0,01            | -0,51           | -0,22           | -0,57  | -0,65  | -0,41  | -0,82           |                 |
| Assimetria      | -0,19           | 0,22            | 0,15            | 0,27   | -0,04  | 0,02   | -0,19           |                 |
| Máximo          | 1,87            | 18,96           | 54,21           | 693,60 | 124,20 | 456,00 | 19,43           |                 |
| Mínimo          | 1,19            | 8,93            | 35,33           | 448,40 | 3,80   | 276,00 | 6,74            |                 |
| <sup>7</sup> CV | 0,09            | 0,18            | 0,10            | 0,10   | 0,51   | 0,12   | 0,24            |                 |
| <sup>8</sup> d  | 0,059           | 0,085           | 0,087           | 0,118  | 0,062  | 0,059  | 0,068           |                 |

<sup>1</sup> Densidade do solo; <sup>2</sup> teor de água; <sup>3</sup> porosidade total; <sup>4</sup> carbono orgânico; <sup>5</sup> resistência a penetração; <sup>6</sup> desvio padrão; <sup>7</sup> coeficiente de variação; <sup>8</sup> estatística de Kolmogorov-Smirnov, significativo a 5% de probabilidade

Os resultados da análise geoestatística apresentaram dependência espacial nas duas profundidades (Tabela 2). O GDE evidenciou que existe forte dependência para a maioria das variáveis, com exceção de Ug e Pt, na profundidade 0,00-0,20 m, as quais apresentaram dependência moderada (Tabela 2). Segundo Cambardella et al. (1994), variáveis que apresentam forte grau de dependência são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo.



Observa-se que as variáveis estudadas possuem diferentes valores de alcance. Os maiores alcances encontrados foram para a areia, nas duas profundidades (Tabela 2) e podem ser observados nas Figuras 4, 5 e 6. O mesmo foi observado por Simões et al.(2006), que citam o revolvimento do solo como um possível homogeneizador das partículas, criando caminhos preferenciais no sentido do tráfego dos implementos na pesquisa do referido autor, e este fator pode estar contribuindo para maiores valores de alcance.

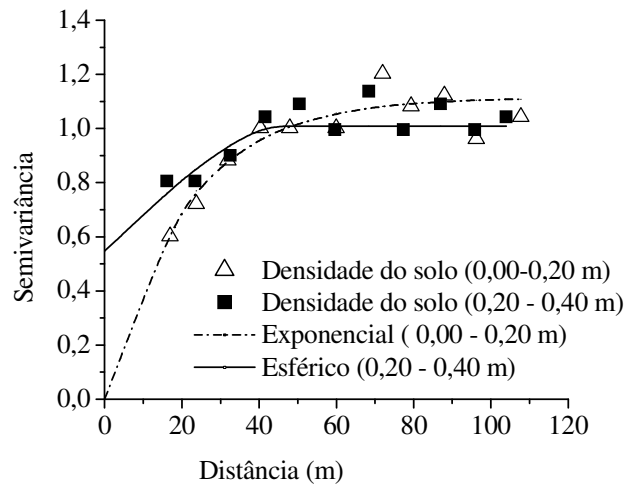
**Tabela 2.** Modelos, parâmetros dos semivariogramas experimentais e validação cruzada para a variável densidade do solo, teor de água, porosidade total, areia, silte, argila, carbono orgânico e resistência à penetração

| Variáveis                   | Ds               | Ug                             | Pt    | Areia             | Silte             | Argila            | CO                | RP       |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|
| 0,00 - 0,20 m               |                  |                                |       |                   |                   |                   |                   |          |
| <sup>1</sup> C <sub>0</sub> | 1,03E-05         | 0,189                          | 0,665 | 0,275             | 0,014             | 0,346             | 1,21E-06          | 1,17E-05 |
| <sup>2</sup> C <sub>1</sub> | 1,082            | 0,495                          | 0,161 | 0,815             | 0,750             | 1,072             | 1,141             | 2,553    |
| <sup>3</sup> a              | 21,185           | 27,79                          | 35,26 | 73,18             | 39,21             | 42,97             | 31,44             | 34,45    |
| Modelo                      | <sup>5</sup> Exp | <sup>6</sup> Esf <sup>rt</sup> | Esf   | Esf <sup>rt</sup> | Esf <sup>rt</sup> | Exp               | Esf <sup>rt</sup> | Esf      |
| <sup>4</sup> GDE            | 9,48E-04         | 27,62                          | 80,51 | 25,22             | 1,88              | 24,40             | 1,06E-04          | 4,57E-04 |
| Média                       | -0,03            | 0,019                          | 0,048 | 0,008             | 0,036             | 0,014             | -0,025            | -0,04    |
| Desvio Padrão               | 0,939            | 1,186                          | 1,077 | 1,116             | 1,452             | 0,803             | 1,304             | 1,234    |
| <sup>7</sup> R <sup>2</sup> | 0,7              | 0,68                           | 0,36  | 0,71              | 0,39              | 0,76              | 0,64              | 0,31     |
| 0,20 - 0,40 m               |                  |                                |       |                   |                   |                   |                   |          |
| C <sub>0</sub>              | 0,545            | 0,125                          | 0,085 | 0,091             | 2,47E-07          | 3,53E-09          | 1,29E-05          |          |
| C <sub>1</sub>              | 0,502            | 0,930                          | 0,988 | 1,086             | 0,898             | 1,125             | 2,322             |          |
| a                           | 55,72            | 53,43                          | 20,73 | 86,45             | 45,63             | 34,091            | 28,32             |          |
| Modelo                      | Esf              | Esf                            | Exp   | Esf <sup>rt</sup> | Esf <sup>rt</sup> | Exp <sup>rt</sup> | Esf <sup>rt</sup> |          |
| GDE                         | 9,78             | 11,85                          | 7,89  | 7,70              | 2,75E-05          | 3,14E-07          | 5,55E-04          |          |
| Média                       | -0,034           | -0,029                         | 0,06  | 0,005             | 0,048             | 0,043             | -0,063            |          |
| Desvio Padrão               | 1,054            | 1,174                          | 0,92  | 1,347             | 1,236             | 0,837             | 1,32              |          |
| R <sup>2</sup>              | 0,92             | 0,64                           | 0,77  | 0,71              | 0,7               | 0,81              | 0,14              |          |

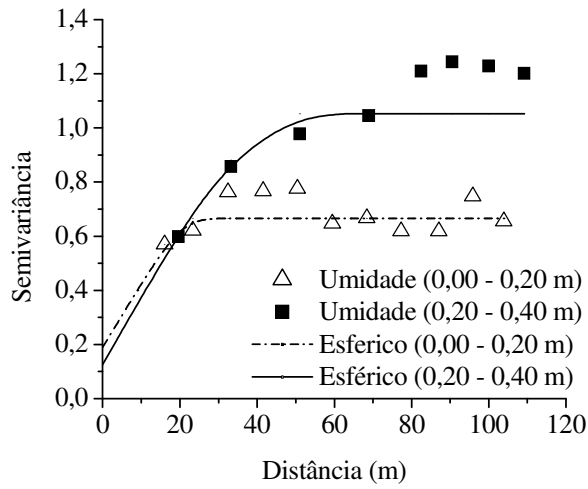
<sup>1</sup>Efeito pepita, <sup>2</sup>patamar, <sup>3</sup>alcance, <sup>4</sup>grau de dependência espacial =  $[C_0/(C_0+C_1)] \times 100$ , <sup>5</sup> exponencial, <sup>6</sup> esférico, <sup>7</sup> coeficiente de determinação, <sup>rt</sup> – retirada a tendência

A Ds (0,00 – 0,20 m) e a Pt (0,20 – 0,40 m) apresentaram os menores alcances: 21,185 e 20,73 m, respectivamente. Ao estudar um Argissolo Vermelho-amarelo eutrófico, Cruz et al. (2010) identificaram, para a Ds (0,00 – 0,20 m), alcance inferior ao do presente trabalho (Figura 4A). Segundo Carvalho et al. (2003), o conhecimento do alcance da dependência espacial permite o delineamento de futuras amostragens, assegurando as mesmas condições do estudo em questão.

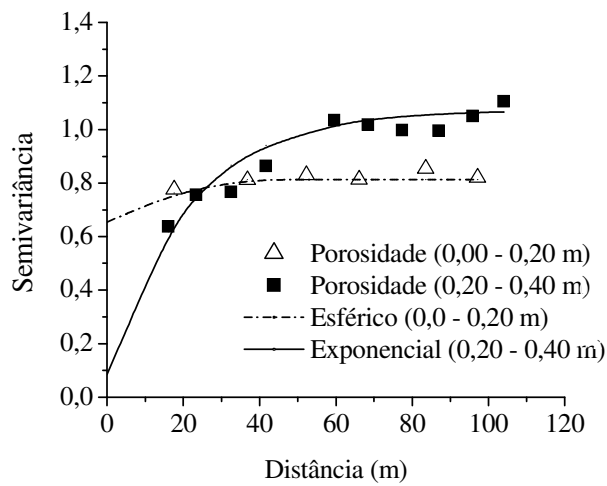
A.



B.

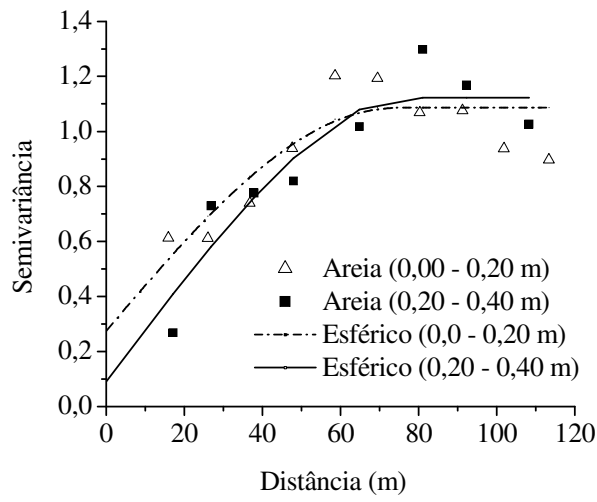


C.

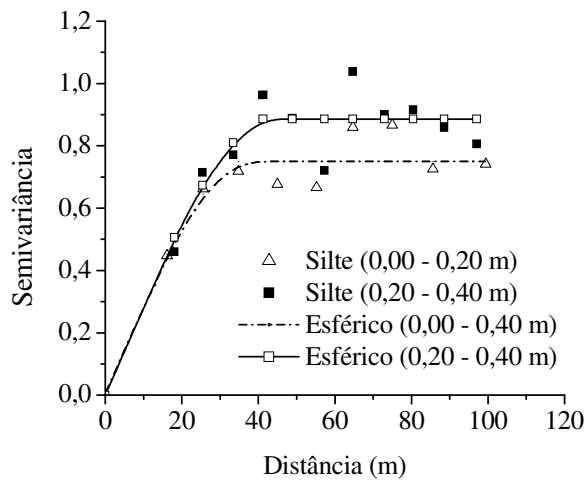


**Figura 4.** Semivariogramas dos parâmetros: densidade (A), umidade (B) e porosidade (C)

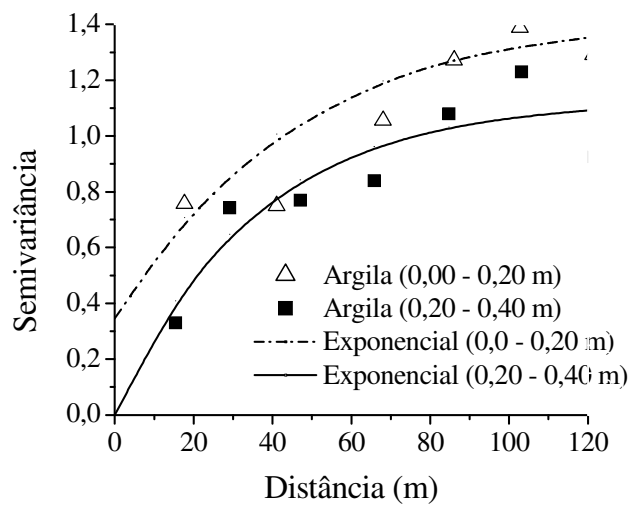
A.



