

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

**QUALIDADE TECNOLÓGICA, ESTANDE E PRODUTIVIDADE DA CANA-PLANTA
CORRELACIONADOS COM OS ATRIBUTOS FÍSICOS E MATÉRIA ORGÂNICA DO
SOLO NA REGIÃO DO CHAPADÃO DO CÉU (GO).**

LUIZ FERNANDO APARECIDO DE ALMEIDA

Engenheiro Agrônomo

CHAPADÃO DO SUL
ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL
SETEMBRO/2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – ÁREA DE
CONCENTRAÇÃO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO**

**QUALIDADE TECNOLÓGICA, ESTANDE E PRODUTIVIDADE DA CANA-PLANTA
CORRELACIONADOS COM OS ATRIBUTOS FÍSICOS E MATÉRIA ORGÂNICA DO
SOLO NA REGIÃO DO CHAPADÃO DO CÉU (GO).**

LUIZ FERNANDO APARECIDO DE ALMEIDA

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Profa. Dra. Marlene Cristina Alves

Dissertação apresentada à Universidade Federal
de Mato Grosso do Sul – UFMS - Campus de
Chapadão do Sul para a obtenção do título de
MESTRE EM AGRONOMIA, especialidade:
Sistemas de Produção.

Chapadão do Sul - MS

Setembro/2014



Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Câmpus de Chapadão do Sul

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Luiz Fernando Aparecido de Almeida
ORIENTADOR (A): Prof. (a) Dr. (a) Marlene Cristina Alves

**QUALIDADE TECNOLÓGICA, ESTANDE E PRODUTIVIDADE DA CANA-
PLANTA CORRELACIONADOS COM OS ATRIBUTOS FÍSICOS E MATÉRIA
ORGÂNICA DO SOLO NA REGIÃO DO CHAPADÃO DO CÉU (GO).**

Prof.(a) Dr.(a) Presidente Marlene Cristina Alves

Prof.(a) Dr.(a) Morel de Passos e Carvalho

Prof.(a) Dr.(a) Rafael Montanari

Chapadão do Sul, 11 de setembro de 2014.

DEDICATÒRIA

Aos meus queridos Pais, José Mirovaldo e Rosa, que são para mim um exemplo de humildade e luta. Tenho certeza que sempre estiveram e estarão do meu lado, mesmo a distância, olhando por mim. Sempre compreenderam minhas escolhas e assim minhas renúncias. Esse trabalho vai para vocês, meus amados e incansáveis Pais.

OFERECIMENTO

Aos meus irmãos:

*Denilce, Zenilda, Aldair, Oséias,
Jessé e José Antônio.*

Aos meus sobrinhos:

*Carlos Eugênio, Cibele, Luis Gustavo, Marco
Antonio, José Gabriel, André Luis e Júlio
César.*

AGRADECIMENTOS

A *Deus* que me deu a vida, força, ânimo, saúde e paz nos momentos mais difíceis que enfrentei, sempre me acompanhando com sua graça, luz e sabedoria, me guiando sempre mesmo que nos caminhos mais escuros e tortuosos.

A minha *Grande Família* “da terrinha das Minas Gerais”, que me acompanha, ajuda e me compreende em todos os momentos, sempre me animando e motivando por mais difíceis que fossem.

Aos *amigos de Nova Resende*, minha terra natal, que sempre me permitiram desfrutar do sentimento de amizade e me motivaram na procura pelo conhecimento, crescimento profissional e pessoal.

Aos companheiros de Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em especial aos irmãos do *MI – 131*, que desde a graduação me instigaram a alçar sempre voos maiores e, mesmo tanto tempo depois de termos nos separado pela distância, continuam vivos e atuantes no meu dia.

A toda família e equipe da *Usina Cerradinho Bioenergia* pela permissão concedida em cursar o mestrado, apoio, compreensão, auxílio e disponibilização de recursos, sem as quais seria impossível a realização desse trabalho.

A *Prof^a. Dr^a. Marlene Cristina Alves* e ao *Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho* pela oportunidade de trabalhar com este tema, orientação e amizade, que surgiu a partir deste trabalho. Agradeço o apoio e a compreensão, principalmente nos momentos de conflito entre trabalho e curso.

A *Prof^a. Dr^a. Rita Alvarez* e *Prof. Dr. Rafael Montanari* por participarem da banca do exame de qualificação e defesa e, também, pelas sugestões no trabalho.

Aos companheiros e amigos da primeira turma de mestrado da UFMS – Campus Chapadão do Sul, juntamente com os mestres que nos dedicaram tanto tempo nos ensinando e nos guiando, em especial ao Coordenador do Programa de Mestrado *Prof. Dr. Cassiano Garcia Roque*, essencial para essa conquista que sempre nos guiou e apoiou.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, agradeço.

"A agricultura parece ser muito fácil quando seu arado é um lápis e você está a quilômetros de distância de um milharal".

(Dwight D Eisenhower)

"Aprender é única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende".

(Leonardo Da Vinci)

"A mente que se abre à uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original".

(Albert Einstein)

ALMEIDA; L. F. A.; **Qualidade tecnológica, estande e produtividade da cana-planta correlacionados com os atributos físicos e matéria orgânica do solo na região do Chapadão do Céu (GO)**. 2014. 94 f. Dissertação. (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2014.

RESUMO: A cultura da cana-de-açúcar vem se expandindo no Brasil ao longo dos anos e com ela as práticas de mecanização agrícola. Em busca de melhores produtividades operacionais, na tentativa de diminuição dos custos de produção da atividade agrícola, cada vez mais tem se aumentado o aporte tecnológico nas máquinas, impactando substancialmente no porte e no peso desses equipamentos. Para se otimizar o parque de máquinas das empresas sucroalcooleiras, as operações mecanizadas têm seu planejamento operacional distribuído durante todo o ano, nem sempre respeitando as melhores condições edafoclimáticas para a sua realização. Esse é um dos fatores que pode levar ao insucesso da atividade pela degradação da qualidade física do solo como aumento da resistência à penetração, redução da umidade e compactação das camadas subsuperficiais, impactando negativamente na produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. No ano de 2013, em Chapadão do Céu, Estado de Goiás, Brasil (18°35'39.53 S; 52°36'35.93 W), foram empregadas correlações, de Pearson e espaciais, entre atributos da cana-de-açúcar e alguns atributos físico do solo, visando encontrar aquele que pudesse definir zonas específicas de manejo do solo. Para tanto, instalou-se uma malha regular para a coleta de dados do solo e da planta, numa área de 5,244 ha, num talhão contendo a variedade de cana-de-açúcar IACSP 955000, no primeiro corte. Nela foram alocados 121 pontos amostrais georreferenciados, de forma a cobri-la amplamente, num LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, textura argilosa. Os atributos da planta foram a produtividade de cana-de-açúcar, o número de plantas por m², a porcentagem de sólidos solúveis totais, a porcentagem de sacarose, a porcentagem de pureza, a porcentagem de fibras e os teores de açúcares totais recuperáveis. Enquanto que os do solo foram a umidade gravimétrica, a umidade volumétrica, a densidade da partícula, a densidade do solo, a porosidade total, a resistência à penetração e a matéria orgânica. Assim, para a obtenção de máxima produtividade, para a variedade pesquisada, a população ideal foi de 11 pl m⁻². Os valores de resistência do solo à penetração, por evidenciarem correlações lineares e espaciais com a produtividade de colmos, constituíram-se indicadores de zona específica de manejo do solo fortemente associadas à produtividade da cana-de-açúcar, nela a produtividade de cana-de-açúcar variou de 106,7 a 125,3 t ha⁻¹ quando a resistência do solo a penetração variou de 0,010 a 1,060 MPa. O teor de matéria orgânica em superfície se correlacionou espacialmente com a produtividade da cana-de-açúcar, podendo ser indicador de duas zonas específicas de manejo do solo, onde as variações dos teores de matéria orgânica foram de 19,5 e 22,6 g dm⁻³ e 22,6 e 25,7 g dm⁻³ corresponderam produtividades de cana-de-açúcar de 88, a 106,7 t ha⁻¹ e 106,7 a 125,3 t ha⁻¹. Os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar ATR, POL e PUR podem ser indicativos de zonas específicas de manejo do solo por se correlacionarem positiva e espacialmente com a produtividade de cana-de-açúcar, onde as produtividades variaram entre 88,0 a 106,7 t ha⁻¹ e 106,7 a 125,3 t ha⁻¹. Em futuros trabalhos voltados ao manejo de solos, que empreguem os mesmos atributos do solo e da planta que os do presente estudo, os alcances recomendados deverão estar compreendidos entre 31,2 e 180,3 metros.

Termos de indexação: *Saccharum* spp., manejo e conservação do solo, variabilidade espacial, atributos tecnológicos da cana-de-açúcar.

ALMEIDA; L. F.; **Quality, stand and sugarcane plant productivity correlated with the physical attributes of soil and organic matter in Chapadão do Céu (GO) region.** 2014. 94 p. Dissertation. (Master in Agronomy) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2014.

ABSTRACT: The culture of sugarcane in Brazil has been expanding over the years and with it the practices of agricultural mechanization. In search of better operational productivity in an attempt to decrease the production costs of agriculture increasingly has increased technological support on the machines, substantially impacting the size and weight of this equipment. To optimize the number of machines of sugarcane enterprises, mechanized operations have their operational planning distributed throughout the year, not always respecting the best environmental conditions for its realization. This is one of the factors that can lead to failure of the activity for the degradation of soil physical quality such as increased resistance to penetration, reducing moisture and compaction of subsurface layers, impacting negatively on productivity and technological quality of sugarcane. In 2013, in Chapadão do Céu, State of Goiás, Brazil (18°35'39.53S, 52 ° 36'35.93W), correlations, Pearson and space were employed between attributes of sugarcane and some physical attributes of the soil to find one that could define specific areas of soil management. For both, installed a regular grid for data collection of soil and plant in a 5,244 ha area in a compartment containing a variety of sugarcane IACSP 955000 in the first cut. It 121 sampling points were georeferenced allocated so as to cover it extensively in a dystrophic clayey Red Yellow Latosol. The attributes of the plant were the productivity of sugarcane, the number of plants per m⁻², the percentage of total soluble solids, sucrose percentage, the percentage of purity, fiber percentage and total recoverable sugars. While soil were gravimetric moisture, volumetric moisture, particle density, bulk density, total porosity, penetration resistance and organic matter. Thus, to achieve maximum productivity for the range studied, the optimal population is 11 pl m⁻². The values of soil resistance to penetration, because they show linear and spatial correlations with stalk yield, consisted of indicators specific area of soil strongly associated with productivity of sugarcane management, in it the productivity of sugarcane ranged from 106.7 to 125.3 t ha⁻¹ when the resistance to penetration ranged from 0.010 to 1.060 MPa. The content of organic matter in surface spatially correlated with the productivity of sugarcane, which can be an indicator of two specific areas of soil management, where the variations of the levels of organic matter were 19.5 and 22.6 g dm⁻³ and 22.6 and 25.7 g dm⁻³ corresponded sugarcane yield of 88 to 106.9 t ha⁻¹ and 106.7 to 125.3 t ha⁻¹. Sugarcane technological attributes ATR, POL and PUR may be indicative of specific management zones of soil and spatially correlate positively with productivity of sugarcane, where yields ranged from 88.0 to 106.7 t ha⁻¹ and 106.7 to 125.3 t ha⁻¹. In future studies related to soil management, employing the same soil properties and plant those in this study, the recommended ranges should be between 31.2 and 180.3 meters.

Index terms: *Saccharum* spp, management and conservation of soil, spatial variability, technological attributes of sugarcane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de semivariograma.....	19
Figura 2 – Extrato do balanço hídrico de uma área na região de Chapadão do Céu.....	23
Figura 3 – Croqui da área amostral de instalação do trabalho.....	25
Figura 4 - Equações de regressão entre atributos da cultura de cana-de-açúcar, atributos físicos na profundidade de 0,25 a 0,50m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	43
Figura 5 - Semivariogramas simples dos atributos da cana-de-açúcar (PRO, STD, ATR, PUR e POL) em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico.	48
Figura 6 - Semivariogramas simples dos atributos físicos UG1, UV1, DP1, DS1, PT1, RP1 e MO1 de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico.	49
Figura 7 - Semivariogramas simples dos atributos físicos £UG2, UV2, DP2, DS2, PT2, RP2 e MO2 de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico.....	50
Figura 8 - Validação Cruzada dos atributos da produtividade da cana-de-açúcar.....	52
Figura 9 - Validação cruzada dos atributos (RP1, RP2, UG1, £UG2, DS1, DS2, PT1, PT2, MO1, UV2) de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.....	53
Figura 10 - Mapas de krigagem dos atributos da cana-de-açúcar (ARC, ATR, pH _C , POL, PRO, PUR e STD).....	57
Figura 11 - Mapas de krigagem dos atributos RP1, RP2, UG1, £UG2, PT1, PT2, DS1, DS2, MO1 e UV2 de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.	58
Figura 12 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade em função de ATR da cultura da cana-de-açúcar.	60
Figura 13 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade em função de STD da cultura da cana-de-açúcar.	61
Figura 14 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade em função de POL da cultura da cana-de-açúcar.	62
Figura 15 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade em função de PUR da cultura da cana-de-açúcar.	63
Figura 16 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função da RP2 de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	64
Figura 17 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função da MO1 de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Caracterização granulométrica de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO	23
Quadro 2 - Análise descritiva de atributos da cana-planta cultivada em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO..	30
Quadro 3 - Análise descritiva inicial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO, na profundidade de 0,00-0,25 m.....	31
Quadro 4 - Análise descritiva inicial de atributos físicos Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO, na profundidade de 0,25 - 0,50 m.....	32
Quadro 5 - Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.....	39
Quadro 6 - Matriz de correlação dos atributos da cana-de-açúcar e físicos do solo na profundidade de 0,0 – 0,25m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.....	40
Quadro 7 - Matriz de correlação dos atributos da cana-de-açúcar e físicos do solo na profundidade de 0,0 – 0,25m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.....	41
Quadro 8 - Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens para os atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físicos nas profundidades de 0,0 – 0,25 e 0,25 – 0,50 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO	46
Quadro 9 - Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físicos do solo nas profundidades de 0,0 – 0,25 e 0,25 – 0,50 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO	47
Quadro 10 - Parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados para atributos da cultura da cana-de-açúcar e de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 A cultura da cana-de-açúcar.....	3
2.1.1 Aspectos históricos e econômicos.....	3
2.1.2 Sistema radicular.....	5
2.1.3 Aspectos agrônômicos.....	6
2.1.4 A variedade IACSP 955000.....	7
2.2 A qualidade do solo.....	8
2.2.1 Tráfego de máquinas.....	8
2.2.2 Densidade do solo.....	9
2.2.3 Compactação do solo.....	10
2.2.4 Resistência do solo à penetração.....	12
2.2.5 Porosidade do solo.....	15
2.2.6 Matéria orgânica do solo.....	16
2.3 Agricultura de precisão.....	17
2.4. A geoestatística na pesquisa agrônômica.....	18
2.4.1. Semivariograma.....	18
2.4.2. Interpolação dos dados por krigagem ordinária.....	20
2.4.3. Semivariograma cruzado e co-krigagem.....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 Caracterização do local de origem dos dados.....	23
3.2 Implantação e caracterização da malha experimental.....	24
3.3 Coleta e metodologia de determinação dos atributos pesquisados.....	25
3.4 Análise estatística e geoestatística dos atributos pesquisados.....	26
3.4.1. Exclusão da tendência quando da não formação da estacionariedade.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1 Análise descritiva dos dados.....	29
4.1.1 Variabilidade dos atributos.....	29
4.1.1.1 Atributos da planta.....	29
4.1.1.2 Atributos do solo.....	29
4.1.2 Distribuição de frequência dos atributos.....	34
4.1.2.1 Atributos da planta.....	34

4.1.2.2 Atributos do solo	34
4.1.3 Valores médios dos atributos estudados	35
4.1.3.1 Atributos da planta.....	35
4.1.3.2 Atributos do solo	36
4.2 Análise de regressão entre os atributos.....	38
4.2.1 Regressão linear simples	38
4.2.1.1 Matriz de correlação linear simples entre os atributos	38
4.2.1.1.1 Atributos da planta versus atributos da planta.....	38
4.2.1.1.2 Atributos da planta versus atributos do solo na profundidade de 0,0–0,25m.....	42
4.2.1.1.3 Atributos da planta versus atributos do solo na profundidade de 0,25–0,50m.....	42
4.2.1.2 Regressão linear simples entre os atributos estudados	42
4.3 Análise geoestatística dos atributos estudados	44
4.3.1 Análise semivariográfica simples	44
4.3.1.1 Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos	44
4.3.1.2 Validação cruzada dos semivariogramas simples ajustados dos atributos	46
4.3.1.3 Mapas de krigagem dos atributos	51
4.3.2 Análise semivariográfica cruzada.....	55
4.3.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem dos atributos	55
5. CONCLUSÕES	66
REFERENCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a procura no âmbito mundial é por novas fontes e tecnologias para geração de energia renovável e sustentável na tentativa de substituição dos combustíveis fósseis, não renováveis e grandes responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa. A cana-de-açúcar tem importante papel no cenário mundial como fonte de matéria-prima para geração de energia renovável de diferentes formas e para diferentes usos, tais como o açúcar, o etanol e a bioeletricidade.