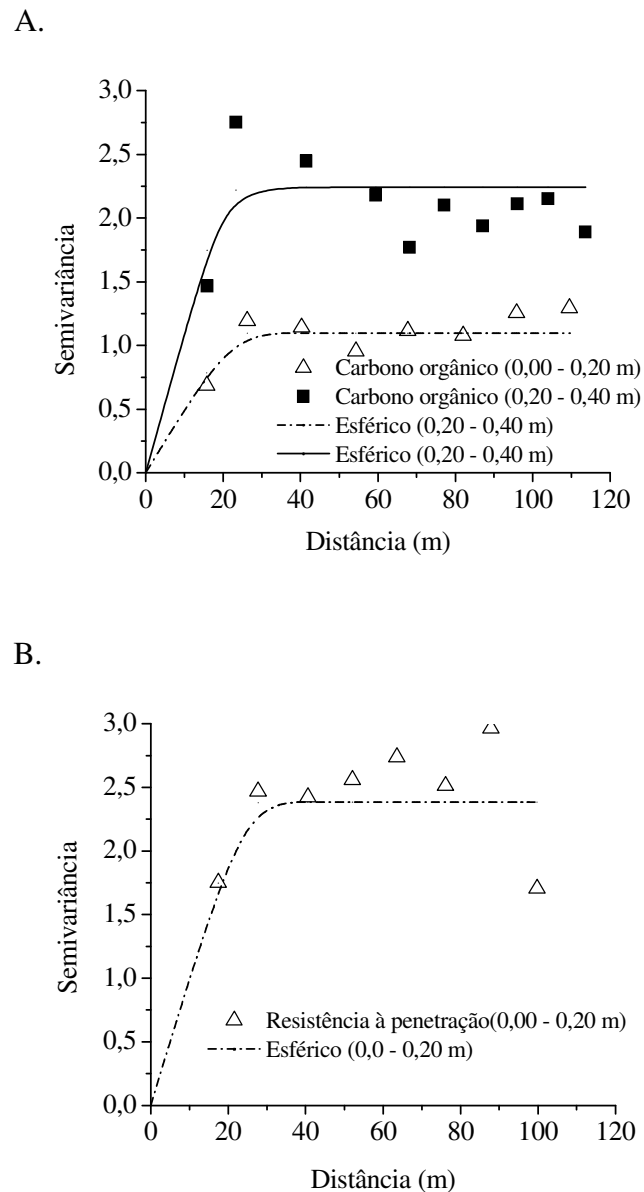
B.



C.



**Figura 5.** Semivariogramas dos atributos granulométricos do solo, areia (A), silte (B) e argila (C)



**Figura 6.** Semivariogramas do carbono orgânico (A) e RP (B)

Os modelos dos semivariogramas foram selecionados considerando-se os menores valores dos coeficientes da validação cruzada (Tabela 2). A maioria das variáveis ajustou-se ao modelo esférico, com ocorrência de modelo exponencial para as variáveis Ds e argila, na superfície (Figuras 4A e 5E) e Pt e argila na subsuperfície (Figuras 5F e 5F).

Pela observação da distribuição espacial das variáveis, pode-se verificar forte correlação inversa entre Ds e Pt (Figura 7), onde os maiores valores da Ds coincidiram com os menores da Pt. Uma leve semelhança pode ser percebida entre a Pt e a Ug, na profundidade 0,20 –0,40 m (Figuras 7F e 7D). Para a Ug, maiores valores de umidade

podem ser observados na segunda camada, no mesmo local do mapa.

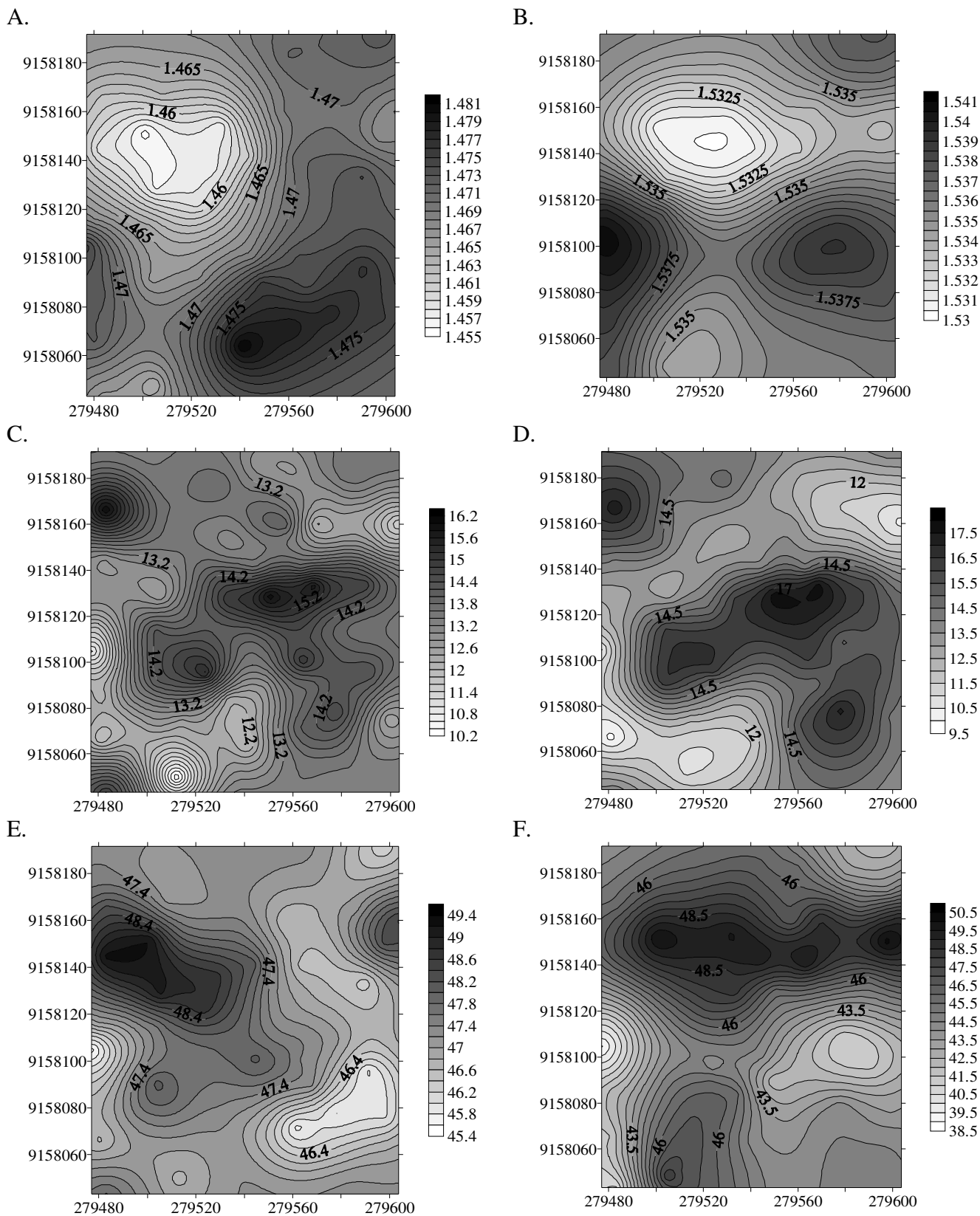
Pela distribuição dos mapas da Ds pode-se observar que na primeira e segunda profundidade a densidade apresentou valores acima de 1,46 e 1,53 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente, em mais de 50 % da área.

As distribuições da areia e argila (Figura 8A e B e 8E e F) apresentaram mapas distintos, principalmente na profundidade 0,20–0,40 m, com maior ocorrência de argila em áreas com menor teor de areia. Tais resultados são corroborados por Leão et al. (2010), que afirmam que o fluxo d'água, por ser dependente do relevo, mobiliza facilmente a argila e o silte em áreas preferenciais na profundidade 0,20-0,40 m. Neste sentido, pode-se verificar que a distribuição espacial da argila apresentou semelhança com a distribuição da Ug. As distribuições de silte ocorreram na área de forma semelhante a da argila na profundidade 0,20-0,40 m e pouco semelhantes na profundidade 0,00-0,20 m.

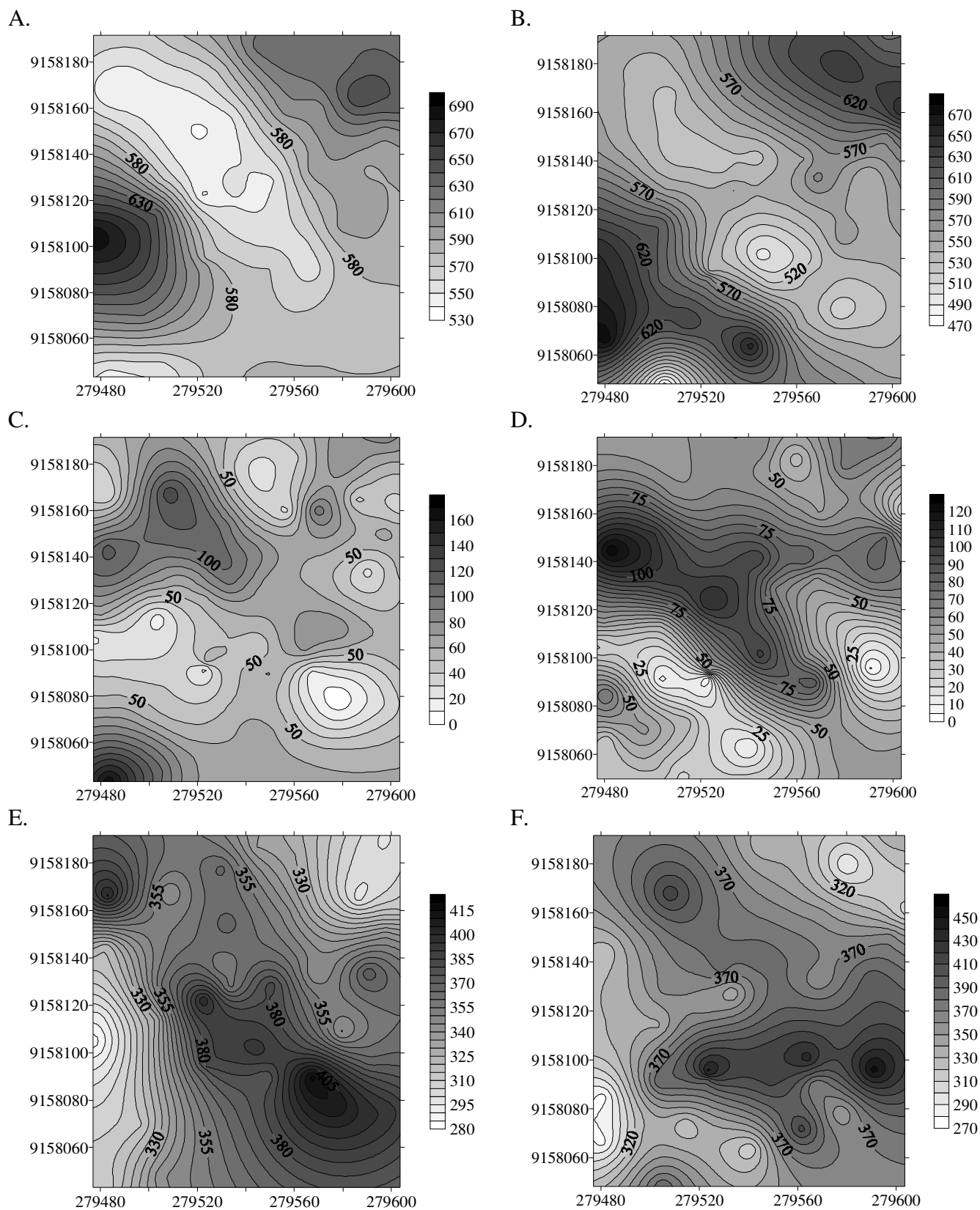
As semelhanças da distribuição espacial entre argila (Figura 8E) e CO (Figura 9A) podem ser observadas na profundidade 0,0-0,20 cm, cujos maiores valores de ambas as variáveis localizaram-se na parte inferior da área. De acordo Jenny (1961), os fatores de formação dos solos (material de origem, clima, relevo e microorganismos), podem afetar o acúmulo de carbono orgânico do mesmo. Após os processos de decomposição e oxidação dos resíduos vegetais e do carbono, respectivamente, o restante se torna matéria orgânica, a qual interage com a fração mineral do solo (De Bona, 2005).

A RP (Figura 9C) assemelhou-se à DS (Figura 7A), verificando-se a predominância de valores mais elevados de Ds na região inferior da área, coincidindo com pontos de maior RP. Também a RP apresentou valores elevados em mais da metade da área (2MPa).

Além disso, a argila é a fração mineral mais ativa para a formação de complexos organo-minerais devido a sua carga e a área superficial específica. A acumulação da matéria orgânica, devido à proteção física, ocorre pela positiva influência de agregação na formação de uma barreira entre ela e os microorganismos (Chenu, 2006).



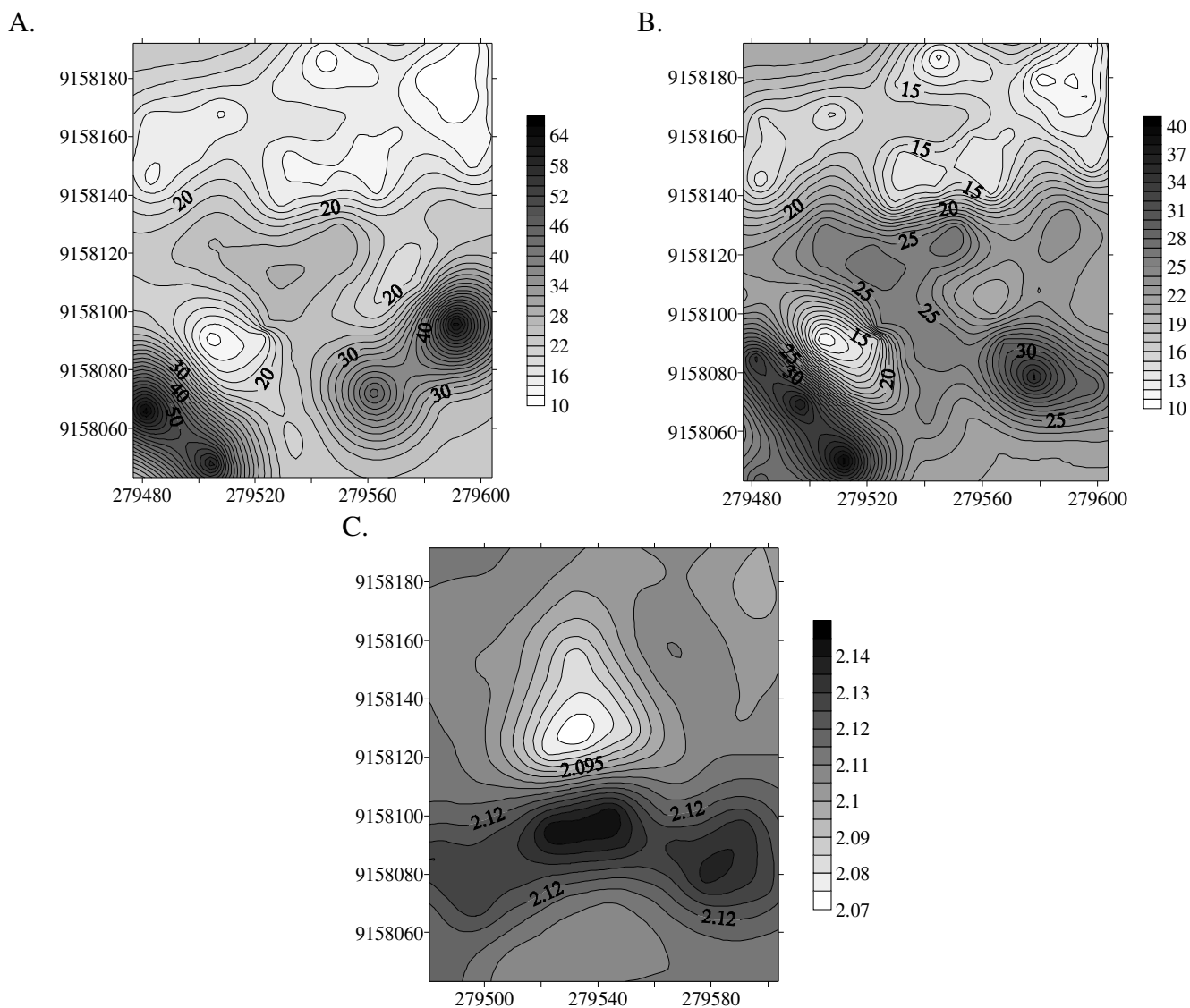
**Figura 7.** Mapas dos atributos densidade do solo (A) (0,0-0,2m), e (B) (0,2-0,4m), umidade (C) (0,0-0,2m), e (D) (0,2-0,4m), porosidade (E) (0,0-0,2m) e (F) (0,2-0,4m)



**Figura 8.** Mapas dos atributos areia (A) 0,0-0,2 m e (B) 0,2-0,4 m, silte (C) 0,0-0,2 m e (D) 0,2-0,4 m, argila (E) 0,0-0,2 m e (F) 0,2-0,4 m

A distribuição da argila foi identificada em áreas próximas a da RP (Figura 9C). Os maiores valores da resistência foram observados à direita e abaixo da área estudada.

Conforme Braida et al. (2010), a matéria orgânica e o carbono incidem fortemente na qualidade do solo, por atuarem na estabilidade de agregados e podem aumentar ou diminuir a resistência do solo, dependendo de seu efeito conjunto sobre a densidade, o cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação do solo.



**Figura 9.** Mapas carbono orgânico (A) 0,0-0,2 m e (B) 0,2-0,4 m, e resistência à penetração (C) 0,0-0,2 m

## CONCLUSÕES

1. Todas as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial, possibilitando seu mapeamento pelas técnicas estatísticas;
2. A partir de 21,19 e 20,73 m, as variáveis  $D_s$  e  $P_t$  não apresentam dependência espacial, devendo-se aplicar a estatística clássica.



3. Mais da metade da área apresentou densidade acima de 1,46 e 1,53 g cm<sup>-3</sup>, para as profundidades 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente.

4. Também em mais de 50% da área foi observada resistência à penetração acima de 2 MPa.

### **AGRADECIMENTOS**

Agradecimento à CAPES, pela concessão de bolsa de estudo à Uilka Elisa Tavares e à Usina Santa Teresa, pela disponibilidade da área de pesquisa.

### **LITERATURA CITADA**

Angulo Filho, R.; Vettorazzi, C. A.; Sarries, G. A. Exatidão de posicionamento de um receptor GPS, operando sob diferentes coberturas vegetais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, p.325-331, 2002.

Bologna-Campbell, I. Balanço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta- Piracicaba: ESALQ, 2007. 112p. Tese Doutorado

Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Veiga, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.131-139, 2010.

Braida, J.A. Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto. Santa Maria: UFSM, 2004. 107p. Tese Doutorado.

Cambardella, C. A.; Moorman, J. M.; Novak, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, p.1501-1511. 1994.

Correa, M. M.; Ker, J. C.; Barron, V.; Fontes, M. P. F.; Torrent, J.; Curi, N. Caracterização de óxidos de ferro de solos do ambiente Tabuleiros Costeiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.3, p.1017-1031, 2008.

Cruz, J. S.; Assis Junior, R. N.; Matias, S. S. R.; Camacho-Tamayo, J. H.; Tavares, R. C. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo Vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agrotécnica*, v.34, p.271-278, 2010.

- De Bona, F. D. Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional. Porto Alegre: UFRGS, 2005, 130p. Dissertação Mestrado.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.
- Englund, E.; Sparks, A. GeoEAS (Geostatistical Environmental Assessment Software) Las Vegas: U.S. Environmental Protection Agency, 1991. (EPA/600/4- 88/033a).
- Giarola, N. F. B.; Silva, A. P.; Tormena, C. L. S.; Souza; Ribeiro, L. P. Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento Hardsetting: estudo de caso. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.25, p.239-247, 2001.
- Golden Software. Surfer 7.0 - user's guide. New York: Golden Software, 1999. 619 p.
- Gomes, N. M.; Silva, A. M., Mello, C. R.; Faria, M. A.; Oliveira, P. M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.31, p.435-443, 2007.
- 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, p.169-177, 2005.
- Guimarães, C. M.; Moreira, J. A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.36, p.703-707, 2001.
- Guimarães, R. M. L.; Goncalves, A. C. A.; Tormena, C. A.; Folegatti, M. V.; Blainsk, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. Engenharia Agrícola, v.30, p.657-669, 2010.
- Hoaglin, D. C.; Mosteller, F.; Tukey, J. W. Análise exploratória de dados: técnicas robustas, um guia. Lisboa: Editora Salamandra, 1992. 446p.
- JENNY, H., Factors of soil formation: Missouri Agricultura Experimental Station Research Bulletin, p.5-31, 1961.
- Leão, M. G. A; Marques Júnior, J.; Souza, Z. M.; Pereira, G. T. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo sob cultivo de citros. Revista Ciência Agrotécnica, v.34, p.121-131, 2010.
- Lima Neto, J. A.; Ribeiro, M. R.; Correa, M. M.; Souza Junior, V. S.; Lima, M. F. W. F.; Ferreira, R. F. A. L. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos

- Amarelos e Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.1001-1011, 2009.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Vasconcelos, R. F. B.; Pedrosa, E. M. R.. Distribuição de agregados e carbono orgânico em um Argissolo Amarelo distrocoeso em diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.907–913, 2010.
- Silva, A. J. N; Cabeda, M. S. V. Modificações na matriz de um Argissolo Amarelo coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.554–562, 2006.
- Simões, W. L.; Silva, E. L.; Lima, D. M.; Oliveira, M. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico, submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.1061-1068, 2006.
- Siqueira, D. S.; Marques JR, J.; Pereira, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. *Geoderma*, v.155, p.55-66, 2010.
- Souza, Z. M.; Marques Junior, J.; Pereira, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, v.40, p.48-56, 2010.
- Tormena, C. A.; Barbosa, M. C.; Costa, A. C. S.; Gonçalves, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Ciência Agrícola*, v.59, p.795-801, 2002.
- Vauclin, S. R.; Vieira, G.; Nielsen, D. R. The use of cokriging with limited field soil observations. *Soil Science Society American Journal*, v.47, p.175-184, 1983.
- Vieira, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez,V.H.; Schaefer, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v.1. p.1-54, 2000.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D., ed. *Application of soil physics*, p.319-324, 1980.

## **CAPÍTULO III**

## **Variabilidade espacial da compactação e do carbono orgânico e relações entre atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar**

**Resumo:** Objetivou-se neste trabalho estudar a relação linear e espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo Coeso cultivado com cana-de-açúcar. 49 pontos georreferenciados foram estabelecidos para a retirada de amostras, com 7 pontos e 7 fileiras, formando malha de 120 × 120 m. As trincheiras foram abertas em duas profundidades (0-20 e 20-40 cm) para a coleta das amostras deformadas e indeformadas. A distribuição normal foi verificada em todas as variáveis estudadas. Também foi observado forte grau de dependência espacial para a maioria das variáveis. O limite de plasticidade apresentou efeito pepita puro. Os maiores alcances encontrados foram para o grau de compactação (nas duas profundidades) e os menores para densidade (0-20 cm) e a porosidade (0-20 cm). Os mapas de krigagem apontaram correlação inversa entre densidade e porosidade e forte semelhança entre argila e carbono orgânico como também entre a argila e os limites de consistência. Para a maioria das variáveis, houve dependência espacial até 20 m, indicando que para análises paramétricas as amostras devem ser coletadas em distâncias superiores a 20 m.