Na safra 2013/14, o estado de Goiás foi o segundo maior produtor de cana-de-açúcar no Brasil, responsável por cerca de 9,3% da área total cultivada no país, apresentando produtividade média de 74.860 kg ha⁻¹, muito semelhante a produtividade média brasileira apresentada no mesmo período de 74.769 kg ha⁻¹ e o estado de Goiás se apresenta com uma fronteira à expansão de novas áreas de plantio e de novas usinas em processo de instalação.

Na atual condição tecnológica em que a agricultura se encontra, cada vez mais ocorre a mecanização das operações realizadas nas lavouras. As operações de preparo de solo, plantio e cultivo agrícola contam com equipamentos dotados de muita sofisticação, porém cada vez com maior porte e, máquinas mais pesadas operando em condições fora da faixa ideal de umidade do solo levam a processos de degradação física do mesmo. Para se diluir os custos da operação por meio de do aumento da produtividade das máquinas e equipamentos, atualmente, não se percebe o total respeito às condições do solo no momento da operação, principalmente em relação à sua umidade. Esse desrespeito à condição do solo com tráfego de máquinas de grande porte durante o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar reduz a qualidade física do solo comprometendo a produtividade da cultura da cana-de-açúcar. Assim, as principais alterações são evidenciadas pela diminuição da taxa de infiltração de água no solo e aumento da resistência à penetração das raízes da cultura.

Iniciada no Brasil no ano 2000, a agricultura de precisão (AP) vem causando substancial modificação tecnológica no manejo do solo. Por meio desse pacote tecnológico da AP o agricultor pode levantar os problemas de sua propriedade e procurar soluções para manejá-los da melhor forma. Uma das tecnologias da AP é a adoção de um mapa de produtividade que possua elevada correlação espacial com os mapas dos atributos físicos do solo. A partir disso, pode-se perfeitamente praticar qualquer manejo conservacionista no solo, variando no espaço, de forma que nos locais onde houver inadequada condição física do solo, normalmente associados às menores produtividades agrícolas, deverão ser empregados os manejos localizados.

Em sistemas de cultivos altamente tecnificados, como na Agricultura de Precisão em cana-de-açúcar, é fundamental ter o conhecimento da variabilidade espacial de atributos do solo, o que poderá contribuir para a redução de custos nos sistemas de produção. Neste sentido, a geoestatística, ferramenta essencial à AP, possibilita uma análise detalhada da variabilidade espacial dos atributos do solo que se relacionam com a produtividade agrícola, entre os quais aqueles voltados às melhores condições físicas, indicando alternativas de manejo para reduzir os seus efeitos sobre a produção das culturas.

Considerando o exposto, evidencia-se a necessidade de pesquisas que relacionem a variabilidade espacial da produtividade da cultura da cana-de-açúcar com os atributos físicos do solo. Desta forma, considerando o atual e substancial avanço da cultura canavieira no Brasil, o estudo da produtividade e da qualidade da cana-de-açúcar, em função dos atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico textura argilosa, teve como objetivo analisar as correlações, de Pearson e espaciais, entre os atributos pesquisados da cultura, visando determinar os que melhor se relacionem com o aumento da produtividade agrícola em questão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

2.1.1 Aspectos históricos e econômicos

É imprecisa a informação relacionada à época de surgimento da cana-de-açúcar no mundo, assim como o local exato de sua origem. A região de Nova Guiné é apontada por muitos historiadores (ARBEX, 2001), como sendo o berço geográfico do surgimento da cana-de-açúcar, de onde foi levada para o sul da Ásia e consumida inicialmente em forma de xarope. Para esses historiadores, a primeira aparição da cana no mundo se deu entre 10 e 12 mil anos atrás.

O cultivo de cana-de-açúcar se espalhou para quase todas as regiões tropicais e subtropicais. O Mundo Novo recebeu a cana-de-açúcar, por mãos de portugueses e espanhóis, no início do século XVI. Nos Estados Unidos da América, a introdução foi feita no estado da Louisiana por volta de 1741. Segundo Mozambini et al. (2006), o continente Americano ofereceu as melhores condições para o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Posteriormente, as maiores plantações se concentrariam nesse continente.

Há indícios de que a cana-de-açúcar foi cultivada no Brasil antes da colonização, mas seu desenvolvimento se deu mais tarde, com a chegada das primeiras mudas, em 1532, trazidas da Ilha da Madeira pelos portugueses na expedição de Martim Afonso de Souza, por determinação do rei Dom Manoel, e posteriormente com a fundação de engenhos (MOZAMBINI et al., 2006).

A cana-de-açúcar, uma das culturas mais importantes do mundo, é típica de climas tropicais e semitropicais e a principal matéria-prima para a fabricação de açúcar, aguardente e álcool (etanol), sendo importante fonte de renda, de geração de empregos e de desenvolvimento (CAMARGO et al., 2010; KIRUBAKARAN et al., 2013).

Linneu, em 1753, descreveu a cana-de-açúcar classificando-a como *Saccharum officinarum* e *Saccharum spicatum*. É uma planta da família das Poáceas, com seis espécies básicas e aproximadamente 500 variedades híbridas. A cana-de-açúcar, cultura típica de climas tropicais e semitropicais, se desenvolve em forma de touceira. Tem como produto comercial a parte aérea – formada por colmos, folhas, inflorescências e frutos – e a subterrânea, formada por rizomas e raízes fasciculadas ou em forma de cabeleira (CAMARGO et al., 2010; KIRUBAKARAN et al., 2013). A cana-de-açúcar é uma planta C4, adaptada às condições de alta intensidade luminosa e altas temperaturas. A cultura necessita de grandes quantidades de água sendo que somente 30% de seu peso são de matéria seca e 70% de matéria líquida (NÓBREGA; DORNELAS, 2006).

A cana-de-açúcar possui ciclo de 5 a 7 anos, sendo, portanto, uma cultura semiperene que necessita de um desenvolvimento radicular em maior profundidade para acréscimo de sua produtividade em solos pouco férteis e com baixa retenção de água. Na região tropical úmida, uma das limitações dos solos é a baixa fertilidade em profundidade, que se reflete em menor volume de solo explorado pelas raízes (DEMATTE, 2005). Corroborando com esse pensamento Ivo (1999) e Cintra et al. (2006) afirmam a necessidade de aprofundamento do sistema radicular da cana nos solos dos tabuleiros costeiros, enfatizando a importância do estudo de raízes como parâmetro para preparo do solo e identificação de práticas culturais mais adequadas.

Apesar de a cana-de-açúcar ter alta capacidade de absorver água pelas folhas, são as raízes as responsáveis pela maior quantidade de absorção de água. Pesquisas revelam que o desempenho das raízes da cana-de-açúcar passa a ser prejudicado na medida em que os índices de densidade do solo superam $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$ e que o sistema radicular da cana-de-açúcar renova-se anualmente, deixando em média $11,2 \text{ t.ha}^{-1}$ de material vegetal (GONÇALVES, 2006).

No Brasil, a cana-de-açúcar é tida como uma das principais culturas da economia desde o período colonial. Atualmente, ela é produzida em quase todo o País, sendo o maior produtor o estado de São Paulo, ficando o estado de Goiás em segundo lugar no ranking de produção. A grande importância da cana para o Brasil e o interesse do país pela planta são evidenciados pela posição de maior produtor mundial e por ser o segundo produto agrícola em valor de produção, sendo superado apenas pela soja (IBGE, 2013; NÓBREGA; DORNELAS, 2006).

O Brasil não é apenas o maior produtor de cana-de-açúcar, como também o primeiro do mundo na produção de açúcar e vem conquistando cada vez mais o mercado externo com o uso do etanol como alternativa energética renovável, principalmente em substituição ao combustível de origem fóssil para os veículos automotores. Segundo o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola do IBGE (2014), a área plantada com cana-de-açúcar no Brasil é de 9,969 milhões de hectares, com uma produção de 748,233 milhões de toneladas. Para o ano de 2020, a Organização Internacional do Açúcar (International Sugar Organization, na sigla em inglês) prevê que esta produção alcance 846 milhões de toneladas. A importância agrícola e industrial dessa cultura, para o Brasil se deve ao valor da produção, da área explorada e sua múltipla utilidade.

Os estados do Centro-Oeste, principalmente Goiás e Mato Grosso do Sul, compõem a nova fronteira agrícola da cana-de-açúcar no país. De acordo com Silva et al. (2010), houve forte avanço da cultura da cana-de-açúcar em Goiás, no período de 1990 a 2009. Hernández (2008) observou, no período de 1996 a 2006, crescimento expressivo da área cultivada de cana-de-açúcar que passou a ocupar áreas antes destinadas as culturas do milho, arroz e pastagens. Porém, para o conjunto do Estado, Silva et al. (2010) concluíram que a expansão da cana-de-açúcar não

impactou significativamente a produção de alimentos, uma vez que os ganhos de produtividade contribuíram para contrabalançar a ocupação de novas áreas pela cana-de-açúcar.

Na safra 2013/14, o estado de Goiás foi o segundo maior produtor de cana-de-açúcar no Brasil, apresentando 818,4 mil ha cultivados, cerca de 9,3% da área total cultivada no país. No Brasil a área cultivada com cana-de-açúcar correspondeu a 8.811,43 mil hectares, o que levou a uma moagem de 658,8 milhões de toneladas. A produtividade média brasileira apresentada foi de 74.769 kg ha⁻¹ de cana-de-açúcar enquanto o Estado de Goiás apresentou produtividade média de 74.860 kg ha⁻¹. Estima-se o estado de Goiás apresentará acréscimo na área cultivada de 59,9 mil hectares, crescimento devido, principalmente, à expansão de novas áreas de plantio das novas usinas em funcionamento (CONAB, 2014).

2.1.2 Sistema radicular

Segundo Mozambini et al (2006), cerca de 85% das raízes da cana-de-açúcar encontram-se nos primeiros 50 cm e aproximadamente 60% entre os 20 a 30 cm de profundidade. Gonçalves (2006) afirma que 70 a 80% das raízes localizam-se nas camadas superficiais de 40 a 45 cm de profundidade e na profundidade de 0 a 20 cm encontram-se 62% do sistema radicular da cana-de-açúcar. Demattê (2005) destaca que o padrão normal da distribuição das raízes da cana-de-açúcar localiza-se nos primeiros 20 cm do solo e que a utilização de cálcio, via fornecimento de gesso, promoveu melhor distribuição das raízes de cana, com percentuais de 36%, 36,7% e 19% nas camadas de solo de 0 a 26, 26 a 75 e 100 a 150 cm, respectivamente.

O desenvolvimento das raízes tem relação importante com as alterações na estrutura e, conseqüentemente, decréscimo da porosidade, da macroporosidade, da disponibilidade de água e nutrientes e da difusão de gases em solos compactados (TAYLOR; BRAR, 1991). Nesses solos, segundo Hakansson et al. (1998), o menor desenvolvimento do sistema radicular resulta em menor volume de solo explorado pelas raízes e, conseqüentemente, menor absorção da água e nutrientes disponíveis. Segundo Queiroz-Voltan et al. (2000), além da quantidade de oxigênio na rizosfera poder ser limitante aos processos metabólicos, o desenvolvimento de novas raízes, responsáveis pela absorção de água e nutrientes, fica prejudicado.

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais afetadas pela alteração das condições físicas do solo, uma vez que, em decorrência da colheita mecanizada, a compactação pode promover reduções superiores a 50% no volume de macroporos do solo. Por sua vez, essa alteração estrutural pode comprometer a sustentabilidade dessa atividade agrícola, pois essa classe de poros

determina a taxa de percolação de água no solo (SEVERIANO et al., 2012; LIMA et al., 2013b; OLIVEIRA et al., 2013).

A cana-de-açúcar necessita de solos profundos e permeáveis para pleno desenvolvimento do seu sistema radicular. Pesquisas têm revelado que a compactação do solo afeta seu desenvolvimento quando da localização de suas raízes no perfil de menor porosidade do solo. Solos rasos, isto é, com camada impermeável superficial ou mal drenados, não devem ser indicados para a cana-de-açúcar (FERNANDES et al., 1980).

A obtenção de maior desenvolvimento da cana-de-açúcar necessita de observação do ambiente de produção para a cultura, no qual devem ser considerados atributos químicos, biológicos e a qualidade física do solo. A cana é uma das culturas mais atingidas pela compactação do solo, devido à utilização de máquinas e implementos agrícolas de grande porte e à grande necessidade de mobilização do solo para seu cultivo (STOLF, 1983).

2.1.3 Aspectos agronômicos

A qualidade da cana-de-açúcar pode ser definida por características intrínsecas da planta, que podem ser alteradas pelo manejo agrícola e industrial, fatores esses que definem seu potencial para a produção de açúcar e álcool (FERNANDES, 2000 citado por LAVANHOLI, 2008).

No campo, avaliações como a contagem de perfilhos e a pesagem dos colmos em parcelas definidas estimam o estande (população de plantas) e a massa de cana-de-açúcar, respectivamente. Como matéria prima, entendem-se, colmos industrializáveis e impurezas vindas do campo que ao chegar à usina, realiza-se uma amostragem sistemática dessa matéria prima que é submetida a avaliações de seus parâmetros tecnológicos. Os parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar são características que determinam o potencial de produção de açúcar e álcool e podem ser considerados como componentes para obtenção do preço da cultura, pois pelos valores determinados obtém-se o potencial produtivo da usina e o pagamento do produtor (LAVANHOLI, 2008).

No sistema de remuneração de cana implantado no estado de São Paulo desde a safra de 1998/99 e, seguido pelo estado de Goiás, utiliza-se do ATR que representa a quantidade de açúcares totais recuperáveis da cana descontando-se o xarope (FERNANDES, 2000).

Outro parâmetro tecnológico importante é a Pol, que se refere à porcentagem aparente de sacarose em uma solução de açúcares (caldo), determinada por polarímetros ou sacarímetros. O teor de sacarose está diretamente relacionado com a maturação da cana-de-açúcar, que em seu colmo maduro apresenta proporções diferentes de açúcares, em destaque para a glicose e a frutose

no colmo verde e a sacarose no colmo maduro. Em plantas maduras a Pol corresponde de 14 a 24% dos açúcares totais (LAVANHOLI, 2008).

Já o Brix mede o teor de sólidos solúveis na solução, ou seja, a porcentagem aparente de sólidos solúveis contidos em uma solução açucarada impura, determinada por refratometria ou por densidade da solução. Esse atributo mantém uma relação direta com o teor de açúcares no caldo e varia de 18 a 25% (FERNANDES, 2000).

A pureza é outro atributo, calculado pela porcentagem de sacarose contida nos sólidos solúveis e evidencia relações sempre menores que 1, pois reflete a relação entre o teor de sacarose e os demais sólidos solúveis (FERNANDES, 2000). Quanto maior a pureza da cana, melhor a qualidade da matéria-prima para se recuperar açúcar, que segundo Ripoli e Ripoli (2004), o valor de pureza deve ser maior que 85%.

A fibra, matéria insolúvel, resultado da avaliação da matéria prima determinada no bolo de bagaço úmido, é o que confere resistência ao tombamento e à penetração de pragas nas variedades com maiores proporções e tem sua importância no âmbito da cogeração de energia quando empregada na queima em caldeiras da própria usina ou na venda do material excedente (FERNANDES et al., 2000). Segundo Scapari e Beauclair (2008), a porcentagem de fibra varia de 9 a 20 % durante a safra.

Durante a maturação, existem variações no teor de sacarose e no PUI (período útil de industrialização) que definem o momento onde a planta apresenta condições tecnológicas adequadas para a industrialização. Esse se inicia quando há 12% de sacarose na cana e encerra-se quando o valor ultrapassa 16% (LAVANHOLI, 2008).

2.1.4 A variedade IACSP 955000

Desenvolvida pelo Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar do Instituto Agrônomo de Campinas, SP - IAC, a variedade IACSP 955000, tem como características produtividade agrícola muito alta, sendo indicada para ambientes favoráveis (A1 – C2), apresenta porte muito ereto, ótima brotação de soqueira, apresentando bom perfilhamento e fechamento de entrelinhas, não apresentando tombamento e florescimento, e ainda apresentando resistência as principais doenças. A época de corte recomendada para essa variedade é entre junho e outubro, se necessário deve se fazer uso de maturadores, para plantios em ambientes de produção com restrições baixas (SOCICANA, 2011).