**Palavras-chave:** Proctor, limites de consistência, dependência espacial

### **Linear and spatial correlation between physical, mechanical and biological attributes of an Argissolo under sugarcane cultivation**

**Abstract:** The purpose of this study was to evaluate the linear and spatial relation of physical, mechanical and biological attributes of a Cohesive Argissol cultivated with sugarcane. 49 georeferenced points were established for the collection of samples, with 7 points and 7 rows, forming a mesh of 120 × 120 m. The trenches were opened at two depths (0-20 and 20-40 cm) for the collection of disturbed and undisturbed samples. The normal distribution was observed in all variables studied. It was also observed strong degree of spatial dependence for most variables. The plastic limit showed nugget effect. The highest range were found for the degree of compression (at both depths) and lowest

for density (0-20 cm) and porosity (0-20 cm). Kriging maps showed an inverse correlation between density and porosity and strong similarity between clay and organic carbon as well as between the clay and the limits of consistence. For most variables, there was spatial dependence up to 20 m, indicating that for parametric analysis samples should be collected at distances over 20 m.

**Key-words:** Proctor, consistence limits and spatial dependence

## INTRODUÇÃO

A produção brasileira de cana-de-açúcar para a safra 2010/2011 foi de 174.787.416 ton, sendo 976.551 ton a parcela de produção referente ao Norte e Nordeste; desse total o Estado de Pernambuco é o segundo maior produtor, contribuindo com 26,8% da produção dessa região MAPA (2011a). Para o IBGE (2010), em 2009, a cana-de-açúcar atingiu a maior participação na matriz energética brasileira, desde o início do levantamento, em 1992. Dada a sua importância econômica a cana-de-açúcar é atualmente, considerada uma commodity (Farias, 2009) valorizada pela capacidade que tem de gerar energia limpa e renovável e de substituir parte da matriz energética global, atualmente centrada na utilização de combustíveis hidrocarbonetos de origem fóssil.

Uma parcela das áreas cultivadas com cana-de-açúcar em Pernambuco é de Tabuleiros Costeiros; que alguns dos solos podem ser classificados como coesos, devido a condições climáticas e ao relevo, constituído pelo Grupo Barreiras, que favorecem a formação dos horizontes coesos. Os horizontes coesos apresentam consistência dura a muito dura, quando seco, e friável quando úmido. Porém, todos os solos da região de Tabuleiros possuem fortes limitações agrícolas, por apresentarem baixa fertilidade e baixa reserva de nutrientes.

Além das propriedades intrínsecas do solo, a mecanização do preparo do solo por meio de tratores e subsoladores bem como na colheita na maioria das vezes em condições inadequadas de umidade pode influenciar negativamente a qualidade do solo causando o aumento da densidade do solo, a aproximação das partículas sólidas entre si, e a redução da macroporosidade (Canillas & Salokhe, 2002; Severiano et al., 2010), sem praticamente alterar a microporosidade (Dias Junior & Pierce, 1996), levando o solo a apresentar problemas de compactação.

Dessa forma a susceptibilidade do solo à compactação é função da estrutura física e características químicas, os quais podem ser influenciados pela matéria orgânica (Braida et al., 2010). A redução da matéria orgânica do solo em razão do cultivo pode reduzir a umidade ótima de compactação aumentando, assim, os riscos à compactação, pois os solos podem atingir a compactação máxima, mesmo quando trabalhados sob baixos teores de água (Silva et al., 2006a). Assim, Silva et al., 2006b em pesquisa realizada sobre a ação da matéria orgânica nas propriedades físicas de um Argissolo Amarelo coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar, observou-se que o cultivo da cana reduziu o carbono orgânico total e a matéria orgânica em comparação com a área de mata nativa, além de observarem que os sistemas de sequeiro e irrigado apresentaram menores valores de umidade ótima de compactação.

A matéria orgânica pode ainda aumentar a faixa de friabilidade do solo, isto é, a faixa que compreende os limites de contração e plasticidade, que corresponde a umidade ideal para o preparo do solo (Silva et al., 2006b). Alterações nos limites de consistência do solo em razão das modificações nos teores de carbono orgânico também podem ser observada por outros autores (Nettleton & Brasher, 1983), que constatou que o aumento da matéria orgânica tende a aumentar a área superficial específica do solo, o que proporciona maior retenção de água, levando-o a ter maiores valores para os limites de plasticidade do solo. Desta forma, os solos cultivados podem ter sua faixa de friabilidade reduzida devido a baixa na concentração de matéria orgânica, contribuindo para o aumento da compactação.

Foi observado que o aumento do teor de matéria orgânica, pela adição de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar, proporcionou menor degradação dos atributos físicos e químicos do solo, provocando uma elevação dos limites de consistência do solo e redução do risco de deformação plástica, de um Latossolo Amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar (Vasconcelos et al., 2010).

Assim, Miranda et al. (2007), ao estudarem a compactação do solo em área de cana-de-açúcar, sugerem que se faça um levantamento completo das propriedades e características desse solo e que sua variabilidade espacial, através do uso da geoestatística, seja estimada, quantificando a dependência espacial entre o campo e as amostras para se obter mapas de tráfego agrícola em função das variáveis estudadas. Estes estudos são essenciais para o desenvolvimento de planos de amostragem, com vistas à aplicação em programas de manejo integrado.

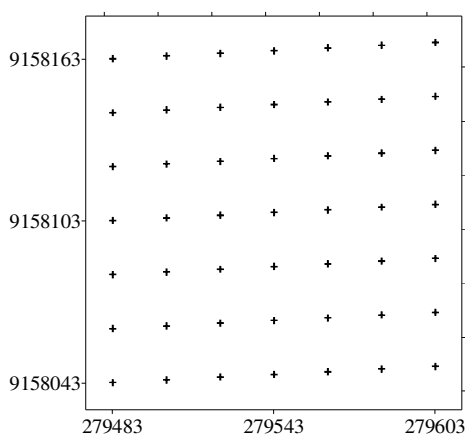
Desta forma, o presente trabalho objetivou estudar a relação linear e espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo Coeso cultivado com cana-de-açúcar.

## MATÉRIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em um Argissolo Coeso, situado na Usina Santa Tereza, Goiana, PE, localizada na mesorregião mata e na microrregião mata Setentrional do Estado de Pernambuco, próximo as coordenadas 7° 33' 38 de latitude sul e 35° 00' 09 de longitude oeste. A área é tropical úmido do tipo As' ou pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, com temperaturas médias anuais variando em torno de 24°C, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger.

A cana-de-açúcar cultivada na área é da variedade RB 92579, que vem sendo fertirrigada com vinhaça há 7 anos. O corte é feito manualmente e o manejo do solo é o convencional com emprego de grade pesada e média, além de subsolador e sulcador.

Coletaram-se 49 amostras de solo deformadas (textura, densidade das partículas, densidade seca máxima e umidade crítica, limites de consistência, e carbono orgânico) e indeformada (densidade do solo, umidade gravimétrica), distantes 20 m entre si, em uma malha quadrada (Figura 10) na profundidade 0-20 e 20-40 cm.



**Figura 10.** Croqui da área experimental

As coletas foram realizadas no período de maio a novembro de 2010, nos dias de menor pluviosidade. O corte da cana na área escolhida ocorreu no período de dezembro de 2010.



A densidade do solo ( $D_s$ ) foi determinada pela relação entre a massa do solo seco em estufa e o volume do anel usado no amostrador de Uhland; e a umidade gravimétrica ( $U_g$ ) obtida pela relação entre a massa de água existente no solo e a massa seca (EMBRAPA, 1997).

Determinou-se a densidade das partículas através do balão volumétrico de 50 ml, utilizando a terra fina seca na estufa (TFSE) a 105°C e álcool etílico absoluto. Os resultados foram expressos em  $g\ m^{-3}$  de volume das partículas.

A porosidade total ( $P_t$ ) foi calculada a partir dos valores da densidade do solo e densidade das partículas, expressa em percentagem, segundo EMBRAPA (1997).

A granulometria foi determinada através do método do densímetro de Boyoucos, em que se utilizou como dispersante a solução de calgon (hexametáfosfato de sódio). Foram realizadas as determinações quantitativas das frações de argila ( $< 0,002$  mm), silte (0,002 - 0,05 mm), e areia (0,05 - 0,2 mm), expressas em  $g\ kg^{-1}$ . O carbono orgânico (CO) foi determinado por via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico (EMBRAPA, 1997).

O ensaio Proctor Normal foi realizado (ABNT, 1986) com o uso de um cilindro de Proctor para obtenção da densidade seca máxima de compactação ( $D_{smax}$ ) e da umidade crítica ( $U_{crit}$ ).

O limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) foram determinados conforme a ABNT (1984a) e ABNT (1984b), respectivamente, e o índice de plasticidade (IP) obtido pela sua diferença. O grau de compactação (GC) foi determinado pela relação entre a densidade do solo ( $D_s$ ) e a densidade seca máxima de compactação ( $D_{smax}$ ), obtida pelo ensaio de Proctor Normal.

Através dos dados obtidos foi efetuada a estatística descritiva dos dados bem como o estudo de correlações simples entre algumas variáveis, utilizando o software Statistica (Golden Software, 1999).

A hipótese de normalidade foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, por meio de planilha eletrônica Excel. O critério de Hoaglin (Hoaglin et al., 1992) foi aplicado para a remoção de valores discrepantes, que na maioria das vezes, são indicativos de erro na leitura dos valores das variáveis (Guimarães et al., 2010).

O grau de variabilidade foi estimado pelo coeficiente de variação (CV) dos atributos, conforme sugerido por Warrick & Nielsen (1980), os quais consideram baixa variabilidade quando  $CV < 12\%$ ; média para o intervalo 12-60% e alta variabilidade

quando  $CV > 60\%$ .

A dependência espacial foi avaliada pelo ajuste do semivariograma (Vieira, 2000), considerando a pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca, por meio do programa Geoeas (Englund & Sparks, 1991). Para os modelos de semivariogramas que não apresentaram patamar definido, indicativo de não-estacionaridade, retirou-se a tendência dos dados com o auxílio do software Surfer 7.0 (Golden Software, 1999).

A análise do grau de dependência espacial (GDE) foi realizada segundo Cambardella et al. (1994), que recomenda a proporção em porcentagem do efeito pepita ( $C_0$ ) em relação ao patamar ( $C_0+C_1$ ) e apresenta: (a) dependência forte  $< 25\%$ ; (b) dependência moderada entre 25 e 75% e (c) dependência fraca  $> 75\%$ . Foram gerados os mapas de isolinhas pelo software Surfer 7.0 (Golden Software, 1999).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados mostrou que os coeficientes de assimetria e curtose estão próximos de zero, indicando que as variáveis apresentam distribuição próxima à normal (Tabela 3). O coeficiente de variação (CV) expressa a precisão de um experimento, possibilitando verificar a acurácia dos métodos de amostragem de atributos físicos do solo (Siqueira et al., 2008). Todas as variáveis foram bem representadas pelo CV, com exceção do silte nas duas profundidades.

Pode-se verificar (Tabela 3) que as médias da densidade do solo, umidade, argila, umidade crítica, os limites de consistência e GC apresentaram maiores valores na profundidade 20-40 cm, o que indica que o GC pode estar sendo influenciado especificamente por essas variáveis.

Pela observação das médias, pode-se constatar que os limites de consistência aumentaram com a profundidade; o mesmo foi observado por Vasconcelos et al. (2009), devido, provavelmente, ao aumento do teor de argila no solo (Tabela 3), compensando, de certo modo, a redução da matéria orgânica com o aumento da profundidade.

A média da  $U_{gcrit}$  de compactação foi menor do que o valor do LP, fato também observado por Figueiredo et al. (2000), que sugerem, que se evite trafegar com máquinas quando a umidade do solo for aproximadamente igual ao limite de plasticidade, visto que a  $U_{gcrit}$  está contida na faixa de umidade onde o tráfego de máquinas é realizado.