2.2 A qualidade do solo

O solo pode ser considerado a base de sustentação dos sistemas agrícolas. Assim, perdas nas suas propriedades, que reduzam a capacidade de sustentar o crescimento vegetal ou que impliquem riscos ambientais, causam impacto negativo muito significativo ao setor do agronegócio. Por outro lado, a melhoria do ambiente edáfico tem efeitos positivos sobre todo o ambiente, revestindo de grande importância o conhecimento da qualidade do solo e sua quantificação via indicadores físicos, químicos e biológicos. A agregação e a compactação são dois processos importantes que também ocorrem nos solos agrícolas e que têm grande relação com a qualidade. Sua avaliação, por meio de indicadores, associada a informações sobre crescimento vegetal e aspectos ambientais, especialmente aqueles relacionados à erosão dos solos, podem ser úteis para o estabelecimento de uma agricultura sustentável. Os atributos físicos relacionados à qualidade do solo referem-se às condições que permitem a infiltração, a retenção e a disponibilização de água para as plantas, proporcionando as trocas de calor e de gases com a atmosfera e as raízes das plantas e possibilitando o crescimento das raízes (REICHERT et al., 2003).

O comportamento físico do solo está intrinsecamente relacionado com características de seu espaço poroso, especialmente no que se refere à distribuição do tamanho dos poros, sua continuidade no perfil do solo e sua estabilidade no tempo. A distribuição do tamanho dos poros e sua continuidade no perfil são determinadas, basicamente, pela textura e pela estrutura do solo, ao passo que a estabilidade está relacionada com a consistência do solo. Agregação é uma característica física importante em relação às funções do solo. A agregação influencia a porosidade, a infiltração e retenção de água, a resistência do solo à compactação, acarretando reflexos indiretos no desenvolvimento e produtividade das culturas (LYNCH & BRAGG, 1985; BAUMGARTL & HORN, 1991). A matéria orgânica é um dos principais componentes do solo que influencia a formação e a estabilização dos agregados (HARRIS et al., 1966; LYNCH & BRAGG, 1985; BRONICK & LAL, 2005) e o entendimento do seu papel na agregação é fundamental na definição de estratégias sustentáveis de manejo do solo, principalmente visando à manutenção da qualidade do solo em regiões tropicais e subtropicais (NEUFELDT et al., 1999).

2.2.1 Tráfego de máquinas

As forças externas de compactação são representadas pelo tráfego de veículos, animais ou pessoas e pelo crescimento de raízes, que forçam sua passagem entre as partículas do solo,

aproximando-as; as forças internas são representadas pelos ciclos de umedecimento e secagem, congelamento e degelo, expansão e contração da massa do solo (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

A mecanização em áreas agrícolas é uma das principais causas da compactação dos solos, tanto pelo revolvimento de camadas do perfil como pelo tráfego de máquinas em operações de preparo, plantio, tratos culturais, colheita, nas quais o pouco tempo disponível para a operação exige o uso de máquinas cada vez maiores e mais pesadas. Isso altera a estrutura do solo, a qual rege as relações entre ar, água e temperatura, que influenciam a germinação, a emergência das plantas, o crescimento radicular e praticamente todas as fases do crescimento e desenvolvimento vegetal e, conseqüentemente, a produtividade (FLOWERS; DE MARIA et al., 1999; REICHERT et al., 2007).

Quando o solo é compressível ou as tensões são grandes o suficiente para a compactação ocorrer, passagens repetidas de veículos aumentam a compactação do solo (KIRBY et al., 1997). A primeira passagem de uma roda causa percentual aumento da compactação (COOPER et al., 1969); contudo, os efeitos da compactação ainda podem ser observados após repetidas passagens de veículos (BAKKER; DAVIS, 1995; HAMZA; ANDERSON, 2005). Segundo Horn; Lebert (1994), além de pressões estáticas, a compactação é causada por forças dinâmicas, como a vibração do trator arrastando implementos e a patinagem dos pneus.

2.2.2 Densidade do solo

A densidade do solo ou densidade aparente, definida como o quociente da massa de sólidos secos por seu volume total, descreve o estado da estrutura do solo. A densidade do solo é afetada por cultivos que alteram a estrutura e, conseqüentemente, a orientação e volume dos poros. Klein (2002) ressalta que estas alterações afetam propriedades físico-hídricas importantes, como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração.

Para autores como Beltrame e Taylor (1980), as causas das alterações na densidade dos solos são naturais, difíceis de serem definidas e avaliadas, agindo lentamente no solo, tais como, as forças mecânicas causadas pelas máquinas e implementos agrícolas.

A densidade do solo é influenciada pela textura do solo (BUENO & VILAR, 1998; REICHARDT & TIMM, 2004; LIBARDI, 2005), solos arenosos apresentam densidade superior ao solo argiloso, enquanto que os solos siltosos apresentam comportamento intermediário. A densidade dos solos arenosos pode variar de 1,3 a 1,8 g.cm⁻³, enquanto os solos argilosos esta

variação pode ir de 0,9 a 1,6 g.cm⁻³ e de 0,2 a 0,6 g.cm⁻³ para solos orgânicos. Para a densidade máxima do solo, Klein et al. (2004) apresenta em um solo argiloso (0,66 g.g⁻¹) a densidade de 1,55 g.cm⁻³, enquanto um solo arenoso (0,32 g.g⁻¹) foi de 1,77 g.cm⁻³. A determinação de um valor crítico de densidade do solo no qual o crescimento de raízes é prejudicado tem sido defendido por Thompson et al., (1987) e Hakansson; Voorhees (1997), como o melhor parâmetro físico que caracteriza o crescimento de raízes em solos compactados.

O aumento da densidade do solo provoca redução no volume de poros, que pode comprometer a respiração das raízes, dificultando e/ou diminuindo sua penetração no solo. Além disso, a maior densidade tende a aumentar a resistência do solo à penetração e o desenvolvimento das raízes, podendo comprometer a produtividade agrícola. A relação entre resistência à penetração e densidade do solo é afetada principalmente pela textura e teor de água do solo (LETEY, 1985; DEXTER, 2004; LIMA et al., 2009).

Um solo que apresenta densidade acima de 93% da densidade máxima obtida pelo ensaio do Proctor limita o desenvolvimento de área foliar em solos franco-argilo-arenosos, ao passo que em solo muito argiloso o ponto ótimo de desenvolvimento de área foliar corresponde a 91% daquela densidade (SATO et al., 2011). Outros pesquisadores sugerem, porém, que a densidade do solo não é o fator mais limitante ao crescimento radicular, mas sim a resistência que o solo oferece ao crescimento das raízes, determinada por um penetrômetro (VOORHEES, 1983).

Em estudos comparativos entre os sistemas de plantio direto e convencional Silva et al. (2000) ressaltam que a maior quantidade de matéria orgânica e atividade biológica na superfície de solos sob plantio direto pode ser mais favorável ao crescimento e desenvolvimento de plantas, mesmo com densidade do solo igual ou maior do que se cultivados convencionalmente.

Na cultura da cana-de-açúcar, densidades do solo muito altas podem comprometer a respiração das raízes e exercer resistência ao seu desenvolvimento (LIMA et al., 2009). O maior prejuízo ao desenvolvimento do sistema radicular ocorre quando a densidade do solo aumenta na camada superficial, pois esta cultura tem maior exploração nutricional na camada arável do solo. A compactação afeta mais o desenvolvimento da cultura se suas raízes se localizam no perfil de menor porosidade do solo (FERNANDES et al., 1980).

2.2.3 Compactação do solo

Segundo Reichert et al. (2007), a compactação do solo é um problema antigo e intensificou-se com a modernização da agricultura, principalmente pelo uso de máquinas e implementos agrícolas cada vez maiores e mais pesadas. Atualmente, a compactação do solo é

considerada um problema multidisciplinar, em que máquina, solo, cultura e tempo interagem, impondo condições as quais podem ter consequências econômicas e ambientais no mundo da agricultura (SOANE, 2000).

Compactação é o ato ou ação de forçar a agregação das partículas do solo, reduzindo, desta forma, o volume por elas ocupado. Ela pode ser descrita em termos da tensão aplicada no solo e das mudanças resultantes em suas condições. As mudanças que ocorrem nas propriedades físicas do solo incluem: aumento da densidade do solo; decréscimo do volume de macroporos; infiltração e movimento interno de água mais lentos; aeração mais pobre e maior resistência mecânica do solo ao crescimento de raízes (SEIXAS, 1998). Para Lima et al. (2009), há evidências claras de que a compactação do solo causa problemas na produção agrícola. Esses problemas são evidenciados na agricultura, horticultura e florestas em regiões de clima temperado e tropical.

Conforme Curi et al. (1993), a compactação do solo é a diminuição do volume do solo ocasionada por compressão, acarretando reorganização mais densa das partículas do solo com consequente redução da porosidade, ao passo que adensamento é a redução natural do espaço poroso com consequente aumento da densidade de camadas ou horizontes do solo por dessecação, iluviação ou precipitação química. Para os autores, a compactação é resultado da ação antrópica, ao passo que o adensamento é fenômeno natural.

A susceptibilidade do solo à compactação é função de fatores como teor de água e textura os quais influenciam o comportamento do solo, quando submetido a pressões externas, por meio do atrito entre as partículas e tipo de ligação entre elas. Em geral, quanto maiores as partículas do solo, menor sua compressibilidade e agregação (HORN; LEBERT, 1994; MACEDO et al., 2010).

As causas da compactação também são classificadas como externas, caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência da carga aplicada, ou como internas, influenciados pela história de tensão, umidade, textura, estrutura e densidade inicial do solo (LEBERT ; HORN, 1991; DIAS JÚNIOR, 1994).

Segundo Kopi; Douglas (1991), a estrutura do solo ideal ao crescimento das plantas está relacionada a uma grande área de contato entre o solo e a raiz, espaço poroso suficiente para o movimento de água e gases e baixa resistência do solo à penetração das raízes. O solo é adequado para o crescimento das raízes quando dispõe de quantidade adequada de umidade, é bem arejado e não oferece impedimento ao crescimento das raízes.

2.2.4 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração de raízes, entendida no meio agrícola como o impedimento que o solo oferece ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, é uma propriedade física do solo que influencia diretamente o potencial de crescimento das raízes e na parte aérea das plantas (WEAICH et al., 1992). A resistência do solo à penetração é o atributo físico do solo mais usado atualmente como indicativo da compactação do solo, de fácil e rápida determinação, sendo útil para estimar o grau de compactação, bem como para localizar camadas de solo compactadas (ROQUE et al., 2008; COLET et al., 2009).

Passioura (1991) e Russel; Goss (1974) sugerem investigar a resistência do solo à penetração máxima suportável, a fim de que não haja prejuízos à produção agrícola. Entretanto, a indicação de valores críticos de resistência do solo à penetração para o desenvolvimento de raízes tem recebido diversas restrições originadas principalmente do fato de a resistência do solo à penetração ser influenciada pela umidade, densidade e textura do solo (BUSSCHER, 1990; PABIN et al., 1998).

Torres & Saraiva (2001) frisam importância de se realizar esta avaliação em diferentes umidades do solo. Oliveira et al (2007), executando teste de penetrometria em um Latossolo Vermelho argiloso caulinítico – oxídico em condições de umidade no ponto de murcha permanente e na capacidade de campo, encontrou resistência a penetração de raízes superiores a 2,5 MPa para o solo com umidade no ponto de murcha permanente e valores de no máximo 2,32 MPa para o solo com umidade na capacidade de campo. A resistência do solo a penetração de raízes superior a 2,5 MPa é considerada limitante para o desenvolvimento adequado das plantas cultivadas (TORRES & SARAIVA; 2001), enquanto valores menores que 2,32 MPa não são considerados restritivos ao melhor desenvolvimento das plantas cultivadas (CAMARGO & ALLEONI, 1997). Tal discrepância entre os valores de resistência à penetração, encontrada para solo úmido e seco, confirma a necessidade de se analisar conjuntamente a umidade do solo no momento da realização do teste de penetrometria.

Há uma tendência de que os valores do teste de penetrometria se igualem quando a umidade do solo estiver próximo da capacidade de campo (OLIVEIRA et al; 2007), especialmente nas menores profundidades, sugerindo que, talvez, este não deva ser o único momento para se diagnosticar possíveis valores limitantes ao crescimento radicular das plantas, conforme vem sendo estabelecido (IMHOFF et al., 2000; TORMENA et al., 2004; BEUTLER et al., 2004).

O efeito do impedimento mecânico sobre o desenvolvimento radicular é dependente das características pedológicas e das práticas de manejo a que o solo é submetido (LIMA et al., 2009),

como no caso do efeito de máquinas sobre a compactação do solo que tem sido caracterizado por meio da resistência do solo à penetração (STRECK et al., 2004). A importância da resistência do solo à penetração na identificação de camadas compactadas do solo foi destacada por Genro Junior et al. (2004).

Acréscimos da resistência do solo à penetração aumentam a energia necessária para o desenvolvimento das raízes das plantas e diminuem a elongação e o crescimento radicular (LIPIEC; HATANO, 2003). Nesse sentido, Taylor et al. (1966) encontraram maior correlação do crescimento radicular com a resistência do solo à penetração ($r^2 = -0,96$) do que com a densidade do solo ($r^2 = -0,59$). Por outro lado, Thompson et al. (1987) observaram boa relação entre densidade radicular e resistência à penetração medida pelo penetrômetro ($r^2 = 0,65$), mesmo não acontecendo o crescimento das raízes no solo em uma única direção.

A resistência do solo à penetração é influenciada pela textura, tipo de mineral de argila, densidade, condição estrutural e pelo conteúdo de água no solo (TARDIEU, 1994; GOMES; PEÑA, 1996). Em geral, a maior resistência de um solo se manifestará quanto mais seco e/ou mais denso ele se apresentar. Entretanto, para uma mesma umidade, um solo argiloso apresenta maior resistência do que um solo arenoso (BUSSCHER, 1990; CANARACHE, 1990; PABIN et al., 1998). Apesar disso, a medida da resistência à penetração não é capaz de identificar e incorporar o efeito de rachaduras e poros biológicos existentes no solo; todavia são nessas regiões de menor resistência que as raízes crescem mais, mesmo em solos com elevada resistência à penetração (SILVA et al., 2003).

A acentuada variabilidade espacial da resistência à penetração de um solo compactado é determinada principalmente pelo teor de água e densidade do solo. A resistência do solo também varia em função da profundidade: geralmente ela aumenta até atingir um pico em determinada profundidade (RAPER; KIRBY, 2006).

Tendo em vista que o desenvolvimento radicular das plantas só é possível quando a pressão de crescimento das raízes for maior do que a resistência mecânica do solo à penetração. De acordo com Materechera et al. (1992), a resistência mecânica do solo causa aumento do diâmetro das raízes na camada compactada por provocar modificações morfológicas e fisiológicas, específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem.

Taylor et al. (1966); Materechera et al. (1992) afirmam que os níveis críticos de resistência à penetração para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e a espécie cultivada. Contudo, o valor de 2,0 MPa tem sido aceito como o limite crítico de resistência mecânica do solo à penetração, tendo sido demonstrado, em condições controladas, que a

resistência do solo à penetração acima desse valor é restritiva e/ou impeditiva ao crescimento das raízes e da parte aérea das plantas (TAYLOR et al., 1966; NESMITH, 1987; SILVA et al., 2003).

Existe uma amplitude de valores de resistência do solo à penetração considerados críticos ao desenvolvimento das plantas. Entre outros estudos, Canarache (1990), Torres; Saraiva (2001) e Souza et al. (2006), consideram críticos ao crescimento radicular das plantas valores de resistência do solo à penetração entre 1,5 a 3,0 MPa; valores ratificados por Sene et al. (1985), que obtiveram 2,5 MPa para solos argilosos; porém, para solos arenosos, os valores críticos correlacionados ao desenvolvimento de raízes estavam entre 6,0 e 7,0 MPa.

Existem indicações de que uma redução de 40% do comprimento radicular é crítica à produtividade das plantas (PABIN et al., 1998); entretanto, Cintra; Mielniczuk (1983) e Silva et al. (2000) encontraram redução de 50% no comprimento radicular de várias culturas, quando a resistência à penetração foi de 1,1 MPa, em um latossolo roxo, muito argiloso, indicando possível redução da produtividade das plantas.

Para a cana-de-açúcar, valores de resistência do solo à penetração de até 2,5 MPa são considerados baixos e apresentam pouca limitação ao desenvolvimento das raízes; entretanto, valores a partir de 5,50 MPa são considerados altos e representam sérias limitações ao desenvolvimento do sistema radicular (CAMARGO & ALLEONI; 1997).