**Tabela 3.** Medidas descritivas dos dados de densidade ( $\text{g cm}^{-3}$ ) e umidade do solo (%), porosidade total (%), areia, silte e argila (em  $\text{g kg}^{-1}$ ), carbono orgânico ( $\text{g kg}^{-1}$ ), densidade seca máxima ( $\text{g cm}^{-3}$ ), umidade crítica (%), limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade (em %) e grau de compactação (%)

| Parâmetros       | <sup>1</sup> Ds | <sup>2</sup> Ug | <sup>3</sup> Pt | <sup>4</sup> LL | <sup>5</sup> LP | <sup>6</sup> IP | <sup>7</sup> Dsmax | <sup>8</sup> Ugcrit | <sup>9</sup> GC | <sup>10</sup> CO | Areia  | Silte | Argila |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|---------------------|-----------------|------------------|--------|-------|--------|
| 0-20 cm          |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                    |                     |                 |                  |        |       |        |
| Média            | 1,47            | 13,42           | 47,43           | 25,88           | 21,84           | 4,06            | 1,75               | 14,77               | 83,78           | 20,33            | 587,77 | 60,68 | 351,55 |
| Mediana          | 1,49            | 13,42           | 47,67           | 26,00           | 22,00           | 4,00            | 1,75               | 14,76               | 83,70           | 20,24            | 580,20 | 62,00 | 353,20 |
| <sup>11</sup> DP | 0,16            | 2,25            | 5,27            | 0,53            | 0,37            | 0,47            | 0,03               | 1,50                | 8,78            | 8,14             | 50,07  | 35,81 | 48,39  |
| Curtose          | 0,20            | 0,11            | -0,67           | 22,02           | 1,60            | 7,95            | -0,51              | -0,40               | -0,07           | -0,33            | 0,02   | 0,94  | -0,58  |
| Assimetria       | 0,23            | 0,03            | -0,07           | -4,64           | -1,88           | -1,01           | 0,35               | -0,19               | 0,25            | 0,67             | 0,64   | 0,76  | 0,34   |
| Mínimo           | 1,35            | 11,82           | 43,39           | 26,00           | 22,00           | 4,00            | 1,73               | 13,97               | 76,38           | 13,35            | 548,40 | 35,16 | 316,00 |
| Máximo           | 1,56            | 14,82           | 51,66           | 26,00           | 22,00           | 4,00            | 1,77               | 15,72               | 89,43           | 25,67            | 625,20 | 85,64 | 383,20 |
| <sup>12</sup> CV | 0,11            | 0,17            | 0,11            | 0,02            | 0,02            | 0,12            | 0,02               | 0,10                | 0,10            | 0,40             | 0,09   | 0,59  | 0,14   |
| <sup>13</sup> d  | 0,07            | 0,04            | 0,07            | 0,51*           | 0,48*           | 0,41*           | 0,07               | 0,05                | 0,06            | 0,01             | 0,12   | 0,07  | 0,06   |
| 20-40 cm         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                    |                     |                 |                  |        |       |        |
| Média            | 1,54            | 13,86           | 45,27           | 26,06           | 21,88           | 4,20            | 1,74               | 15,64               | 88,08           | 13,87            | 571,84 | 58,93 | 363,45 |
| Mediana          | 1,54            | 13,88           | 44,89           | 26,00           | 22,00           | 4,00            | 1,74               | 15,68               | 87,73           | 14,17            | 555,60 | 59,20 | 364,28 |
| <sup>11</sup> DP | 0,15            | 2,48            | 4,44            | 0,32            | 0,39            | 0,54            | 0,04               | 1,27                | 8,83            | 3,30             | 57,74  | 30,19 | 44,23  |
| Curtose          | 0,01            | -0,51           | -0,22           | 31,76           | 2,73            | 4,00            | -0,69              | 0,16                | -0,06           | -0,82            | -0,57  | -0,65 | -0,41  |
| Assimetria       | -0,19           | 0,22            | 0,15            | 5,54            | -1,20           | 1,81            | 0,74               | -0,91               | -0,04           | -0,19            | 0,27   | -0,04 | 0,02   |
| Mínimo           | 1,46            | 11,93           | 42,32           | 26,00           | 22,00           | 4,00            | 1,72               | 15,26               | 84,09           | 11,36            | 531,00 | 37,20 | 332,12 |
| Máximo           | 1,65            | 15,57           | 47,99           | 26,00           | 22,00           | 4,00            | 1,77               | 16,85               | 94,15           | 16,27            | 617,50 | 80,24 | 393,48 |
| <sup>12</sup> CV | 0,09            | 0,18            | 0,10            | 0,01            | 0,02            | 0,13            | 0,02               | 0,08                | 0,10            | 0,24             | 0,10   | 0,51  | 0,12   |
| <sup>13</sup> d  | 0,05            | 0,08            | 0,08            | 0,51*           | 0,46*           | 0,44*           | 0,15               | 0,12                | 0,09            | 0,06             | 0,11   | 0,06  | 0,05   |

<sup>1</sup> Densidade do solo; <sup>2</sup> teor de água; <sup>3</sup> porosidade total; <sup>4</sup> limite de liquidez; <sup>5</sup> limite de plasticidade; <sup>6</sup> índice de plasticidade; <sup>7</sup> densidade seca máxima; <sup>8</sup> umidade crítica; <sup>9</sup> grau de compactação; <sup>10</sup> carbono orgânico; <sup>11</sup> desvio padrão; <sup>12</sup> coeficiente de variação; <sup>13</sup> estatística de Kolmogorov-Smirnov, significativo a 5% de probabilidade; \* Não significativo a 5% de probabilidade do teste K-S

Segundo Ojeniyi & Dexter (1979), a umidade do solo que afeta os trabalhos com máquinas agrícolas está próxima a 90% do limite de plasticidade. Observando os valores da Ugcrit nas duas profundidades, verifica-se que estão pouco abaixo dos valores de umidade igual a 90% do limite de plasticidade (19,65 e 19,68%, respectivamente).

O CO apresentou maior valor médio na camada 0-20 cm do solo. A diminuição do CO com o aumento da profundidade também foi observada por Kato et al. (2010), ao estudar a variabilidade espacial do carbono e outros atributos do solo em uma área destinada ao reflorestamento; tal comportamento é devido à deposição de resíduos vegetais na superfície do solo.

Segundo Camargo et al. (1985), pode-se afirmar que a densidade do solo é a medida

quantitativa que melhor representa o estado de compactação. Os valores encontrados, Tabela 1, apresentaram valores de 1,47 e 1,54 kg dm<sup>-3</sup> para a profundidade 0-20 e 20-40 cm, respectivamente; os valores são considerados altos, já Arshad et al. (1996) constataram que valores acima de 1,4 kg dm<sup>-3</sup> são limitantes ao crescimento radicular; porém, Siqueira et al. (2008) apontam que não há um consenso quanto ao valor crítico da densidade do solo.

O maior teor de areia foi encontrado na camada 0-20 cm do solo; visto que as areias tendem a alcançar maiores valores de densidade máxima (D<sub>smax</sub>) pelo ensaio de Proctor normal, a diferença entre a D<sub>smax</sub> nas duas profundidades foi pequena (Tabela 1); fato atribuído, provavelmente, a influência do CO e do teor de argila.

Houve modificação textural do solo pela mobilidade da argila para a profundidade 20-40 cm, que segundo Silva & Cabeda (2006), pode ser causada por processos naturais, provocando o adensamento dessa faixa e também devido à ação antrópica na área; ainda segundo esses autores, ao estudar um Argissolo Amarelo coeso cultivado com cana-de-açúcar, verificaram que o cultivo da cana alterou a organização da matriz do solo num arranjo mais compacto em áreas cultivadas sob sequeiro, irrigado e vinhaça, em relação a área de mata.

A média do limite de liquidez aumentou com a profundidade e o mesmo ocorreu com o teor de argila. Kondo & Dias Junior (1999) afirmam que maiores teores de argila tendem a aumentar os valores de limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), proporcionado pelo aumento da capacidade de adsorção de água.

O grau de compactação da área estudada apresentou valores semelhantes aos encontrados por Oliveria et al. (2010a) nas duas profundidades (0-20 e 20-40 cm). Na profundidade 20-40 cm, o GC alcançou média de 88%, valor acima daquele estipulado por Linstrom & Voorhess (1994) como prejudicial ao desenvolvimento e rendimento das culturas (86%). Oliveira et al. (2010) verificaram que o manejo e o tráfego são os principais responsáveis pelo alto valor do GC. Segundo Silva & Cabeda (2006), a capacidade de suporte do solo pode ocorrer devido a um alto grau de compactação ou quando o solo está com uma boa estabilidade estrutural.

Com base na validação cruzada, foram selecionados os modelos de semivariogramas que melhor se ajustaram a distribuição das semivariâncias (Tabela 4). Ao modelo exponencial ajustaram-se as variáveis D<sub>s</sub>, LL, IP, na camada 0-20 cm e Pt, U<sub>g</sub>crit, na camada 20-40 cm. As demais variáveis ajustaram-se ao modelo esférico. Os

semivariogramas escalonados podem ser observados nas Figuras 11 e 12. Os semivariogramas apresentados indicam estacionaridade de ordem 2 para a respectiva variável, pois cada um apresenta patamar claro e bem definido.

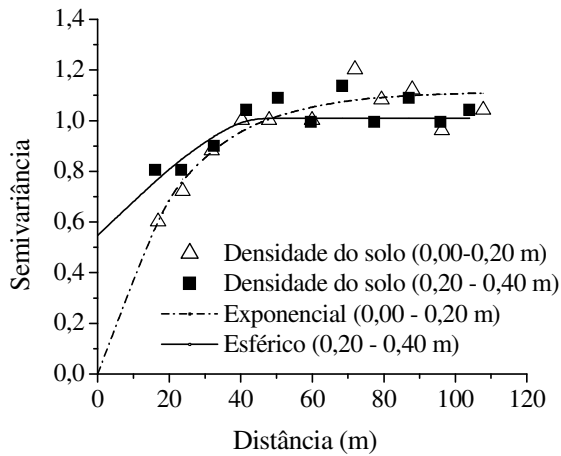
O GDE evidenciou que existe média e forte dependência para a maioria das variáveis (Tabela 4), o que indica que tais variáveis não são aleatórias no espaço. Segundo Cambardella et al. (1994), variáveis que apresentam forte grau de dependência são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo. A porosidade, na camada 0-20 cm, foi a única a apresentar fraca dependência.

**Tabela 4.** Modelos, parâmetros dos semivariogramas experimentais e validação cruzada para a variável densidade do solo, teor de água, porosidade total, limites de consistência, densidade seca máxima, umidade crítica, grau de compactação e carbono orgânico