Uma escala para classificar os valores de resistência do solo à penetração para a cana-de-açúcar foi desenvolvida por Ribeiro (2010), seguindo indicações de Torres; Saraiva (2001), Roque et al. (2003) e Taylor et al. (1966); nessa escala, valores de 0 a 2 MPa foram considerados baixos, sem impedimento ao crescimento da planta; de 2 a 4 MPa seriam moderados, ou seja, começam a causar impedimentos ao crescimento da planta; valores de 4 a 6 MPa foram classificados como altos, pois oferecem impedimento ao crescimento radicular; e por fim a faixa com valores de resistência do solo à penetração acima de 6 MPa, recebeu a classificação de muito alta.

Estudo conduzido por Silva Júnior (2001), sobre a variabilidade espacial da resistência à penetração em um Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com milho constatou tendência de decréscimo da produtividade com o aumento da resistência à penetração em todas as camadas estudadas, a qual variou entre 1,5 e 2,5 MPa, na área. A redução em 23 % na produtividade de milho em perfis com horizonte A raso de um Argissolo Vermelho, quando comparado aos perfis com horizonte A profundo, foi atribuída por Albuquerque; Reinert (2001), à restrição imposta ao crescimento radicular no horizonte B.

Rosolem et al. (1999) observaram crescimento radicular do milho mesmo com 2 MPa de resistência à penetração, na camada de solo compactado, e ressaltaram a necessidade de relacionar

a resistência mecânica do solo à penetração com a aeração e com o potencial matricial de água do solo, para melhor compreender as restrições causadas pela compactação.

Para se conseguir uma boa relação entre a densidade do solo, resistência à penetração e crescimento radicular, Bauder et al. (1981) e Henderson (1989) recomendam que a resistência mecânica do solo à penetração seja medida em umidades próximas à capacidade de campo, sendo sua influência maior em solos mais argilosos (BEUTLER et al., 2007; ROSOLEM et al., 1999).

Apesar da recomendação geral de se avaliar a resistência à penetração quando o solo apresenta-se com teor de água próximo à capacidade de campo, autores como Bauder et al. (1981); Lowery; Morrison (2002); Klein et al. (1998) não recomendam que a determinação seja feita apenas nessa condição, pois grandes variações de densidade poderão não ser detectadas.

2.2.5 Porosidade do solo

A porosidade é definida por Klein (2002) como a fração volumétrica do solo ocupada com ar e/ou água, representando o local onde circulam água, nutrientes e ar. É o local onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e solução do solo Hillel (1998). A porosidade do solo é originada do arranjo aleatório das partículas sólidas, o qual condiciona o comportamento físico-hídrico do solo (GUERIF, 1987).

A compactação ocasiona redução dos poros no solo e o efeito negativo dessa redução sobre o desenvolvimento das plantas, segundo Stepniewski et al. (1994), ocorre por deficiência na difusão de gases junto ao sistema radicular das plantas. Alguns desses efeitos são o fechamento dos estômatos, murchamento das plantas, necrose das raízes, obstrução do xilema à água e desequilíbrio nutricional e hormonal das plantas (SOJKA, 1992).

O aumento na densidade do solo e da resistência mecânica é acompanhado pela diminuição da porosidade total, do tamanho e da continuidade dos poros (MORAES, 1984; ROSA JÚNIOR, 1984; SILVA et al., 1986). Em geral, segundo Hillel (1998), reduções significativas ocorrem principalmente nos volumes dos macroporos. Conforme Kertsmann (1996), a diminuição na macroporosidade faz com que a água que fica retida nos microporos atinja altas tensões, tornando-se indisponível às plantas.

A determinação de limites mínimos para a porosidade de aeração é bastante complexa (Klein, 2002), contudo Tormena et al. (1996) afirmam que valores abaixo de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de poros sem ar impedem o desenvolvimento pleno do sistema radicular das plantas. Para Kiehl (1979) um solo ideal para a produção agrícola deve apresentar $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade total, sendo $1/3$ macroporos e $2/3$ microporos. Ainda de acordo com o autor, a maioria das plantas desenvolve

satisfatoriamente seu sistema radicular quando o volume de macroporos está acima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Existe uma estreita relação entre a porosidade do solo e o crescimento radicular, com maior crescimento de raízes onde há maior número e continuidade de macroporos (HATANO et al., 1988). As raízes diminuem de diâmetro para penetrar pequenos poros, pois a resistência mecânica do solo estimula a proliferação de raízes laterais, as quais são mais finas (RUSSEL; GOSS, 1974).

A compactação do solo é um fator limitante para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar, pois causa alteração na porosidade do solo e reduz drasticamente a quantidade de água disponível, podendo reduzir a produtividade em mais de 30%. Essa alteração na porosidade tem reflexo direto em outras propriedades do solo, como a redução das trocas gasosas e o favorecimento do encharcamento temporário, que reduz a infiltração e altera a absorção de nutrientes (LIMA et al., 2009).

2.2.6 Matéria orgânica do solo

Segundo Reichardt & Timm (2004), a matéria orgânica no solo é a parte da fração sólida constituída de compostos orgânicos de origem vegetal e animal, em seus mais variados graus de transformação. O seu conteúdo, na maioria dos solos, varia entre 1 e 10 % e possui também elevada superfície específica.

A matéria orgânica tem implicações sobre o comportamento físico do solo, quer seja por atuar diretamente sobre alguns de seus processos físicos, quer seja por seus efeitos indiretos. Os efeitos diretos devem-se, basicamente, às propriedades da matéria orgânica do solo que influenciam alguns fenômenos físicos e químicos no solo, dentre as quais se destacam a elevada área superficial específica e a grande quantidade de cargas superficiais (BRAIDA et al, 2011)

Segundo o mesmo autor, indiretamente, a matéria orgânica interfere no comportamento físico do solo por seus efeitos sobre a agregação e consistência do solo, atuando na formação de agregados e, portanto, na distribuição do tamanho de poros, bem como na sua estabilidade.

A textura do solo interfere em várias propriedades do solo, entre elas estão a densidade (DIAS JUNIOR & MIRANDA, 2000), a resistência mecânica do solo à penetração (RIBON & TAVARES FILHO, 2004), a porosidade, a retenção de água (TOGNON et al., 1998) e a disponibilidade de nutrientes (ANGHINONI & MEURER, 2004).

O principal atributo físico do solo afetado pela matéria orgânica é a agregação do solo. A partir do efeito da matéria orgânica sobre a agregação, indiretamente são afetadas as demais propriedades físicas do solo (BAYER & MIELNICZUK, 1999).

A agregação do solo promove maior proteção física da matéria orgânica no solo, proporcionando aumento na estabilidade de agregados. A quebra dos agregados do solo expõe a matéria orgânica à atividade microbiana, reduzindo o conteúdo de carbono orgânico do solo (COSTA et al., 2004).

O sistema de manejo afeta muito pouco o teor de matéria orgânica no solo, como constatou Freixo (2000), em Passo Fundo – RS, identificando diferença apenas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de solo, onde o sistema plantio direto superou o sistema plantio convencional. As perdas de carbono nas áreas cultivadas são em torno de 10% do seu estoque em comparação com solos sob mata, porém não foram encontradas diferenças entre os sistemas de preparo.

Silveira & Cunha (2002) encontraram que, em plantio direto, os maiores valores de matéria orgânica encontram-se na camada de 0-5 cm em relação a 5-20 cm, caracterizando maior variabilidade dessa propriedade em profundidade. Por outro lado, com o uso de arado verificou-se maior uniformidade dos valores da matéria orgânica entre as camadas de solo.

2.3 Agricultura de precisão

A agricultura de precisão (AP) compreende no conjunto de técnicas e metodologias que visam aperfeiçoar o manejo de cultivos e a utilização dos insumos agrícolas, proporcionando máxima eficiência econômica. Técnicas de gerenciamento agrícola baseadas na variação espacial de propriedades do solo e das plantas em lavouras, visando a otimização do lucro, sustentabilidade e proteção do ambiente. Na AP existem várias abordagens, mas o objetivo principal é utilizar estratégias para resolver os problemas da desuniformidade das lavouras e se possível tirar proveito dessas desuniformidades. Hoje no Brasil, as soluções existentes são focadas na aplicação de fertilizantes e corretivos em taxas variáveis, no entanto, a AP trata-se de um sistema de gestão que considera a variabilidade espacial da lavoura em todos os aspectos desde a produtividade, atributos físico-químico do solo, compactação, infestação de plantas daninhas, doenças e pragas (MOLIN, 2009).

Segundo o mesmo autor citado, dentro das estratégias existem duas abordagens: uma mais simples relacionada com o manejo da fertilidade do solo com base em amostragens georreferenciadas, estratégia de iniciação dos usuários, especialmente no Brasil com grãos ou produtividade de colmos de cana-de-açúcar normalmente em busca de economia de insumos.

Outra é mais ampla e elaborada, e que leva em consideração a produtividade das culturas a fim de repor os nutrientes extraídos. Essa abordagem exige a elaboração de mapas de produtividade e demanda mais equipamentos, trabalho, tempo e maior domínio por parte do usuário devido à necessidade de interpretação dos dados da variabilidade presente nas lavouras, evidenciada pelo mapa de produtividade, que sugere uma relação de causa e efeito, utilizando-se dos conceitos agrônômicos. Outro olhar sobre o assunto refere-se ao objetivo do usuário, uma abordagem que pode ser a busca por aumento de produtividade e a outra na redução do consumo de insumos.

É importante lembrar que isso só funcionará se houver quem saiba gerenciar o sistema. Contudo, tal prática depende de dedicação e organização principalmente no que diz respeito aos dados gerados que devem ser cuidadosamente armazenados e analisados. No caso da cultura da cana-de-açúcar, no Brasil já há solução comercial tanto para a colheita mecanizada como para o corte manual (MOLIN, 2009). Na estratégia da amostragem deve-se definir a distância entre amostras, que tem importância preliminar nos conceitos geoestatísticos que posteriormente permitem a investigação da distância ideal, portanto a densidade amostral adequada.

2.4. A geoestatística na pesquisa agrônômica

Entre os fatores de produção responsáveis pela variabilidade espacial da produtividade das culturas, os atributos físico-químicos do solo assumem grande importância, pois, em muitos casos, não variam no espaço e no tempo ao acaso, mas de acordo com uma continuidade aparente ou dependência espacial (CORÁ; BERALDO, 2006).

Por outro lado, as variações espaciais dos atributos físico-químicos do solo podem ser avaliadas por técnicas geoestatísticas, que verificam a relação entre as várias amostras de uma mesma área, usando-se o estudo de variáveis regionalizadas (SILVA; CHAVES, 2001). A geoestatística também estuda a variabilidade espacial dos atributos da planta, auxiliando na escolha, locação de experimentos e interpretação dos resultados. Seu uso requer a coleta de amostras previamente planejadas, com a localização espacial exata de cada ponto amostral.

2.4.1. Semivariograma

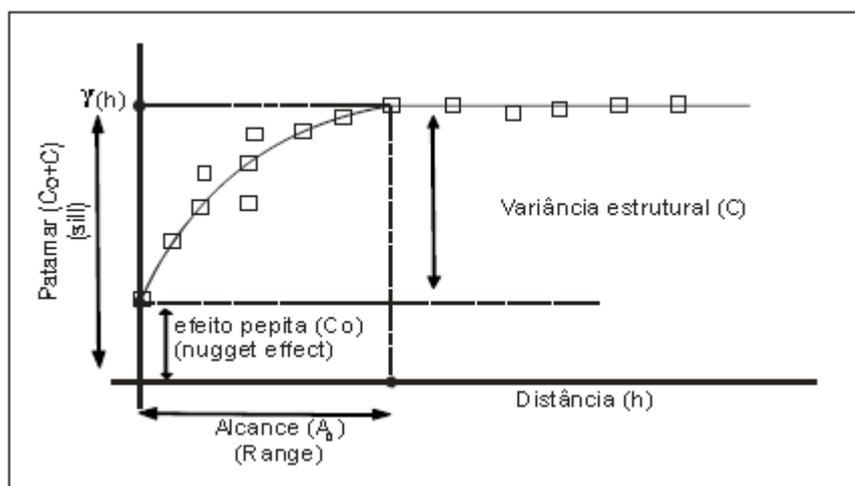
Um dos métodos mais antigos de se estimar a dependência no espaço ou no tempo de amostras vizinhas é pelo uso da autocorrelação. Porém, quando as amostras são referenciadas espacialmente para a interpolação entre locais medidos será necessária para a construção de mapas de isolinhas, uma ferramenta mais adequada para medir a dependência espacial. Essa ferramenta é

o semivariograma (VIEIRA et al., 1983). O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de mapeamento por krigagem, permitindo representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (EMBRAPA, 2004) ou no tempo, definido por três parâmetros: o efeito pepita (**C0**), o patamar (**C0 + C**) e o alcance (**A0**). O semivariograma pode ser estimado por:

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

em que: **N(h)** é o número de pares experimentais de valores medidos **Z(xi)**, **Z(xi+h)**, separados pelo vetor **h**, e **Z** representa os valores medidos para atributos do solo ou da cultura. O gráfico de gama $\gamma^*(h)$ versus os valores correspondentes de **h**, chamado semivariograma, é uma função do vetor **h**, e, portanto depende de ambos, magnitude e direção de **h**. A Figura 1 apresenta o comportamento típico de um semivariograma que apresenta dependência espacial. Pontos próximos entre si são mais semelhantes do que pontos mais afastados.

Figura 1 - Exemplo de semivariograma



(GS⁺ 2004)

O efeito pepita (**C0**) é representado por um valor da semivariância, diferente de zero, quando a distância entre pontos amostrais é nula. Assim, representa aquela variância que não pôde ser detectada pelo semivariograma, seja pela necessidade de coletas amostrais a distâncias menores, seja pela ocorrência de um erro qualquer em alguma etapa do trabalho. O patamar (**C0 + C**) representa a distância na qual toda a semivariância da amostra é de influência aleatória, correspondendo à variância total, obtida pela estatística descritiva (TRANGMAR et al., 1985). O alcance (**A0**) da dependência espacial é o principal parâmetro fornecido pela geoestatística, representando a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são altamente

iguais entre si. Assim, valores de um atributo, localizados dentro da área cujo raio é igual ao seu valor, possuem entre si extrema semelhança em magnitude. Contudo, passam a assumir valores diferentes, maiores ou menores, somente para as distâncias estabelecidas a partir do seu valor. Seu conhecimento é de extrema importância à Agricultura de Precisão, uma vez que os programas computacionais o utilizam para, em função da inteligência artificial que o geoprocessamento desempenha via satélite, poder monitorar o trator agrícola, equipado com a semeadora/adubadora, e, assim, poder efetuar a distribuição de um determinado insumo com taxas variáveis no terreno (VIEIRA et al., 1991).

No ajuste dos modelos experimentais (linear, esférico, exponencial e gaussiano), que depende do atributo e da camada de solo analisada, são considerados: a) a menor soma dos quadrados dos desvios (**SQD**); b) o maior coeficiente de determinação (r^2) e c) o maior avaliador do grau da dependência espacial (**ADE**). O ajuste é validado pela técnica da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionará a melhor malha de krigagem. Para cada atributo é estimado o efeito pepita (**C0**), o alcance (**A0**) e o patamar (**C0+C**). A classificação da dependência espacial (**ADE**) pode ser realizada mediante sugestões de Dalchiavon et al. (2012), modificadas pelo GS+ (2004), conforme a seguinte expressão:

$$ADE = [C / (C + C_0)] \cdot 100 \dots \dots \dots (2)$$

onde: ADE é o avaliador da dependência espacial; C, a variância estrutural; e C+Co, o patamar.

A interpretação proposta para o ADE foi a seguinte: a) $ADE < 20\%$ = variável espacial de muito baixa dependência (MB); b) $20\% \leq ADE < 40\%$ = baixa dependência (BA); c) $40\% \leq ADE < 60\%$ = média dependência (ME); d) $60\% \leq ADE < 80\%$ = alta dependência (AL) e $80\% \leq ADE < 100\%$ = muito alta dependência (MA) (DALCHIAVON et al., 2012).

Por outro lado, sabe-se que a validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas que efetuam a krigagem. Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, são obtidos, por meio da interpolação por krigagem, os mapas de krigagem para a interpretação e o detalhamento da variabilidade espacial dos atributos pesquisados.

2.4.2. Interpolação dos dados por krigagem ordinária

Existem diversos métodos de interpolação dos dados: método da triangulação, método dos polígonos, método do inverso da distância, método do vizinho mais próximo e método da krigagem ordinária. Entretanto, a maioria desses métodos não fornece o algoritmo dos erros associados aos resultados obtidos, diferentemente do método geoestatístico da krigagem ordinária,

segundo um modelo contínuo de variação espacial. Pelo método da krigagem ordinária, determinando-se o semivariograma da variável e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar linearmente valores em qualquer posição na área de estudo, sem tendência e com variância mínima. Este é o método de interpolação dos dados mais utilizado no mapeamento dos atributos do solo (SCHLOEDER et al., 2001).