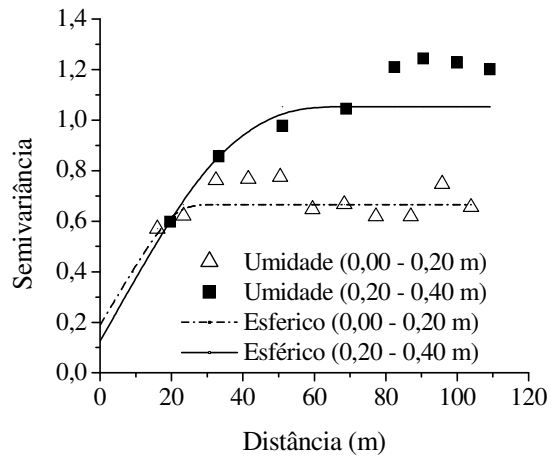
| Variáveis                   | Ds               | Ug                 | Pt    | LL    | LP               | IP    | Dsmax  | Ugcrit            | GC     | CO                |
|-----------------------------|------------------|--------------------|-------|-------|------------------|-------|--------|-------------------|--------|-------------------|
| 0-20 cm                     |                  |                    |       |       |                  |       |        |                   |        |                   |
| <sup>1</sup> C <sub>0</sub> | 1,E-5            | 0,19               | 0,67  | 0,34  | <sup>4</sup> Epp | 0,26  | 8,E-4  | 0,04              | 0,60   | 1,E-6             |
| <sup>2</sup> C <sub>1</sub> | 1,08             | 0,5                | 0,16  | 1,61  |                  | 1,31  | 1,12   | 0,34              | 1,06   | 1,14              |
| <sup>3</sup> a              | 21,19            | 27,79              | 35,26 | 49    |                  | 20,6  | 98,4   | 56,7              | 109,36 | 31,44             |
| Modelo                      | <sup>5</sup> Exp | 6Esf <sup>rt</sup> | Esf   | Exp   |                  | Exp   | Esf    | Esf <sup>rt</sup> | esf    | Esf <sup>rt</sup> |
| <sup>7</sup> GDE            | 9,E-4            | 27,62              | 80,51 | 17,28 |                  | 16,48 | 0,07   | 11,11             | 36,32  | 1,E-4             |
| Média                       | -0,03            | 0,02               | 0,05  | 0,023 |                  | 0,067 | -0,008 | -0,001            | -0,02  | -0,03             |
| DP                          | 0,94             | 1,19               | 1,08  | 0,859 |                  | 0,753 | 1,107  | 0,99              | 1,16   | 1,3               |
| <sup>8</sup> R <sup>2</sup> | 0,7              | 0,68               | 0,36  | 0,58  |                  | 0,36  | 0,8    | 0,81              | 0,93   | 0,64              |
| 20-40 cm                    |                  |                    |       |       |                  |       |        |                   |        |                   |
| C <sub>0</sub>              | 0,55             | 0,13               | 0,09  | 4,E-5 | 8,E-7            | 0,41  | 2,E-3  | 0,16              | 0,53   | 1,E-5             |
| C <sub>1</sub>              | 0,5              | 0,93               | 0,99  | 0,97  | 0,92             | 0,90  | 8,E-1  | 1,08              | 1,09   | 2,32              |
| a                           | 55,72            | 53,43              | 20,73 | 39    | 30,04            | 38,26 | 37,6   | 29,78             | 67,63  | 28,32             |
| Modelo                      | Esf              | Esf                | Exp   | Esf   | esf              | esf   | esf    | exp               | esf    | Esf <sup>rt</sup> |
| GDE                         | 52,38            | 12,2               | 8,33  | 4,E-3 | 8,E-5            | 31,29 | 0,24   | 12,90             | 32,72  | 4,E-4             |
| Média                       | -0,03            | -0,03              | 0,06  | -0,03 | -0,03            | 0,02  | 0      | 0,01              | -0,02  | -0,06             |
| DP                          | 1,05             | 1,17               | 0,92  | 1,24  | 0,98             | 0,96  | 0,77   | 0,65              | 1,08   | 1,32              |
| R <sup>2</sup>              | 0,92             | 0,64               | 0,77  | 0,49  | 0,45             | 0,73  | 0,53   | 0,78              | 0,77   | 0,14              |

<sup>1</sup>Efeito pepita, <sup>2</sup>patamar, <sup>3</sup>alcance, <sup>4</sup>efeito pepita puro, <sup>5</sup> exponencial, <sup>6</sup>esférico, <sup>7</sup> grau de dependência espacial =  $[C_0/(C_0+C_1)] \times 100$ , <sup>8</sup>coeficiente de determinação, <sup>rt</sup> – retirada a tendência

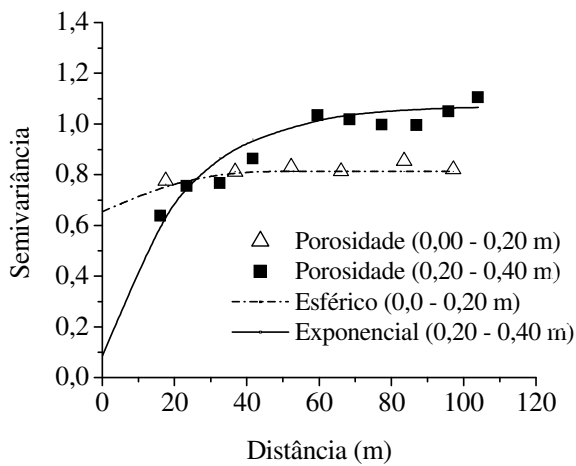
A.



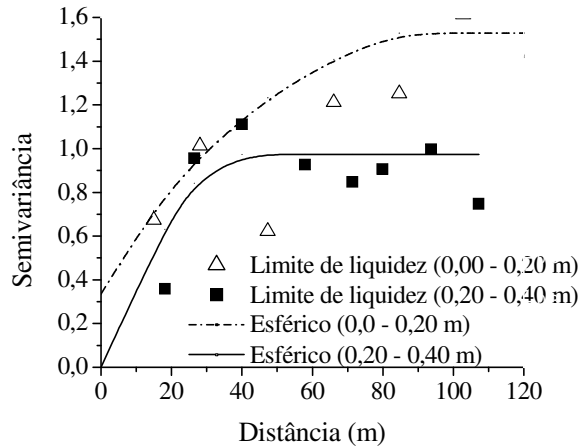
B.



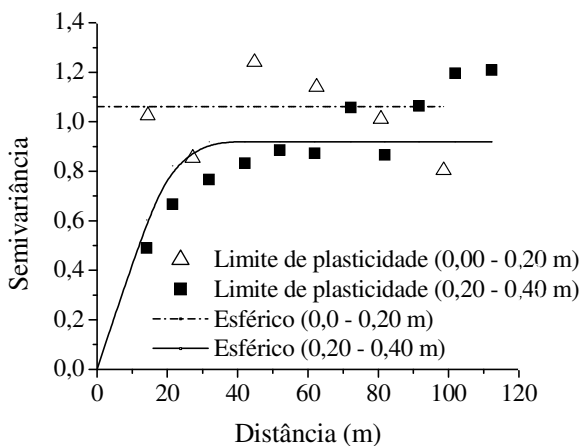
C.



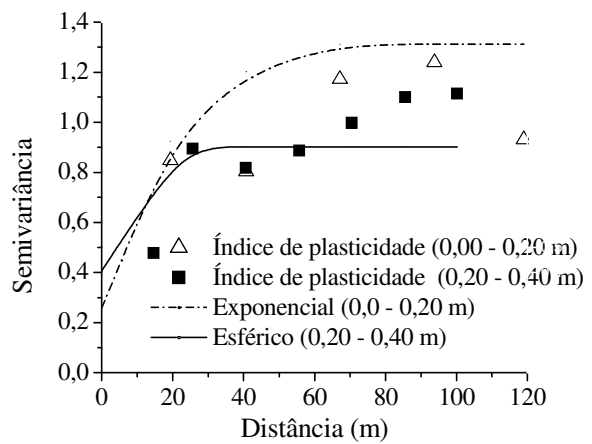
D.



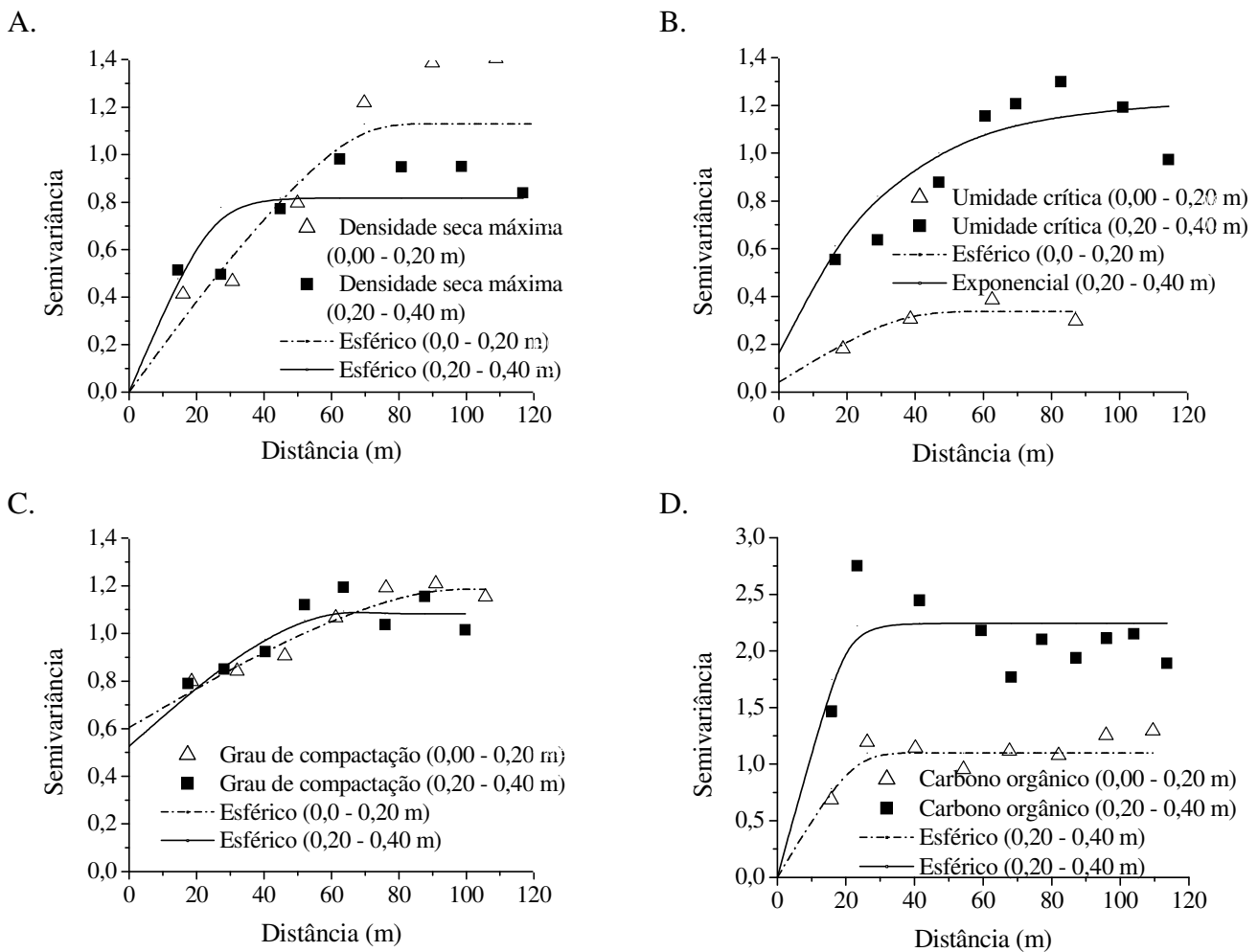
E.



F.



**Figura 11.** Semivariogramas dos parâmetros: densidade (A), umidade (B), porosidade (C), Limite de liquidez (D), limite de plasticidade (E) e índice de plasticidade (F)



**Figura 12.** Semivariogramas Densidade seca máxima (A), Umidade crítica (B), grau de compactação (C) e Carbono orgânico (D)

O LP na camada 0-20 cm (Figura 11E) apresentou efeito pepita puro, que é a ausência de dependência espacial, devido a impossibilidade de se ajustar um modelo de semivariograma para tais variáveis. O efeito pepita puro pode estar relacionado a um erro analítico ou a variações não detectadas, com base na distância de amostragem utilizada (Cambardella et al., 1994). No entanto, o uso intensivo do solo pode causar alterações na estrutura de dependência espacial, ocasionando variáveis aleatórias. O mesmo pode ser observado em Bertolani & Vieira (2001).

Verificou-se que a umidade crítica obtida do ensaio de Proctor normal foi maior na camada de 20-40 cm; devido, provavelmente, a diminuição do teor de areia e ao aumento do teor de argila na profundidade 20-40 cm, pois solos arenosos necessitam de menor quantidade de água para alcançarem a densidade máxima, enquanto que solos com maior teor de argila requerem mais água para o mesmo fim (Caputo, 2003).

**Tabela 5.** Matriz de correlação linear entre os atributos do solo e o carbono orgânico

| 0-20 cm |      |      |        |       |       |        |       |        |        |        |
|---------|------|------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
|         | Ds   | Ug   | Pt     | LL    | LP    | IP     | Dsmax | Ugcrit | GC     | CO     |
| Ds      | 1,00 | 0,23 | -0,99* | -0,32 | 0,08  | -0,42* | 0,14  | -0,38  | 0,98*  | 0,16   |
| Ug      |      | 1,00 | -0,22  | -0,12 | -0,13 | -0,06  | -0,26 | 0,21   | 0,28   | 0,04   |
| Pt      |      |      | 1,00   | 0,34  | -0,06 | 0,44*  | -0,13 | 0,41   | -0,97* | -0,18  |
| LL      |      |      |        | 1,00  | 0,50* | 0,85*  | 0,24  | 0,49*  | -0,38  | -0,49* |
| LP      |      |      |        |       | 1,00  | -0,03  | 0,09  | 0,11   | 0,06   | -0,10  |
| IP      |      |      |        |       |       | 1,00   | 0,22  | 0,50*  | -0,48* | -0,51* |
| Dsmax   |      |      |        |       |       |        | 1,00  | -0,36  | -0,07  | -0,33  |
| Ugcrit  |      |      |        |       |       |        |       | 1,00   | -0,31  | -0,44* |
| GC      |      |      |        |       |       |        |       |        | 1,00   | 0,23   |
| CO      |      |      |        |       |       |        |       |        |        | 1,00   |

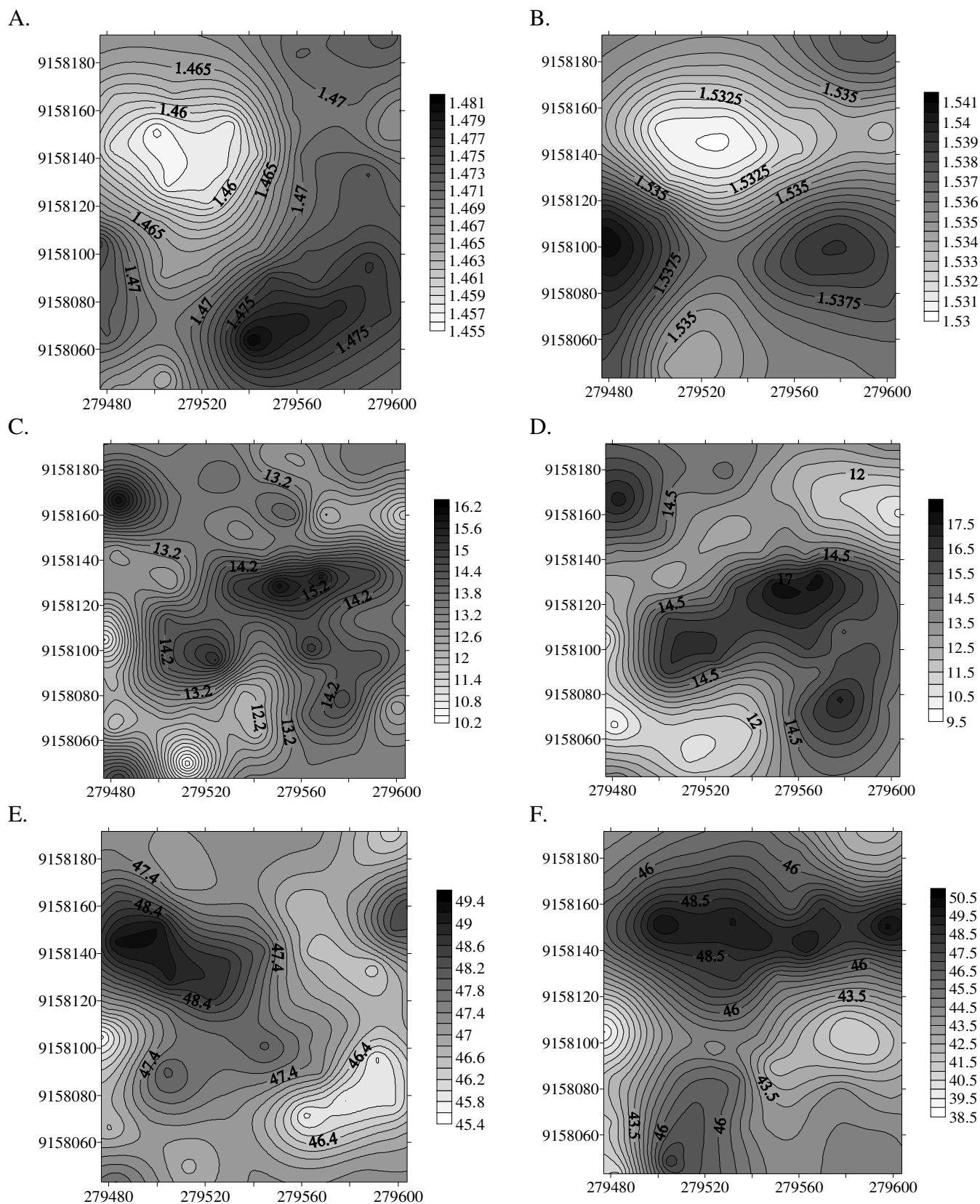
  

| 20-40 cm |      |      |        |       |        |        |        |        |        |       |
|----------|------|------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
|          | Ds   | Ug   | Pt     | LL    | LP     | IP     | Dsmax  | Ugcrit | GC     | CO    |
| Ds       | 1,00 | 0,05 | -0,98* | -0,04 | -0,40* | 0,29   | -0,25  | 0,11   | 0,98*  | -0,14 |
| Ug       |      | 1,00 | -0,07  | 0,15  | 0,44*  | -0,24  | -0,52* | 0,57*  | 0,16   | 0,22  |
| Pt       |      |      | 1,00   | -0,06 | 0,37*  | -0,33  | 0,25   | -0,14  | -0,95* | 0,17  |
| LL       |      |      |        | 1,00  | 0,08   | 0,63*  | 0,08   | 0,01   | -0,05  | -0,06 |
| LP       |      |      |        |       | 1,00   | -0,73* | 0,19   | 0,01   | -0,41* | 0,09  |
| IP       |      |      |        |       |        | 1,00   | -0,09  | 0,00   | 0,29   | -0,11 |
| Dsmax    |      |      |        |       |        |        | 1,00   | -0,91* | -0,46* | -0,23 |
| Ugcrit   |      |      |        |       |        |        |        | 1,00   | 0,31   | 0,24  |
| GC       |      |      |        |       |        |        |        |        | 1,00   | -0,07 |
| CO       |      |      |        |       |        |        |        |        |        | 1,00  |

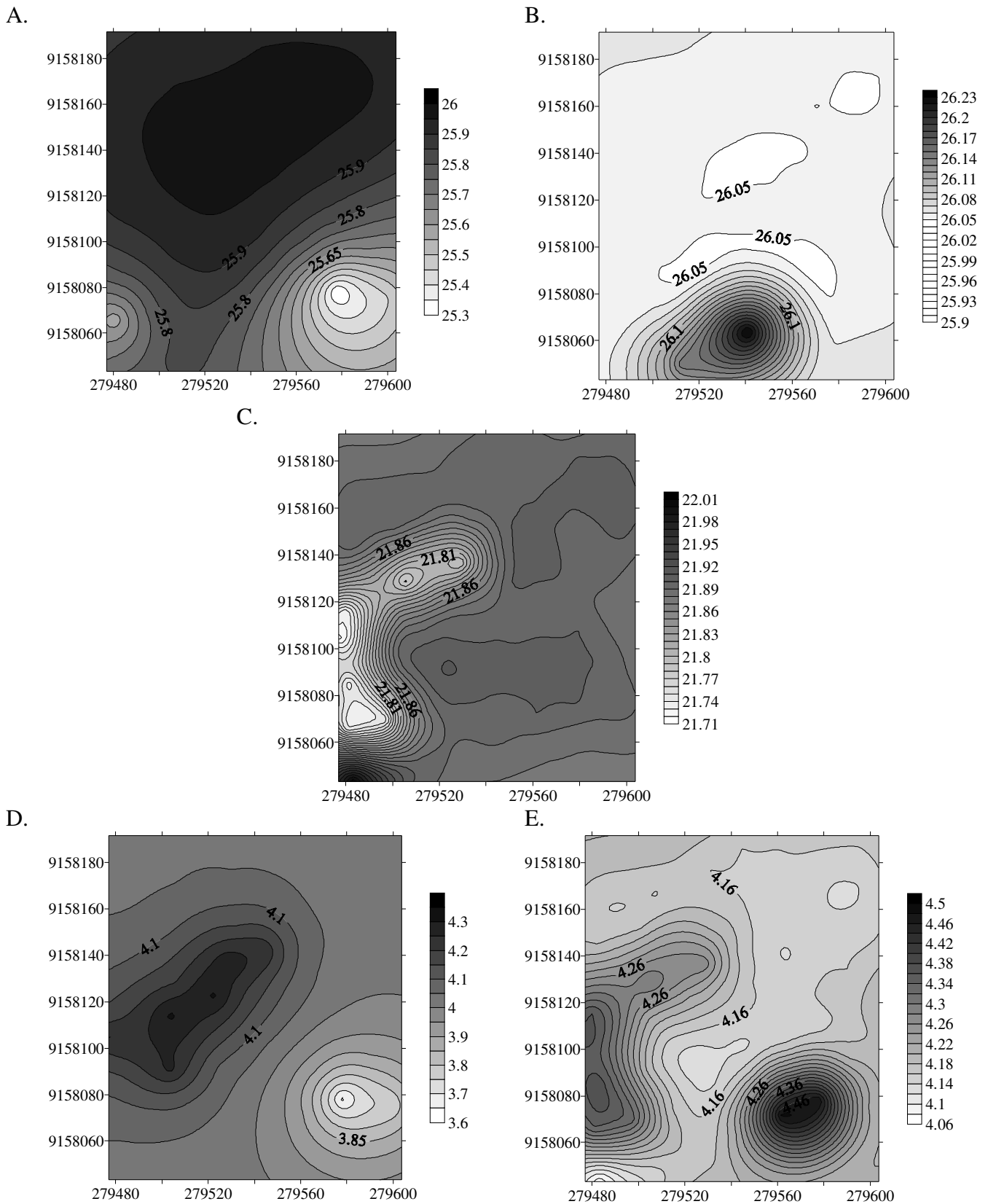
\* Significativo a 5%

A maior concentração de CO na superfície do solo pode ter ocasionado um amortecimento nas cargas aplicadas no solo, observado no ensaio de Proctor normal, confirmado por Aragon et al. (2000), Ball et al. (2000), assim como Braida (2006), que cita que o acúmulo de CO proporcionado por diferentes sistemas de manejo, reduz a Dsmax quando o solo é submetido à compactação, concorrendo com as partículas minerais pela umidade, e seu efeito é mais intenso em partículas de areia, sendo a matéria orgânica capaz de reduzir o efeito lubrificante da água sobre as partículas. Tal fato pode ser verificado pela correlação negativa entre CO e Dsmax, nas duas profundidades,  $r^2 = -0,33$  e  $-0,23$  (Tabela 5) para as profundidades 0-20 e 20-40 cm, respectivamente. A relação entre CO e Dsmax pode ser visualizada na profundidade 0-20 e 20-40 cm, Figuras 16A e B e 15A e B.