O estimador que permite estimar valores (z^*) para qualquer local (x_0), onde não se tem valores medidos é:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \dots \dots \dots (3)$$

em que: N é o número de valores medidos, $z(x_i)$, envolvidos na estimativa, e λ_i são os pesos associados a cada valor medido, $z(x_i)$.

Os resultados do estudo podem ser expressos em forma de mapa de isolinhas ou de superfície tridimensional. Porém, a maneira mais utilizada para representar a variabilidade espacial dos atributos do solo em uma área é por meio de mapas de isolinhas (CORÁ; BERALDO, 2006).

São definidos três tipos de mapas de isolinhas: mapas de condição, mapas de recomendação ou prescrição e mapas de desempenho. Os mapas de condição mostram a distribuição espacial dos parâmetros avaliados em uma determinada área, antes de qualquer intervenção. Mapas de recomendação são derivados de um ou mais mapas de condição e contêm informações sobre as quantidades necessárias de insumos e/ou práticas agrícolas que cada local específico da área deverá receber (manejo específico), respeitando a variabilidade dos atributos avaliados (mapas de condição), sendo a base para a tecnologia da aplicação em doses variáveis. O mapa de desempenho permite avaliar como a área se apresenta após o manejo específico, caracterizando-se também como mapa de condição para um próximo ciclo no contexto da agricultura de precisão. A precisão dos mapas depende de fatores como a intensidade e esquema da amostragem e da escolha do método de interpolação dos dados, por influenciarem na estimativa dos valores dos atributos do solo em locais não amostrados.

2.4.3. Semivariograma cruzado e co-krigagem

Em situações em que existe a correlação espacial entre dois atributos, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas expressas no semivariograma cruzado. Este método é chamado de cokrigagem, o qual pode ser mais preciso do que o da krigagem em si (VIEIRA, 2000).

A cokrigagem é uma técnica de avaliação geoestatística que permite estimar uma variável primária de interesse (ou de maior dificuldade de determinação) por intermédio de uma variável secundária (mais facilmente determinada). Para tanto, é necessário que exista a dependência espacial para cada uma e entre as variáveis **Z1** e **Z2**. Essa estimativa pode ser mais precisa do que a krigagem de uma variável simples (VAUCLIN et al., 1983), quando o semivariograma cruzado mostrar dependência entre as duas variáveis. A principal vantagem da cokrigagem é a sua utilização para estimar valores de uma propriedade do solo de difícil mensuração (p. ex. a condutividade hidráulica), com base em outra de medição mais fácil (p. ex. o teor de argila), desde que sejam correlacionadas espacialmente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local de origem dos dados

A área deste estudo localiza-se na Fazenda Campo Bom, nas coordenadas 18°35'39.53" S; 52°36'35.93" W, parte do conjunto de terras da Usina Cerradinho Bioenergia, situada no município de Chapadão do Céu, Goiás, Brasil. Segundo a classificação de Koeppen, o tipo climático da região é Aw, caracterizado como tropical de estação seca, com estação chuvosa no verão e inverno seco. A precipitação acumulada no período do plantio até a colheita foi de 1930 mm coletados na estação meteorológica da Cerradinho Bioenergia, instalada no Rio Prata, próxima a área em que o trabalho foi realizado (Figura 2). A temperatura média anual foi de 23,2 °C e déficit hídrico médio anual de 280,1 mm (ROLIM et al, 1998).

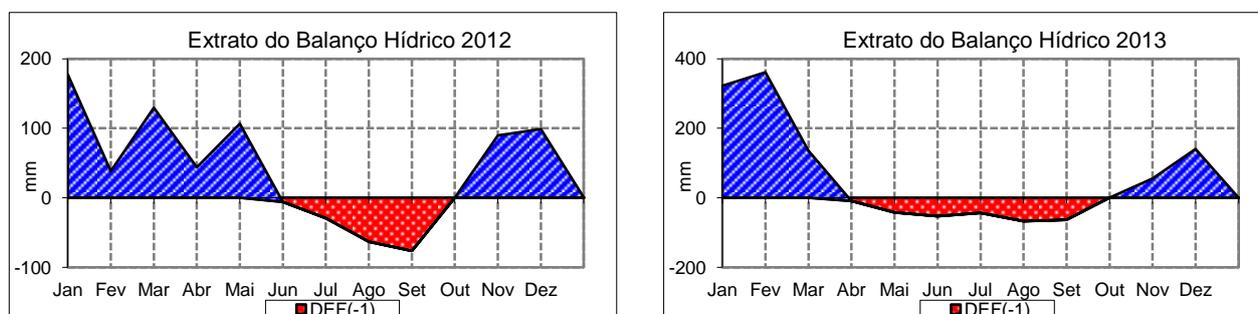


Figura 2 - Extrato do balanço hídrico de uma área na região de Chapadão do Céu

O solo da área experimental, classificado segundo preceitos da EMBRAPA (2013), é um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico textura argilosa, cujas características granulométricas estão apresentadas no Quadro 1. O solo possui capacidade de água disponível de 125,18 mm até 1,6 m de profundidade, conforme Richards (1947). A altitude local predominante é de 800 m, com relevo plano e declividade média inferior a 0,007 m.m⁻¹.

Quadro 1 – Caracterização granulométrica de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

Amostra	Profundidade (cm)	Argila (g.kg ⁻¹)	Silte (g.kg ⁻¹)	Areia grossa (g.kg ⁻¹)	Areia fina (g.kg ⁻¹)	Areia total (g.kg ⁻¹)
1A	0-25	550	100	130	220	350
1A	25-50	600	90	140	170	310
1B	0-25	570	100	130	200	330
1B	25-50	600	90	150	170	310
1C	0-25	550	120	130	200	330
1C	25-50	600	80	130	180	320
1D	0-25	550	110	140	200	340
1D	25-50	580	90	150	180	330

Para a implantação da cultura da cana-de-açúcar foi utilizada a variedade IACSP 955000, em área cultivada anteriormente com a cultura da soja. A área passou por dessecação prévia com glifosato na dose de 3,5 L ha⁻¹ do produto comercial, em seguida foi distribuído com taxa variável, o calcário dolomítico e o gesso agrícola e 1,0 t ha⁻¹ de fosfato natural reativo com dose fixa. Após a aplicação dos insumos foi feita a incorporação por meio de duas gradagens médias e uma niveladora, posteriormente foi realizado a subsolagem localizada, com uso de subsolador de cinco hastes de alcance de 0,5 m de profundidade.

O plantio do talhão foi executado no dia 22/10/2012, plantio de ano, no espaçamento entrelinhas de 1,50 m. No plantio mecanizado utilizou-se 500 kg ha⁻¹ do fertilizante 08-28-20, com 0,6% de Zn e 0,3% de B, 150 L ha⁻¹ condicionador de solos (ácidos húmicos), inseticida Fipronil na dose de 250 g ha⁻¹ e 0,5 L ha⁻¹ de fungicida Piraclostrobina. A adubação de cobertura foi realizada aos 45 dias após a brotação da cultura, com 120,0 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio. Para o controle de plantas invasoras foi aplicado 1,7 L ha⁻¹ de herbicida sulfentrazone e 1,6 L ha⁻¹ de herbicida clomazone em pré-emergência das plantas daninhas. Aos 60 dias após a brotação da cultura foi realizado o cultivo químico, junto com a operação de *quebra-lombo* onde o implemento corrige o desnivelamento da superfície do solo herdado da operação de plantio. Utilizou-se 4,0 kg ha⁻¹ de ácido bórico 19% e 1,8 kg ha⁻¹ do herbicida Tebuthiron. A maturação da cana-de-açúcar foi induzida aos 20 dias antes da colheita, utilizando-se 20 g ha⁻¹ de sulfometuron metil, aplicado com avião agrícola. Para a coleta de dados, a cultura encontrava-se no primeiro corte, com 12 meses no campo.

3.2 Implantação e caracterização da malha experimental

Distribuíram-se simetricamente 121 pontos amostrais de forma a cobrir toda área do talhão escolhido, cuja malha geoestatística teve 230 m x 228 m, representando então 5,244 ha (Figura 3). Suas coordenadas geográficas foram convertidas em coordenadas planas, com o eixo cartesiano Y coincidente à longitude, enquanto que, o X, à latitude. Cada ponto amostral representou um quadrado de 433,39 m², com o lado tendo em média 20,82 m. Para o posicionamento em campo, as coordenadas foram inseridas no aparelho GPS topográfico geodésico, com receptor Leica GS10 L1/L2, com projeção UTM (*universal transverse mercator*) e Datum SAD 69, na zona 22S, com precisão milimétrica devido à correção instantânea em duas fases, por meio da tecnologia RTK (*real time kinematic*).

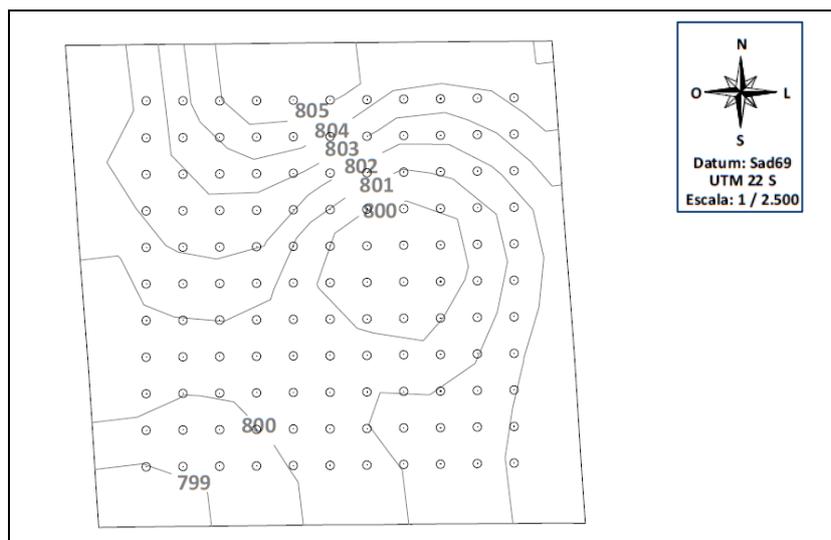


Figura 3 - Croqui da área amostral de instalação do trabalho

3.3 Coleta e metodologia de determinação dos atributos pesquisados

As amostragens foram realizadas em 21/10/2013. Para as coletas das amostras de plantas e solo trabalhado, foram definidas duas linhas de 3 m no sentido de plantio, totalizando uma área útil de 9 m² no entorno do ponto amostral, uma vez que o espaçamento entre linhas foi de 1,50 m. Para a obtenção do atributo população de plantas (STD), expresso em pl m⁻², utilizou-se uma trena para marcar 3 m lineares e assim executou-se a contagem do número de colmos industrialmente viáveis por ponto. Para a produtividade de colmos de cana-de-açúcar (PRO), expressa em t ha⁻¹, utilizou-se uma balança eletrônica portátil com capacidade de 100,00 kg (+/- 0,04 kg). Os colmos foram organizados em feixes, pesados e somando-se para a obtenção da massa de colmos por ponto. Após a coleta dos dados de PRO, em uma planilha Excel, realizou-se a extrapolação da área útil de 9 m² para 1 ha.

Os atributos tecnológicos trabalhados foram o teor de açúcares totais recuperáveis (ATR) em kg.t⁻¹, a porcentagem de sólidos solúveis totais (BRIX), a porcentagem de sacarose (POL), a porcentagem de pureza (PUR) e a porcentagem de fibras (FIB). Para tanto, tomaram-se 10 colmos industrializáveis, retirados em sequência nas duas linhas da área amostral, sendo seus feixes despontados, despalhados, numerados e encaminhados ao laboratório PCTS (Pagamento da Cana-de-açúcar pelo Teor de Sacarose) da Usina Cerradinho Bioenergia (CONSECANA, 2006).

Para a obtenção dos atributos físicos do solo, foram coletadas amostras indeformadas com o amostrador do tipo “Uhland”, via anel volumétrico, individualmente em cada ponto amostral, deslocados 0,20 m do centro da linha de plantio, nas profundidades de 0-0,25 m e 0,25-0,50 m, e dessas foram determinadas: densidade do solo (DS) (kg dm⁻³) umidade gravimétrica do

solo (UG) (kg kg^{-1}), umidade volumétrica do solo (UV) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e porosidade total do solo (PT) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Na mesma data foram coletadas amostras de solo deformadas nas profundidades de 0-0,25 e 0,25-0,50 m, para determinação do teor de matéria orgânica (MO) (g.dm^{-3}) e densidade da partícula (DP) (kg dm^{-3}). As profundidades coletadas e analisadas, para fins de discussão no presente trabalho serão denominadas: profundidade 1 ou 1ª profundidade, para a camada de 0 a 0,25 m e, profundidade 2 ou 2ª profundidade, para a camada de 0,25 a 0,50 m. Nesse contexto, as siglas dos atributos do solo foram acompanhados pelo número 1 quando analisadas e discutidas na 1ª profundidade e, pelo número 2 quando, na 2ª profundidade. As amostras foram acondicionadas em recipiente de alumínio, protegidas com papel alumínio e armazenadas na geladeira, visando evitar perda de água. A determinação dos indicadores físicos para estudo da qualidade do solo foi realizada no Laboratório de Solos da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campus Chapadão do Sul, segundo métodos descritos pela EMBRAPA (1997).

O teste de resistência do solo à penetração (RP) no campo foi efetuado utilizando-se penetrômetro eletrônico digital (penetrolog) da marca Falker, que é um instrumento destinado à agricultura de precisão e permite a obtenção de dados numéricos precisos à compactação das diferentes camadas de solo. Este equipamento expressa como índice de cone a relação entre a força exercida para fazer penetrar um cone metálico no solo e sua área basal (Bradford, 1986). Nas amostras de resistência do solo à penetração, as determinações foram feitas até a profundidade de 0,50 m, deslocadas 0,20 m do centro da linha de plantio da cultura. No dia da amostragem, o solo estava com teor de água de $0,34 \text{ kg kg}^{-1}$.

Em resumo, os atributos do solo analisados nas duas profundidades foram: teor de matéria orgânica (MO), densidade do solo (DS), resistência a penetração (RP), umidade gravimétrica (UG), umidade volumétrica (UV) e porosidade total (PT).

3.4 Análise estatística e geostatística dos atributos pesquisados

Para cada atributo estudado foi efetuada a análise descritiva auxiliada pela estatística clássica utilizando-se o SAS (SCHLOTZHAVER & LITTEL, 1997). Também foi efetuada a análise da distribuição de frequência por meio do teste de Shapiro & Wilk (1965) com 1 % probabilidade de erro.

A modelagem geoespacial foi realizada com o programa GS⁺ 7.0 (GS⁺, 2004). A técnica de krigagem foi utilizada para estimar valores nos locais não amostrados. Uma vez determinados os valores, para os locais não amostrados, pela krigagem, foram construídos os mapas de isolinhas utilizando-se o programa GS⁺ (GS⁺, 2004), que emprega os mesmos valores estimados por meio

da técnica de krigagem para determinação e localização das isolinhas; desta maneira, os mapas representam linhas bem definidas e embasadas em um algoritmo de regressão linear, conforme descrito por Siqueira et al. (2008). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme a Equação 1 (GS+, 2004):

$$ADE = [C / (C + C_0)] \cdot 100 \dots \dots \dots (4)$$

onde: ADE é o avaliador da dependência espacial; C, a variância estrutural; e C+Co, o patamar. A interpretação proposta para o ADE foi a seguinte: a) ADE < 20 % = variável espacial de muito baixa dependência (MB); b) 20 % ≤ ADE < 40 % = baixa dependência (BA); c) 40 % ≤ ADE < 60 % = média dependência (ME); d) 60 % ≤ ADE < 80 % = alta dependência (AL) e 80 % ≤ ADE < 100 % = muito alta dependência (MA) (DALCHIAVON et al., 2012).

3.4.1. Exclusão da tendência quando da não formação da estacionariedade

No caso da não-estacionariedade de um atributo qualquer, pode-se efetuar a retirada da tendência dos dados pela técnica da regressão múltipla polinomial. A geoestatística é a ciência que trata da aplicação da teoria das variáveis regionalizadas, utilizada na estimativa de fenômenos geológicos. Dessa forma, uma variável Z, que é distribuída ordenadamente no espaço s, é tida como variável regionalizada Z(s). Portanto, pode ser representada espacialmente pelo semivariograma, partindo-se do pressuposto de que seja intrínseca, isto é, de que seus incrementos sejam estacionários. Entretanto, em muitos casos ela não satisfaz essa condição, de forma a caracterizar o fenômeno por exibir uma tendência, isto é, de não ser intrínseca e, portanto, não-estacionária.

Assim, por se tratar de variável não-estacionária, se decompõe em:

$$Z(s) = t(s) + R(s) \dots \dots \dots (5)$$

onde: t(s) é a tendência ou deriva e R(s) é o resíduo (MATHERON, 1962; ARMESTO, 1999).

Segundo Davis (1986), a tendência t(s) da variável Z(s), que depende exclusivamente da localização geográfica (coordenadas cartesianas x, y) do ponto amostral, na qual o componente aleatório vai ficar modelado no resíduo, pode ser obtida pela técnica da regressão múltipla polinomial, quando t(s) é obtida em função dos valores das coordenadas cartesianas (x, y) do ponto. As expressões testadas são a linear, quadrática e a cúbica, relacionadas respectivamente nas equações a seguir:

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y \dots \dots \dots (6)$$

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy \dots \dots \dots (7)$$

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy + a_6.x^3 + a_7.y^3 + a_8.x^2y + a_9.y^2x \dots \dots \dots (8)$$

Dessa forma, a eleição da tendência $t(s)$, efetuada pelo ajuste dos mínimos quadrados para cada modelo, é obtida pela escolha daquele que apresentar o maior coeficiente de determinação (r^2). Definido o modelo, pode-se calcular o resíduo $R(x,y)$, a partir da equação 13, efetuando-se:

$$\mathbf{R(x,y) = Z(x,y) - t(x,y).....(9)}$$

Portanto, com tais resíduos poderão ser efetuados os tratamentos necessários aos dados, tais como o ajuste do semivariograma e sua validação. Finalmente, a soma dos resíduos aos respectivos desvios resultará na estimativa da variável $Z^*(x,y)$, com a qual poderá ser efetuada a krigagem, conforme a equação 14:

$$\mathbf{Z^*(x,y) = t^*(x,y) + R^*(x,y)..... (10)}$$

onde: $Z^*(x,y)$ é a estimativa da variável não-estacionária $Z(s)$, $t^*(x,y)$ é a tendência da variável $t(s)$, e $R^*(x,y)$ é a estimativa do resíduo resultante da krigagem. Assim, calcula-se novamente o semivariograma, com os resíduos obtidos deste procedimento, e a designação dos atributos aos quais foi extraída a tendência é #atributo. Portanto, na interpretação dos mapas de krigagem, para os atributos que apresentaram tendência e indicam na legenda do mapa de krigagem valores variando entre positivos e negativos, devido tais valores serem os resíduos, para que na legenda do mapa de krigagem possam aparecer os valores originais do atributo que se está estudando, efetua-se a interpolação do mapa de krigagem com os valores dos resíduos. Assim, quando é realizado este cálculo pelo programa GS+ (2004), é gerado um arquivo Excel, que possui todas as interpolações calculadas para o número de vizinhos estipulado anteriormente. A partir do número ideal de vizinhos, estipulado pela validação cruzada prévia, pode-se calcular o $R^*(x,y)$. Seguidamente, pode-se calcular a $t^*(x,y)$ pelo uso dos coeficientes adjuntos calculados pela expressão ajustada anteriormente. A partir do conhecimento do $R^*(x,y)$ e da $t^*(x,y)$ podem ser calculados os valores do atributo retrotransformados pelo uso da equação 14. Com isso, retorna-se ao GS+ e efetua-se a krigagem com tais valores retrotransformados (#atributo), obtendo-se o mapa de krigagem final.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise descritiva dos dados

4.1.1 Variabilidade dos atributos

4.1.1.1 Atributos da planta

No Quadro 2 está apresentada a análise descritiva inicial dos atributos avaliados na cultura da cana-de-açúcar. Para estande de plantas por m² (STD) foi encontrada média variabilidade (16,31 %) (Quadro 2), corroborando com Braga (2011), que encontrou resultado semelhante em um Argissolo Vermelho Eutrófico. A produtividade de colmos de cana-de-açúcar por hectare (PRO) também se apresentou com média variabilidade (18,43 %) (Quadro 1). O mesmo foi constatado por Souza et al. (2010a) sendo que encontraram média variabilidade para tal atributo (18,51 %). Em contrapartida, os atributos porcentagem de sólidos solúveis (BRI), porcentagem de sacarose (POL), porcentagem de pureza (PUR), porcentagem de fibra (FIB), e açúcares totais recuperáveis (ATR) apresentaram baixa variabilidade, com valores de 3,3, 3,9, 2,6, 2,1 e 3,9% (Quadro 2), respectivamente, corroborando com os valores encontrados por Dutra Filho et al. (2011) trabalhando com cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho-Amarelo.

A variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (CV). Suas classes foram determinadas como baixa ($CV \leq 10\%$), média ($10\% < CV \leq 20\%$), alta ($20\% < CV \leq 30\%$) e muito alta ($CV > 30\%$) (Pimentel Gomes & Garcia (2002).

4.1.1.2 Atributos do solo

Nos Quadros 3 e 4 constam as análises descritivas iniciais dos atributos de solo nas camadas de 0-0,25 m e de 0,25-0,50 m, respectivamente.

A variabilidade do atributo resistência à penetração do solo na camada de 0-0,25 m (RP1), segundo as classes de Pimentel Gomes & Garcia (2002) foi classificada como muito alta apresentando valor de 79,0%, dado semelhante com aqueles de Corá et al. (2004), Souza et al. (2004), Carvalho et al. (2008), Souza et al. (2008), Montanari et al. (2010/2012) e Dalchiavon et al. (2011). A variabilidade dos atributos, na camada de 0-0,25 m, umidade volumétrica do solo (UV1), densidade de partícula (DP1), densidade do solo (DS1), porosidade total do solo (PT1) e

Quadro 2 - Análise descritiva de atributos da cana-planta cultivada em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

Medidas estatísticas descritivas										
Atributo ^(a)			Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
	PRO (t ha⁻¹)	112,1	111,7	47,8	170,0					
STD (pl m⁻²)	8,1	8,1	3,6	11,0	1,3	16,3	0,493	-0,402	0,278	NO
BRI (%)	22,5	22,5	20,5	24,4	0,8	3,3	0,099	0,071	0,184	NO
POL (%)	16,7	16,7	14,9	18,3	0,7	3,9	0,167	0,042	0,120	NO
PUR (%)	86,6	86,6	81,9	94,4	2,3	2,6	0,550	0,832	0,0001	IN
FIB (%)	11,2	11,3	9,4	13,5	0,9	7,9	-0,347	-0,054	0,209	NO
ATR (kg t⁻¹)	160,7	160,7	143,6	176,6	6,3	3,9	0,161	0,073	0,187	NO

^{a)}PRO, STD, BRI, POL, PUR, FIB, ARC e ATR são respectivamente, Produtividade de Cana-de-açúcar, Número de Plantas por m², Porcentagem de Sólidos Solúveis Totais, Porcentagem de Sacarose, Porcentagem de Pureza, Porcentagem de Fibras, Porcentagem de Açúcares Redutores do Caldo e Açúcares Totais Recuperáveis; ^(b)DF = distribuição de frequência, sendo NO e IN, respectivamente do tipo normal e indeterminado.

Quadro 3 - Análise descritiva inicial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO, na profundidade de 0,0-0,25 m.

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Probabilidade do teste ^(b)	
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,340	0,339	0,220	0,500	0,048	14,1	0,494	0,354	0,450	NO
UV1 (m ³ m ⁻³)	0,444	0,448	0,355	0,536	0,040	9,1	-0,100	0,027	0,081	NO
DP1 (kg dm ⁻³)	2,554	2,558	2,327	2,785	0,093	3,6	-0,261	-0,050	0,384	NO
DS1 (kg dm ⁻³)	1,307	1,306	0,938	1,668	0,119	9,1	0,622	-0,159	0,776	NO
PT1 (m ³ m ⁻³)	0,488	0,489	0,359	0,611	0,049	9,9	-0,062	-0,162	0,892	NO
RP1 (MPa)	0,431	0,355	0,004	1,547	0,341	79,0	1,670	1,406	0,0001	IN
MO1 (g dm ⁻³)	23,9	23,4	17,6	32,7	0,060	4,3	-0,200	0,287	0,068	LN

^(a)UG1, UV1, DP1, DS1, PT1, RP1, MO1 e MO1, são respectivamente a unidade gravimétrica, umidade volumétrica, densidade da partícula, densidade do solo, porosidade total, resistência à penetração e matéria orgânica, coletados nas camadas do solo de 0,00-0,25 m; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, IN e LN, respectivamente do tipo normal, indeterminado e log-normal.

Quadro 4 - Análise descritiva inicial de atributos físicos Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO, na profundidade de 0,25 - 0,50 m.

Medidas estatísticas descritivas										
Atributo ^(a)			Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
	£UG2 (kg kg ⁻¹)	0,292			0,291					
UV2 (m ³ m ⁻³)	0,407	0,4	0,232	0,564	0,057	14,0	0,326	0,277	0,223	NO
DP2 (kg dm ⁻³)	2,577	2,571	2,251	2,988	0,122	4,7	1,047	0,354	0,058	NO
DS2 (kg dm ⁻³)	1,387	1,384	1,132	1,729	0,143	10,3	-0,816	0,178	0,043	TN
PT2 (m ³ m ⁻³)	0,462	0,463	0,331	0,569	0,057	12,3	-0,824	-0,171	0,045	TN
RP2 (MPa)	1,201	1,150	0,032	3,078	0,632	52,6	-0,072	0,430	0,082	NO
MO2 (g dm ⁻³)	18,3	18,0	12,2	27,2	2,969	16,2	0,071	0,271	0,120	NO

^(a)£UG2, UV2, DP2, DS2, PT2, RP2, MO2, são respectivamente a umidade gravimétrica, umidade volumétrica, densidade da partícula, densidade do solo, porosidade total, resistência à penetração e matéria orgânica, coletados nas camadas do solo de 0,25-0,50 m; ^(b)DF = distribuição de frequência, sendo NO, TD e LN respectivamente do tipo normal, tendendo a normal e log-normal.

matéria orgânica do solo (MO1) foram classificadas como baixas, com valores de 9,1, 3,6, 9,1, 9,9 e 4,3% (Quadro 3), respectivamente. Dados semelhantes com aqueles de Gioia (2011) que também encontrou CVs baixos para os mesmos atributos do solo. O atributo umidade a base de massa (UG1) apresentou média variabilidade com valor de 14,1% (Quadro 3), diferentemente, do CV obtido por Gioia (2011) de 21,6% de CV classificado como alto, para a camada de 0- 0,20 m.

Na camada de solo de 0,25-0,50 m, o atributo DP2 apresentou baixa variabilidade com CV de 4,7% (Quadro 4). Os atributos UV2, DS2, PT2 e MO2 apresentaram média variabilidade com CV de 14,0, 10,3, 12,3 e 16,2% (Quadro 4), respectivamente. Para o atributo UG2 foi encontrada variabilidade alta, com CV de 22,2% e para o atributo RP2 foi encontrada variabilidade muito alta, com CV de 52,6% (Quadro 4).

Souza et al. (2010a) e Gioia (2011) também obtiveram CVs muito altos para a RP1 e RP2 nas camadas de 0,0-0,20 m e 0,20-0,40 m. Souza et al. (2010a) encontraram CVs de 44,16% para a RP no primeiro nível e de 36,22% para o segundo nível em um Latossolo Vermelho distrófico e Gioia (2011) encontrou valores de CV para RP1 e RP2 de 44,5 e 35,7% respectivamente, para um Argissolo Vermelho Distrófico. Para a DS na camada de 0-0,20 m de espessura, Souza et al. (2010a), verificaram também valores de baixo CV (9,22%) para a camada de 0,20-0,40 m do solo que é classificado como baixo, corroborando com a atual pesquisa.

Valores elevados de coeficiente de variação para atributos de solo indicam a ocorrência de fatores extrínsecos, como o tráfego de máquinas e manejos inadequados, o que torna a área heterogênea em relação aos atributos físicos avaliados. O que vem corroborar com a observação de Cambardella et al. (1994) de que a ação de fatores externos promove alteração ao solo, e as práticas de manejos inadequados tende a manter o solo não homogêneo.

4.1.2 Distribuição de frequência dos atributos

4.1.2.1 Atributos da planta

O conhecimento da distribuição de frequência dos dados de uma variável tem importantes consequências práticas, uma vez que os métodos de análise a serem aplicados são distintos para as diferentes distribuições. Exemplificando, sabe-se que a média é uma boa medida descritiva para dados com distribuição normal se, porém o mesmo não acontece àqueles com distribuição lognormal, aos quais a mediana se torna uma boa medida descritiva (Spiegel, 1985). De acordo com Vieira (1997), a distribuição lognormal é um indicativo da existência de grande variabilidade dos dados e para a verificação da adequação de dados a uma distribuição lognormal, utiliza-se um processo de transformação logarítmica das variáveis para reduzir as variações nos dados, tornando-os mais precisos. Assim, os resultados da PRO, STD, BRI, POL, FIB e ATR (Quadro 2) apresentaram distribuição de frequência do tipo normal, onde o valor de probabilidade para esses atributos variou de 0,120 a 0,428 no teste de normalidade de Shapiro & Wilk (1965), enquanto a PUR apresentou distribuição de frequência do tipo indeterminado, pois apresentou valores de probabilidade baixíssimos ($p \leq 0,001$) no teste de normalidade de Shapiro & Wilk (1965).

4.1.2.2 Atributos do solo

No Quadro 3 estão apresentados os atributos do solo na camada superficial (0–0,25 m) onde pode ser observada que a distribuição de frequência foi indeterminada para os atributos RP1, pois apresentou valor de probabilidade baixíssimo ($p \leq 0,001$) no teste de normalidade de Shapiro & Wilk (1965). A distribuição de frequência para o atributo MO1 foi lognormal com valor de probabilidade de 0,068 e assim esse atributo foi representado pelo valor da sua mediana. Para os atributos UG1, UV1, DP1, DS1 e PT1 foram observadas distribuições de frequências do tipo normal, com valores de probabilidades variando de 0,068 a 0,892 no teste de normalidade de Shapiro & Wilk (1965), podendo esses atributos serem representados pelo valor de suas médias.

Os atributos da camada de solo de 0,25 - 0,50 m estão apresentados no Quadro 4, onde foi observada distribuição de frequência do tipo lognormal e tendendo a normal para os atributos £UG2, DS2 e PT2 com valor de probabilidade variando de 0,043 a 0,053 e, assim esses atributos foram representados pelo valor da sua mediana. Os atributos UV2, DP2, RP2 e MO2 apresentaram distribuição de frequência do tipo normal com valores de probabilidade variando de 0,058 a 0,223 no teste de normalidade de Shapiro & Wilk (1965).

Gioia (2011) encontrou distribuição lognormal para o atributo RP1 e distribuição normal para o atributo UG1 com probabilidade de 0,906. Já para a RP2 a distribuição foi normal (Quadro 4), com valor de probabilidade pelo teste de normalidade a 5% de 0,082, enquanto para a £UG2 apresentou o tipo lognormal de distribuição de frequência. Gioia (2011) encontrou distribuição lognormal para o atributo RP2 e distribuição normal para o atributo £UG2 com valor de probabilidade de 0,145 no teste de normalidade de Shapiro & Wilk (1965). Webster (1985) relatou que a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, sendo conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as análises. Por outro lado, Gonçalves et al. (2001) evidenciaram que a distribuição normal dos dados é muito interessante na avaliação da dependência espacial; no entanto, mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes na área de estudo (DALCHIAVON et al., 2012).

4.1.3 Valores médios dos atributos estudados

4.1.3.1 Atributos da planta

A média da PRO (Quadro 2) foi de 112,12 t ha⁻¹ valor acima da média nacional (74,10 t ha⁻¹), da região centro-oeste (72,52 t ha⁻¹) e do estado de Goiás (74,86 t ha⁻¹) (CONAB, 2013). A alta produtividade pode ser explicada devido ao histórico da área cultivada (10 anos de plantio direto de culturas graníferas de alta tecnologia), o ano de 2013 com regime de precipitação pluviométrica não deficitário e, por ser cana planta estando no seu primeiro ano produtivo com seu melhor potencial.

Para ATR observa-se uma média de 160,68 kg t⁻¹ superior ao referencial nacional (135,7 kg t⁻¹) de acordo com a Conab (2013) e o encontrado por Carvalho et al. (2011) trabalhando com cana-de-açúcar sob plantio direto em Rio Brilhante-MS (117,57 kg t⁻¹). Mendonça et al. (1984) afirmam que, de modo geral, as variedades apresentam a mesma tendência de progressivo acúmulo de sacarose de abril a novembro, em termos de ATR (kg t⁻¹), com picos de agosto a setembro, quando há decréscimo na temperatura e déficit hídrico moderado, reduzindo as taxas de crescimento e, conseqüentemente, possibilitando maior acúmulo de sacarose. Neste caso a época de colheita no mês de setembro pode explicar o alto valor de ATR.