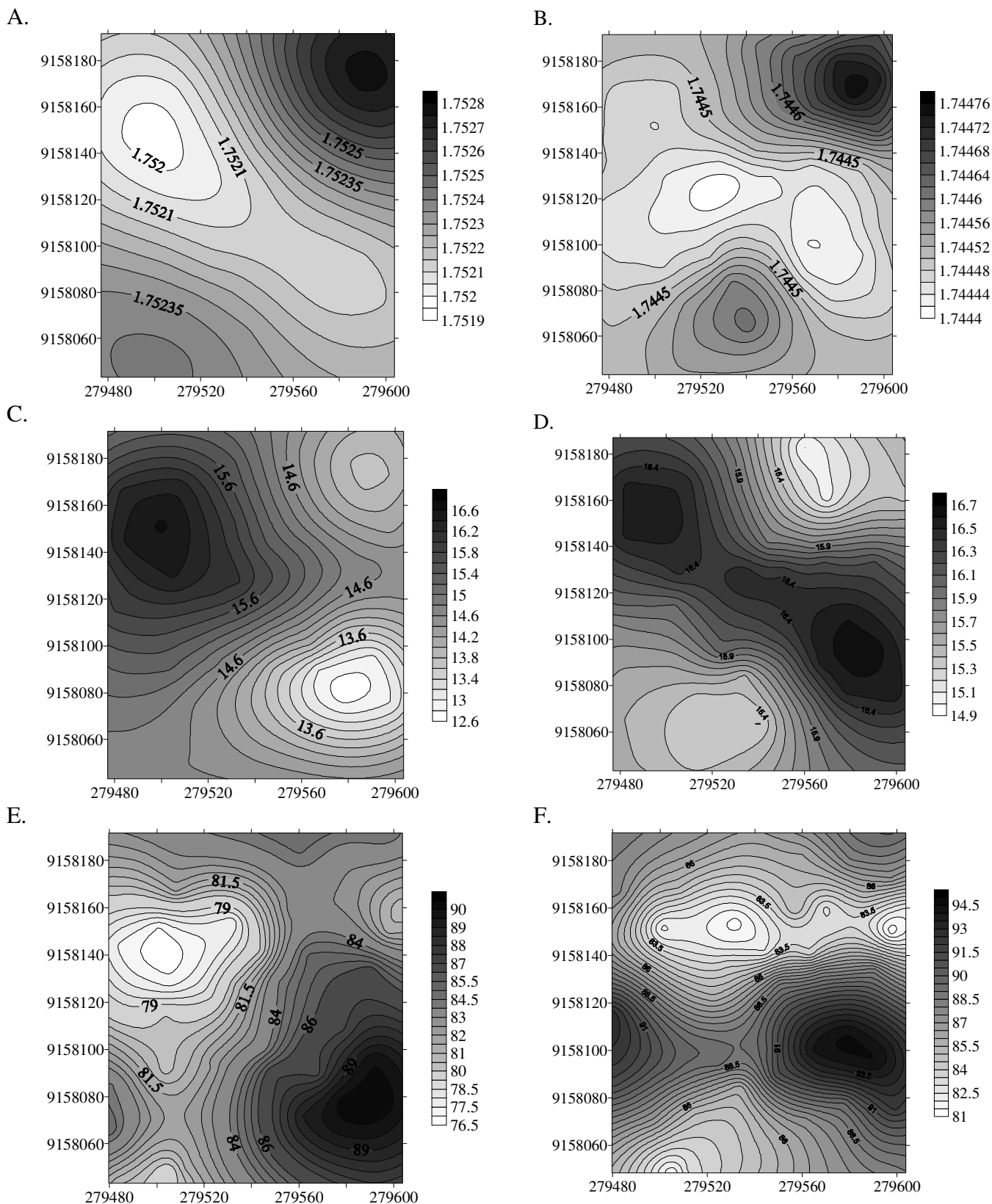




**Figura 13.** Mapas dos atributos densidade do solo (A) (0-20 cm) e (B) (20-40 cm); umidade (C) (0-20 cm) e (D) (20-40 cm); e porosidade (E) (0-20 cm) e (F) (20-40 cm)

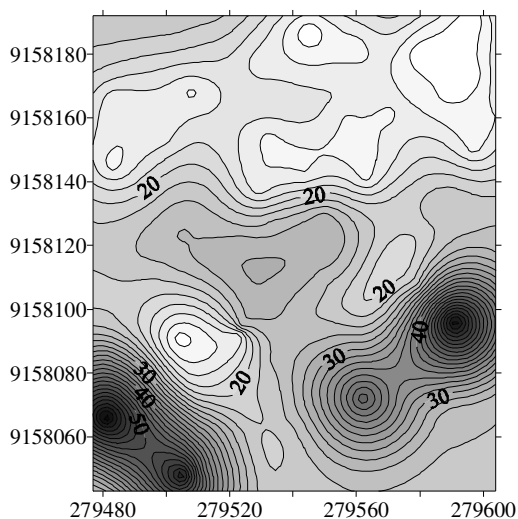


**Figura 14.** Mapas Limite de liquidez (A) (0-20 cm) e (B) (20-40 cm); limite de plasticidade (C) 20-40 cm; e índice de plasticidade (D) (0-20 cm) e (E) (20-40 cm)

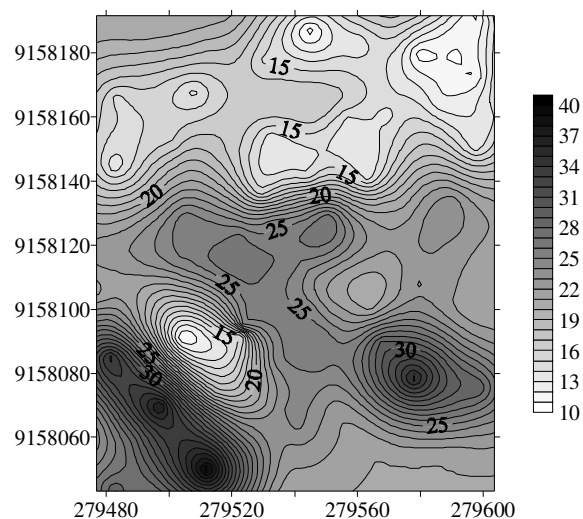


**Figura 15.** Mapas da densidade seca máxima (A) (0-20 cm) e (B) (20-40 cm); umidade crítica (C) (0-20 cm) e (D) (20-40 cm); e GC (E) (0-20 cm) e (F) (20-40 cm)

A.



B.



**Figura 16.** Mapas carbono orgânico (A) 0-20 cm e (B) 20-40 cm

A  $D_s$  (Figura 15A e B) apresentou correlação positiva com a porosidade total (Figura 15E e F) e negativa com o grau de compactação (Figuras 17E e F). Pela correlação simples realizada, obtiveram-se valores acima de  $r^2=0,97$  para as variáveis (Tabela 5).

A correlação entre as variáveis CO e os limites de consistência apresentou relação negativa entre si na superfície, com  $r^2$  de  $-0,49$ ,  $-0,10$  (Tabela 5) para correlação entre CO e LL, LP (Figuras 18A e Figura 16A). Na profundidade 20–40 cm a relação entre as variáveis, apesar de negativas, não foram significativas, com  $r^2 < 0,11$  (Tabela 5) Rolim & Freire (1997), ao estudar os índices de consistência de solos arenosos e argilosos com doses crescentes de vinhaça, encontrou comportamento semelhante para LL e LP, sendo que todos os tratamentos com vinhaça concentrada reduziram os valores dos limites de liquidez e plasticidade em relação à testemunha, pela observação das medias dos ensaios. A menor correlação encontrada na profundidade 20–40 cm, provavelmente devem-se ao menor teor de carbono orgânico e sua menor influencia nas propriedades do solo.

A  $U_{gcrit}$  apresentou relação negativa com a  $D_{smax}$  (Figuras 17A, B, C e D), com  $r^2=-0,36$  e  $-0,91^*$ , para a camada 0-20 cm e 20-40 cm, respectivamente (Tabela 5).

## CONCLUSÕES

1. As variáveis  $U_g$ , areia, silte e argila, para a área estudada, apresentaram boas correlações com as demais variáveis, principalmente na profundidade 20-40 cm.

2. O valor médio do grau de compactação, na profundidade 20-40 cm, indicou que a compactação da área pode ser prejudicial ao desenvolvimento e rendimento da cultura.
3. Pelos limites de consistência, o solo pode apresentar alta contração, exigindo cuidado, em ambos os perfis.
4. O carbono orgânico contribuiu para a redução da densidade seca máxima, observada no ensaio de Proctor normal.

### **AGRADECIMENTOS**

Agradecimento à CAPES, pela concessão de bolsa de estudo à Uilka Elisa Tavares e à Usina Santa Teresa, pela disponibilidade da área de pesquisa.

### **LITERATURA CITADA**

- Aragon, A; Garcia, M. G.; Filgueira, R. R.; Pachepsky, A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; the relationship with organic carbon and water content. *Soil & Tillage Research*, v.56, p.197-204, 2000.
- 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, p.123-141, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Solo: ensaio de compactação - procedimento. NBR 7182 - 86. Rio de Janeiro: 1986, 10p.
- Ball, B. C.; Campbell, D. J.; Hunter, E. A. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil & Tillage Research*, v.57, p.83-91, 2000.
- Beltrão, B. A., Mascarenhas, J. C., Souza Junior, C., Trindade, M. J., Miranda, J. L. F. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Goiana, Estado de Pernambuco. Recife: CPRM/PRODEEM, 21 p., 2005.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Veiga, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.131-139, 2010.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Veiga, M.; Reinert, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio

- de Proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.605-614, 2006.
- Brasil. Indicadores de desenvolvimento sustentável. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010.
- Camargo, O. A.; Alleoni, L. R. F. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba, Degaspar, 1997. 132p.
- Cambardella, C. A.; Moorman, J. M.; Novak, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, p.1501-1511. 1994.
- Canillas, E. C.; Salokhe, V. M. Modeling compaction in agricultural soils. *Journal of Terramechanics*, v.39, p.71-84, 2002.
- Dias Junior, M. S.; Pierce, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. Revisão de Literatura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.20, p.175-182, 1996.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.
- Englund, E.; Sparks, A. GeoEAS (Geostatistical Environmental Assessment Software) Las Vegas: U.S. Environmental Protection Agency, 1991.
- Figueiredo, L. H. A.; Dias Júnior, M. S.; Ferreira, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.487-493, 2000.
- Golden Software. Surfer 7.0 - user's guide. New York: Golden Software, 1999. 619 p.
- Guimarães, R. M. L.; Gonçalves, A. C. A.; Tormena, C. A.; Folegatti, M. V.; Blainsk, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. *Engenharia Agrícola*, v.30, p.657-669, 2010.
- Hoaglin, D. C.; Mosteller, F.; Tukey, J. W. *Análise exploratória de dados: técnicas robustas, um guia*. Lisboa: Editora Salamandra, 1992. 446p.
- Mello, G.; Bueno, C. R. P.; Pereira, G. T. Variabilidade espacial de perdas de solo, do potencial natural e risco de erosão em áreas intensamente cultivadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.10, p.315-322, 2006.
- Ministério da Agricultura. Produção Brasileira de cana-de-açúcar. Em: [http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/Desenvolvimento\\_Sustentavel/Agroengenharia/estatisticas/producao/ATAUALIZACAO\\_JULHO\\_2011/03\\_%20prod\\_cana.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroengenharia/estatisticas/producao/ATAUALIZACAO_JULHO_2011/03_%20prod_cana.pdf). Acesso em: 27 julho 2011.

- Ministério da Agricultura. Produção nos Estados do Norte/Nordeste safra 2010/2011, em pontos percentuais. Em: [http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/Desenvolvimento\\_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/producao/ATUALIZACAO\\_06\\_2011/08\\_%20area\\_prod\\_brasil.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/producao/ATUALIZACAO_06_2011/08_%20area_prod_brasil.pdf). Acesso em: 27 julho 2011.
- Miranda, E. E.V; Lanças, K. P; Silva, R. B. Modelagem e mapas da capacidade suporte de carga de um Latossolo vermelho cultivado com cana-de-açúcar. *Enérgia na Agricultura*, v.22, p.42-54, 2007.
- Nettleton, W. D.; Brasher, B. R. Correlation of clay minerals and properties of soils in the Western United States. *Soil Science Society America Journal*, v.47, p.1032-1036, 1983.
- Ojeniyi, S.O.; Dexter, A.R. Soil factors affecting the macrostructures produced by tillage. *Transaction American Science Agricultural. Engeeniring*, v.22, p.339-343, 1979.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Vasconcelos, R. F. B.; Pedrosa, E. M. R. Distribuição de agregados e carbono orgânico em um Argissolo Amarelo distrocoeso em diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.907–913, 2010.
- Rolim, M. M.; Freire, W. J. Efeito da vinhaça concentrada sobre a estabilidade estrutural dos agregados do solo. *Engenharia Agrícola*, v.16, p.69-76, 1997.
- Severiano, E. C.; Oliveira, G. C.; Dias Junior, M. S.; Castro, M. B.; Oliveira, L. F. C.; Costa, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II - quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. *Engenharia Agrícola*, v.30, p.404-413, 2010.
- Silva, A. J. N; Cabeda, M. S. V. Modificações na matriz de um Argissolo Amarelo coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.554–562, 2006.
- Silva, A. J. N; Cabeda, M. S. V.; Carvalho, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.579-585, 2006b.
- Silva, A. R.; Dias Junior, M. S.; Guimarães, T. G.; Araujo Junior, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.207-216, 2006a.

- Siqueira, G. M.; Vieira, S. R.; Ceddia, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. *Bragantia*, v.67, p.203-211, 2008.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Silva, A. J. N.; Oliveira, V. S.; Silva, Y. A. B. Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.639-648, 2010.
- Vieira, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez,V.H.; Schaefer, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v.1, p.1-54, 2000.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D., ed. *Application of soil physics*, p.319-324, 1980.