O STD apresentou uma média de 8,07 plantas m⁻² (Quadro 2), inferior ao encontrado por Campos et al. (2012) para a mesma variedade cultivada IACSP 955000, que encontraram uma população de 10,40 plantas m⁻² em um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso. Para Silva (2008) a

recomendação para um bom estande de plantas de cana-de-açúcar é de 10 a 12 plantas m⁻². Porém, podem ter interferência de acordo com as variáveis utilizadas e de fatores climáticos.

A média da POL foi de 16,7%, valor dentro dos padrões recomendados por Lavanholi (2008) (14-24%) e acima do constatado por Rapassi et al. (2009), que obtiveram um valor de 14,53%. Nos meses que antecederam o corte da cana (julho a setembro) houve uma significativa queda na temperatura ambiente e uma seca moderada (Figura 2), que retardou o crescimento das plantas, induzindo ao acúmulo de sacarose nos colmos, elevando os valores da POL (HUMBRET, 1968; SCARPARI, 2002).

De acordo com Ripoli e Ripoli (2003) que consideram que a pureza deve estar acima de 85%, no presente trabalho pode-se observar uma mediana de 86,6% para o atributo PUR. Convém comentar que o manuseio cuidadoso das amostras e o não uso de equipamentos mecânicos para coleta e transporte para análise das amostras pode ter influenciado nos bons resultados desse atributo, valor acima do obtido por Rapassi et al. (2009) (81,4%).

Para a porcentagem de fibra (FIB) a mediana apresentou um valor de 11,2%, ou seja, dentro do padrão recomendado por Scapari e Beuclair (2008) que comentam que o valor de fibras na cultura pode variar de 9-20% durante a safra. Deve salientar também que os valores obtidos na presente pesquisa estão de acordo com padrões da ÚNICA (2009) para a produção de açúcar e álcool.

4.1.3.2 Atributos do solo

No Quadro 3 constam os valores para os atributos do solo na camada de 0-0,25 m e no Quadro 4, os valores para a camada 0,25 – 0,50 m. O valor de mediana para o atributo MO1 de 23,4 g dm⁻³ pode ser classificado como médio conforme Raij et al. (1987) e o valor de 18,3 g dm⁻³ para o atributo MO2 pode ser classificado como baixo. A presença de maiores valores de MO na camada de 0–0,25 m pode ser explicada pelo fato de que a área com a cultura da cana-de-açúcar foi anteriormente cultivada no sistema de plantio direto, que está relacionado ao maior aporte de fitomassa na superfície e à redução no uso de implementos agrícolas para o preparo de solo aumentando a quantidade de MO e diminuindo a decomposição do material orgânico protegido fisicamente nos agregados do solo (JANTALIA et al., 2007).

Para os valores médios encontrados para os atributos UG e UV na camada do solo de 0,00-0,25 m, observa-se que a média da UG1 foi de 0,340 kg kg⁻¹ e a UV1 apresentou uma média de 0,444 m³ m⁻³ (Quadro 3). Considerando-se uma média da PT1 de 0,489 m³ m⁻³ pode se concluir que no momento da coleta das amostras, a umidade volumétrica estava em 90,7 % da porosidade.

Para a camada do solo de 0,25 – 0,50 m, a média da fUG2 ficou em $0,291 \text{ kg kg}^{-1}$ e a UV2 ficou em $0,400 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Quadro 4).

Considerando uma média da PT2 de $0,463 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ pode-se inferir que no momento da coleta das amostras, a umidade volumétrica estava em 86,39% da porosidade. Observa-se um baixo decréscimo da porosidade em profundidade no solo e que os valores encontrados estão na faixa de $0,52 - 0,61 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade característicos de solos argilosos (REICHARDT & TIMM, 2004; LIBARDI, 2005). A porosidade total encontrada para as duas camadas do solo estudado está muito próxima daquela apontada por Kiehl (1979) como sendo a porosidade ideal para a produção agrícola de um solo, devendo apresentar $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade total.

Foram encontrados os valores para DP e DS nas duas camadas do solo, onde o valor médio para os atributos da 1ª camada de solo foi de $2,554 \text{ kg dm}^{-3}$ para DP1 e o valor médio de DS1 foi de $1,307 \text{ kg dm}^{-3}$ (Quadro 3). Para a 2ª camada de solo estudada os valores encontrados para os atributos foram de $2,577 \text{ kg dm}^{-3}$ para DP2 e $1,384 \text{ kg dm}^{-3}$ para DS2 (Quadro 4). Os valores de DS1 e DS2 estão abaixo dos valores encontrados por Souza et al. (2009) estudando um solo similar cultivado há mais de 30 anos com cana queimada, onde obtiveram valores médios de DS de 1,38 e $1,41 \text{ kg dm}^{-3}$, respectivamente nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade. Esses valores foram superiores aos verificados neste trabalho, apesar de que a área utilizada por aqueles autores estava no quinto ciclo de cultivo sob sistema de colheita de cana queimada. Nesse sentido, o número reduzido de ciclos de cultivo na obtenção dos dados pode ter contribuído para diminuir ainda mais os valores de DS no solo argiloso estudado. Os valores de DS encontrados no presente trabalho são menores do que os valores definidos por Reichert et al. (2007), que por meio de análise do intervalo hídrico ótimo, apontaram que a densidade crítica para solos Argilosos varia de 1,30 a $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$. Os mesmos também foram menores que os valores de DS de Fernandes et al. (1983), que explicaram que em Latossolo Vermelho de textura argilosa, os valores de densidade superiores a $1,45 \text{ kg dm}^{-3}$ prejudicam a absorção de nutrientes pela planta.

Para RP1 e RP2 a média e mediana, respectivamente, foram 0,431 e 1,150 MPa (Quadros 3 e 4 respectivamente). Segundo classificação da resistência do solo à penetração de Arshad et al. (1996), os valores encontrados na pesquisa atual, a média da RP1 de 0,431 MPa (Quadro 3), pode ser considerada baixa e a mediana da RP2 de 1,201 MPa (Quadro 4), pode ser considerada moderada. O que significa que pode ter, de alguma forma, ocorrido impedimento no desenvolvimento pleno da cultura na segunda camada (0,25 a 0,50 m). Apesar de que Freddi et al. (2006) que trabalharam num Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa no cerrado brasileiro avaliando a RP, verificaram valores de moderados a alto e concluíram que o atributo não influenciou no pleno desenvolvimento da cultura do milho. Assim, segundo dados obtidos no

trabalho, o decaimento da umidade (£UG2) na camada de 0,25 – 0,50 m provocou aumento nos valores de resistência do solo à penetração (RP2), para a mesma camada de 0,25 – 0,50 m.

4.2 Análise de regressão entre os atributos

4.2.1 Regressão linear simples

4.2.1.1 Matriz de correlação linear simples entre os atributos

Nos Quadros 5 a 7 estão apresentadas as matrizes de correlação linear de Pearson entre os atributos estudados da cultura da cana-de-açúcar (PRO, STD, ATR, BRI, POL, PUR e FIB) e os atributos físicos do solo estudado (MO, DS, RP, UG, UV e PT), nas camadas respectivas de 0,0 – 0,25 e 0,25 – 0,50m.

4.2.1.1.1 Atributos da planta versus atributos da planta

No Quadro 5 constata-se a correlação entre a PRO e o STD com um coeficiente de correlação de 0,87, altamente significativo e positivo, levando a inferir que o manejo adequado da população de plantas contribui para o aumento da produtividade da cultura da cana-de-açúcar, corroborando com Braga (2011) que obteve um coeficiente de correlação de 0,43 entre os mesmos atributos. Na mesma linha de correlação entre os atributos da planta foi observada correlação significativa e negativa entre o STD e POL, STD e PUR e STD e ATR, com coeficientes de variação de -0,19, -0,24 e -0,20, concluindo que nos locais onde a população de plantas foi maior houve decréscimo no estoque de açúcares na cana-de-açúcar. O maior número de perfilhos demandou maior quantidade de fotoassimilados para sua manutenção fisiológica, atuando como drenos das reservas de sacarose da planta.

Para outras correlações significativas entre os atributos tecnológicos houve significâncias positivas, no entanto, essas se deveram a inter-relação direta entre as variáveis nos cálculos para suas obtenções.

Quadro 5 - Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

	PRO	STD	BRI	POL	PUR	FIB
STD	0,87	-	-	-	-	-
BRI	-0,09	-0,08	-	-	-	-
POL	-0,15	-0,19	0,69	-	-	-
PUR	-0,17	-0,24	0,18	0,70	-	-
FIB	0,03	0,06	0,64	0,43	0,33	-
ATR	-0,16	-0,20	0,68	0,99	0,70	0,43

^(a)Vide quadro 3; ^(b)Significativo em negrito.

Quadro 6 - Matriz de correlação dos atributos da cana-de-açúcar e físicos do solo na profundidade de 0,0 – 0,25m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

	PRO	STD	BRI	POL	PUR	FIB	ATR	UG1	UV1	DP1	DS1	PT1	RP1
UG1	0,00	0,01	0,09	-0,03	0,06	0,00	-0,02	-	-	-	-	-	-
UV1	-0,02	-0,03	0,10	0,04	0,00	0,08	0,04	0,75	-	-	-	-	-
DP1	-0,14	-0,10	-0,19	-0,10	-0,04	-0,10	-0,10	-0,14	-0,13	-	-	-	-
DS1	0,06	0,07	0,02	0,00	-0,07	0,14	0,00	-0,72	-0,34	0,14	-	-	-
PT1	-0,12	-0,11	-0,10	-0,04	0,06	-0,17	-0,04	0,65	0,30	0,25	-0,91	-	-
RP1	-0,17	-0,23	0,07	0,17	0,13	-0,03	0,17	-0,01	0,06	-0,07	-0,05	0,02	-
MO1	0,03	-0,03	0,06	0,03	-0,03	-0,07	0,03	0,12	0,20	0,10	-0,09	0,14	0,30

^(a)Vide quadro 3; ^(b)Significativo em negrito.

Quadro 7 - Matriz de correlação dos atributos da cana-de-açúcar e físicos do solo na profundidade de 0,0 – 0,25m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

	PRO	STD	BRI	POL	PUR	FIB	ATR	£UG2	UV2	DP2	DS2	PT2	RP2
£UG2	-0,01	0,03	-0,04	-0,07	0,08	0,10	-0,06	-	-	-	-	-	-
UV2	-0,02	0,02	-0,04	-0,08	0,09	0,11	-0,07	0,93	-	-	-	-	-
DP2	-0,11	-0,11	-0,12	-0,12	-0,13	-0,14	-0,12	-0,16	-0,10	-	-	-	-
DS2	0,01	-0,03	0,03	0,06	0,00	-0,05	0,06	-0,86	-0,63	0,20	-	-	-
PT2	-0,04	-0,01	-0,07	-0,09	-0,03	0,00	-0,09	0,76	0,56	0,25	-0,88	-	-
RP2	-0,20	-0,27	0,09	0,17	0,14	-0,11	0,17	-0,29	-0,23	0,05	0,31	-0,28	-
MO2	0,17	0,14	0,11	0,08	0,09	0,02	0,07	0,02	-0,06	0,04	-0,11	0,11	-0,05

^(a)Vide quadro 4; ^(b)Significativo em negrito.

4.2.1.1.2 Atributos da planta versus atributos do solo na profundidade de 0–0,25m

No Quadro 6 consta a correlação entre STD e a RP1 com coeficiente de correlação de -0,23, significativo e negativo, levando a concluir que o manejo do solo para a redução da resistência do solo à penetração contribui para o aumento do número de plantas na área cultivada.

4.2.1.1.3 Atributos da planta versus atributos do solo na profundidade de 0,25–0,50m.

No Quadro 7 verifica-se a correlação negativa e significativa entre a PRO com a RP2, apresentando um coeficiente de correlação de $r = -0,20$, levando a inferir que o manejo adequado do solo em relação à diminuição da resistência à penetração contribui para aumento da produtividade da cultura da cana-de-açúcar.

No Quadro 7 verifica-se, novamente, a correlação negativa e significativa entre o STD e a RP2, apresentando um coeficiente de correlação de $r = -0,27$.

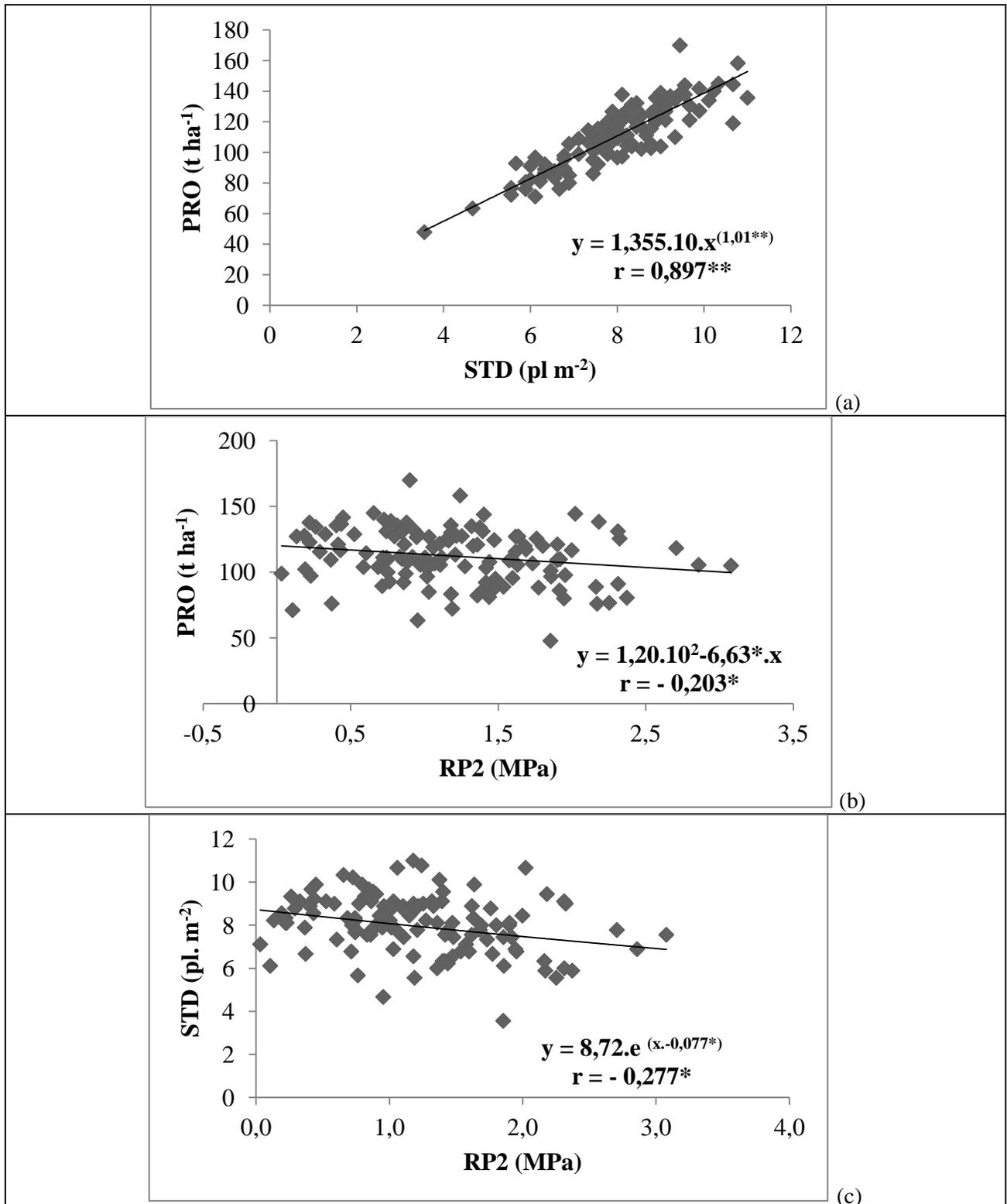
4.2.1.2 Regressão linear simples entre os atributos estudados

No âmbito das regressões entre os atributos da planta foi constatada uma relação exponencial entre a PRO e o STD ($r = 0,897^{**}$) (Figura 4a).

No âmbito das regressões entre os atributos da planta versus atributos do solo na camada de 0,25 a 0,50 m, foi constatada uma relação exponencial e decrescente entre a PRO e a RP2 ($r = -0,203^*$) (Figura 4b) e exponencial e decrescente entre o STD e a RP2 ($r = -0,277^*$) (Figura 4c). O aumento populacional de plantas na área e a diminuição da resistência do solo à penetração, que por sua vez levam a um aumento do número de plantas na área, somados levam a um aumento da produtividade da cana-de-açúcar.

Dessa forma, a relação exponencial entre a PRO e o STD, com o modelo matemático: $y=1,355.10.x^{(1,01)}$ ($r = 0,897^{**}$) (Figura 4a), indicou que quando o estande de plantas variou entre 3,56 e 11 plantas por metro quadrado, a PRO ficou entre 47,78 e 170 t ha⁻¹. Para esse intervalo de dados conclui-se que a população ideal, para uma produtividade máxima, nas mesmas condições de solo, espaçamento e planta seria de 11 plantas por metro quadrado o que equivale a aproximadamente 16,5 plantas por metro linear.

Figura 4 - Equações de regressão entre atributos da cultura de cana-de-açúcar e atributos físicos na profundidade de 0,25 a 0,50m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico.



A regressão da PRO em relação a RP2 apresentou uma relação linear com o modelo matemático: $y=1,20.10^2-6,63.x$ ($r = -0,203$) (Figura 4b), indicando que uma variação nos valores de RP2 entre 0,032 e 3,078 MPa haveria um incremento de produtividade variando de 99,59 a 119,78 t ha⁻¹. Dessa forma, para esse intervalo de dados, a redução da resistência do solo à penetração em 3,046 MPa proporcionaria incremento na produtividade de 20,19 t ha⁻¹. Para a camada de 0,25 a 0,50m de profundidade do solo pode-se observar uma relação exponencial para o STD em função da RP2, com o modelo matemático: $y=8,72.e^{(x,0,077)}$ ($r = -0,277^*$) (Figura 4c), indicando que uma variação nos valores de RP2 entre 0,032 e 3,078 MPa haveria um incremento do estande de 6,88 a 8,70 plantas por metro quadrado. Essas relações de resistência do solo à penetração com o estande de plantas na área e a produtividade de colmos permitem concluir que manejos que visem a diminuição desse atributo principalmente em profundidade no solo conduziria ao aumento da produtividade agrícola.

4.3 Análise geoestatística dos atributos estudados

4.3.1 Análise semivariográfica simples

4.3.1.1 Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos

Apesar da normalidade dos dados ser uma das pressuposições da estatística clássica, ela não chega a ser uma exigência da geoestatística. Nessa, mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes na área de estudo (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). No Quadro 9 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas ajustados para os 21 atributos pesquisados.

Os atributos BRI, FIB, UV1, DP1, DP2 e MO2 apresentaram efeito pepita puro, evidenciando que sua distribuição no espaço é aleatória. Para os demais atributos foi observada dependência espacial evidenciando uma distribuição não aleatória. Constatou-se, nos semivariogramas simples, que o coeficiente de determinação espacial (r^2) decresceu na seguinte ordem: 1) ATR (0,839); 2) £UG2 (0,810); 3) UG1 (0,800); 4) DS2 (0,774); 5) UV2 (0,745); 6) STD (0,713); 7) PRO (0,705); 8) PUR (0,703); 9) PT1 (0,692); 10) RP1 (0,632); 11) RP2 (0,531); 12) DS1 (0,500); 13) PT2 (0,486); 14) POL (0,448) e 15) MO1 (0,344).

Assim, em relação aos primeiros, que tiveram os mais elevados coeficientes de determinação espacial (Quadro 9) observou-se o seguinte: ATR, seu r^2 (0,839) indicou ser o melhor ajuste semivariográfico, apresentando um ADE médio (58,0%), com alcance de 180,3

metros e modelo exponencial; £UG2, seu $r^2(0,810)$ indicou ser o segundo melhor ajuste semivariográfico, apresentando um ADE muito alto (99,9%), com alcance de 38,8 metros e modelo gaussiano; UG1, seu $r^2(0,800)$ indicou ser o terceiro melhor ajuste semivariográfico, apresentando um ADE baixo (27,7%) com alcance de 71,0 metros e modelo esférico; DS2 seu $r^2(0,774)$ indicou ser o quarto melhor ajuste semivariográfico, apresentando um ADE muito alto (86,4%), com alcance de 40,0 metros e modelo esférico.

Braga (2011) obteve para o atributo ATR um ajuste semivariográfico ($r^2=0,933$), com ADE médio (54,4%), alcance de 69,0 metros e modelo gaussiano. Para o atributo PRO ($r^2=0,854$), ADE médio (59,4%), alcance de 72,0 metros e modelo gaussiano. Souza et al. (2010b) em um Argissolo Vermelho-Amarelo verificaram para o atributo produtividade de colmos de cana-de-açúcar um ajuste semivariográfico com $r^2= 0,860$, ADE muito baixo (16%), alcance de 471 metros e modelo esférico, trabalhando numa malha geoestatística de 118 pontos amostrais espaçados aproximadamente de 50 metros. Gioia (2011) obteve para o atributo ATR um ajuste semivariográfico ($r^2=0,904$), com ADE médio (55,6%), alcance de 243,4 m e modelo esférico, trabalhando com uma malha de 118 pontos em um Argissolo Vermelho distrófico abrupto. Esses dados estão próximos aos encontrados no presente trabalho, diferindo mais acentuadamente no alcance.

No âmbito dos alcances Chaves e Farias (2008), que trabalharam numa malha geoestatística com 68 pontos amostrais cobrindo uma área de 790 ha, constataram os maiores valores de alcances para a camada superficial, assim como pode ser observado no Quadro 9 do presente trabalho.

Na Figura 5 podem ser observados os semivariogramas simples dos atributos da cultura da cana-de-açúcar, e nas Figuras 6 e 7 estão apresentados os semivariogramas simples dos atributos estudados do solo. Ainda no Quadro 9, constata-se os valores dos alcances (m) obtidos nos ajustes para os atributos estudados em ordem decrescente: 1) ATR (180,3); 2) UG1 (71,0); 3) PUR (63,0); 4) PRO (62,6); 5) DS1 (50,0); 6) UV2 (48,0); 7) POL (47,7); 8) RP1 (44,7); 9) RP2 (40,9); 10) DS2 (40,0); 11) PT1 (40,0); 12) STD (40,0); 13) £UG2 (38,8); 14) PT2 (37,0) e 15) MO1 (31,2).

O valor do alcance pode influenciar a qualidade da estimativa, uma vez que determina o número de valores usados na interpolação. Assim, estimativas feitas com interpolação por krigagem utilizando os maiores valores do alcance tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representam melhor a realidade (CORÁ et al., 2004). Portanto, no auxílio aos trabalhos futuros, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos que alimentarão os *softwares* empregados na agricultura de precisão, para manejos específicos e localizados (*zonas*

específicas de manejo), não deverão ser menores do que 31,2 m, por representarem a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são iguais entre si.

4.3.1.2 Validação cruzada dos semivariogramas simples ajustados dos atributos

No Quadro 8 estão apresentados os parâmetros da validação cruzada referentes às krigagens para os atributos pesquisados e que apresentaram dependência espacial. Para os ajustes obtidos o coeficiente de correlação (r) decresceu na seguinte ordem: 1) ATR (0,513); 2) POL (0,444); 3) DS1 (0,423); 4) PRO (0,409); 5) PUR (0,395); 6) RP1 (0,342); 7) £UG2 (0,330); 8) RP2 (0,329); 9) MO (0,316); 10) PT2 (0,293); 11) STD (0,279); 12) PT1 (0,272); 13) UV2 (0,263); 14) DS2 (0,257) e 15) UG1 (0,226).

Dessa forma, pôde-se constatar que as seis melhores validações cruzadas foram em ordem decrescente: ATR, POL, DS1, PRO, UV2 e PT2 com coeficiente angular (b) das retas das validações variando entre 0,977 (ATR) e 0,824 (PT2) (Quadro 8). Assim, para o atributo ATR obteve-se o melhor coeficiente de correlação e o melhor coeficiente angular podendo-se inferir, que sob as mesmas condições trabalhadas, no âmbito da geoestatística, esse atributo é um potencial indicador da qualidade tecnológica dos atributos produtivos da cultura da cana-de-açúcar.

Quadro 8 - Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens para os atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico nas profundidades de 0,0 – 0,25 e 0,25 – 0,50 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico.

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação (r)	VO = a + b . VE (b)	
		a	B
	<i>γ(h) simples dos atributos da planta</i>		
PRO (t ha ⁻¹)	0,409	13,56	0,880
STD (pl m ⁻²)	0,279	3,72	0,542
POL (%)	0,444	0,77	0,953
PUR (%)	0,395	17,90	0,793
ATR (kg t ⁻¹)	0,513	3,77	0,977
	<i>γ(h) simples dos atributos do solo na 1ª profundidade</i>		
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,226	0,08	0,774
DS1 (kg dm ⁻³)	0,423	0,10	0,925
PT1 (m3 m ⁻³)	0,272	0,19	0,602
RP1 (MPa)	0,342	0,08	0,809
MO1a (g dm ⁻³)	0,316	0,93	0,324
	<i>γ(h) simples dos atributos do solo na 2ª profundidade</i>		
£UG2 (kg kg ⁻¹)	0,330	0,26	0,443
UV2 (m3 m ⁻³)	0,263	0,06	0,849
DS2 (kg dm ⁻³)	0,257	0,52	0,620
PT2 (m3 m ⁻³)	0,293	0,08	0,824
RP2 (MPa)	0,329	0,63	0,471

(a) Vide quadro 2,3 e 4; (b) VO = valor observado e VE = valor estimado.

Quadro 9 - Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físicos do solo nas profundidades de 0,0 – 0,25 e 0,25 – 0,50 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

Atributos ^(a)	Parâmetros						ADE ^(d)	
	Modelo ^(b)	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ + C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	%	Classe
<i>γ(h) simples dos atributos da planta</i>								
PRO	esf.(220)	1,451.10 ²	3,292.10 ²	62,6	0,705	3,0.10 ³	0,559	ME
STD	gau.(41)	4,23.10 ⁻¹	1,405	40,0	0,713	1,09.10 ⁻¹	0,699	AL
BRI	epp.	5,573.10 ⁻¹	5,573.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
POL	gau.(204)	2,157.10 ⁻¹	4,351.10 ⁻¹	47,7	0,448	1,3.10 ⁻²	0,504	ME
PUR	esf.(42)	1,762	3,999	63,0	0,703	6,02.10 ⁻¹	0,559	ME
FIB	epp.	7,96.10 ⁻¹	7,96.10 ⁻¹	-	-	-	-	-
ATR	exp.(39)	1,567.10	3,735.10	180,3	0,839	5,06.10	0,580	ME
<i>γ(h) simples dos atributos do solo na 1ª profundidade</i>								
UG1	esf. (206)	1,447.10 ⁻³	2,002.10 ⁻³	71,0	0,800	2.30.10 ⁻⁸	0,277	BA
UV1	epp	1,652.10 ⁻³	1,652.10 ⁻³	-	-	-	-	-
DP1	epp	8,692.10 ⁻³	8,692.10 ⁻³	-	-	-	-	-
DS1	esf. (44)	3,918.10 ⁻³	1,266.10 ⁻²	50,0	0,500	1.13.10 ⁻⁵	0,691	AL
PT1	gau. (44)	8,68.10 ⁻⁴	2,220.10 ⁻³	40,0	0,692	1.41.10 ⁻⁷	0,609	AL
RP1	esf. (41)	1,811.10 ⁻²	8,820.10 ⁻²	44,7	0,632	6.46.10 ⁻⁴	0,795	AL
MO1	gau. (44)	1,491.10 ⁻³	3,478.10 ⁻³	31,2	0,344	4.95.10 ⁻⁷	0,571	ME
<i>γ(h) simples dos atributos do solo na 2ª profundidade</i>								
UG2	gau. (44)	1,0.10 ⁻⁵	9,120.10 ⁻³	38,8	0,810	3.31.10 ⁻⁶	0,999	MA
UV2	esf. (204)	1,744.10 ⁻³	3,248.10 ⁻³	48,0	0,745	1.25.10 ⁻⁷	0,463	ME
DP2	epp	1,510.10 ⁻³	1,510.10 ⁻²	-	-	-	-	-
DS2	esf. (44)	2,724.10 ⁻³	1,998.10 ⁻²	40,0	0,774	2.20.10 ⁻⁵	0,864	MA
PT2	gau. (204)	1,362.10 ⁻³	3,300.10 ⁻³	37,0	0,486	3.83.10 ⁻⁷	0,587	ME
RP2	gau. (44)	3,650.10 ⁻²	3,990.10 ⁻¹	40,9	0,531	3,65.10 ⁻²	0,997	MA
MO2	epp.	8,833	8,833	-	-	-	-	-

^(a)PRO, STD, BRI, POL, PUR, FIB e ATR são respectivamente produtividade de colmos de cana-de-açúcar por hectare, número de plantas m², percentual de sólidos solúveis totais, percentual de sacarose, pureza, fibra e açúcares totais recuperáveis; UG, UV, DP, DS, PT, RP e MO são respectivamente umidade gravimétrica, umidade volumétrica, densidade da partícula, densidade do solo, porosidade total, resistência do solo à penetração e percentual de matéria orgânica; os índices 1 e 2 referem-se às profundidades de solo 0,00-0,25 e 0,25-0,50 m; ^(b)epp = efeito pepita puro, exp = exponencial, gau = gaussiano, esf = esférico, com seus devidos pares de lags; ^(c)SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d)ADE = avaliador da dependência espacial, sendo MA = muito alta, AL = alta, ME = média e BA = baixa.

Figura 5 - Semivariogramas simples dos atributos da cana-de-açúcar (PRO, STD, ATR, PUR e POL) em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico.

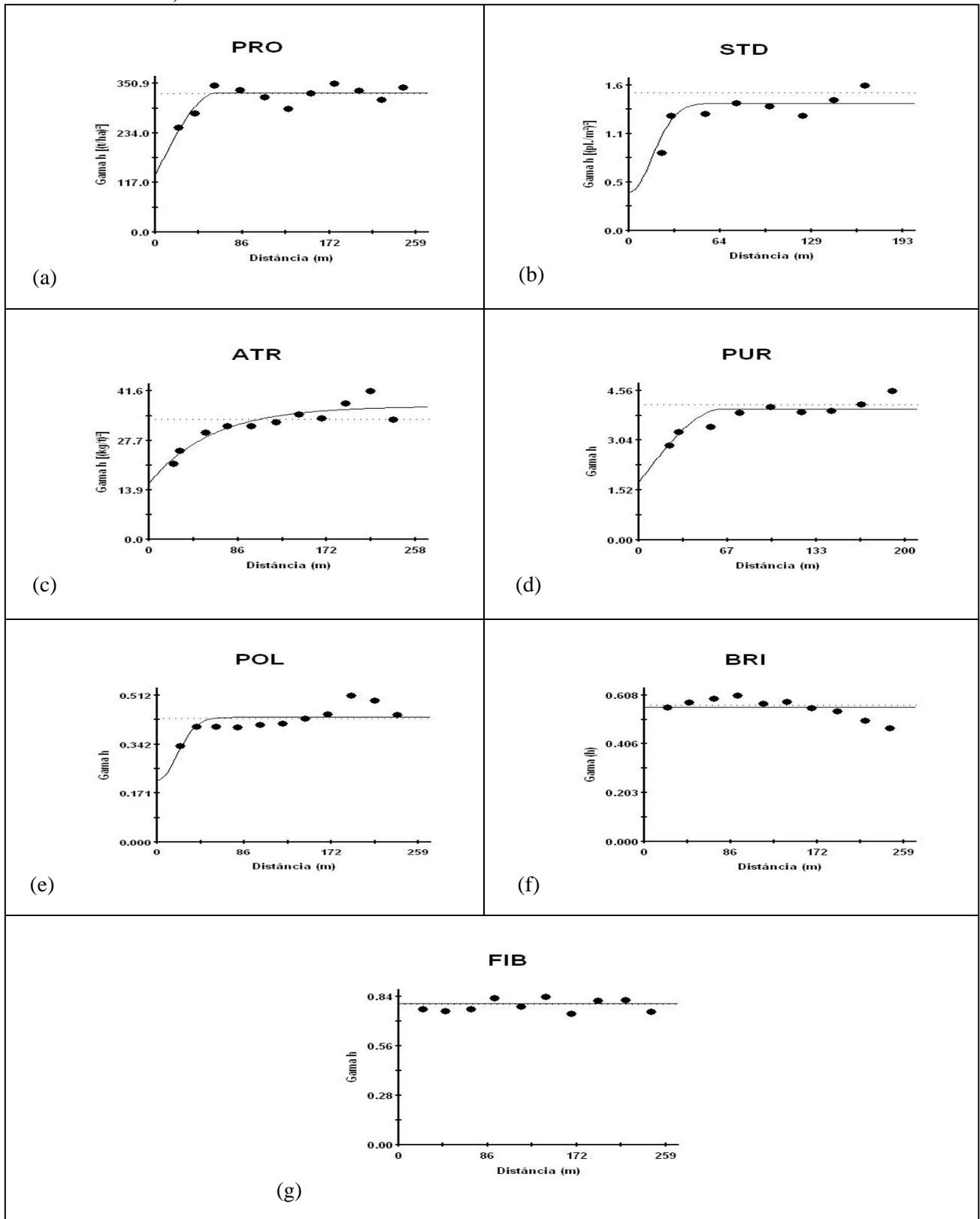


Figura 6 - Semivariogramas simples dos atributos físicos UG1, UV1, DP1, DS1, PT1, RP1 e MO1 de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico.

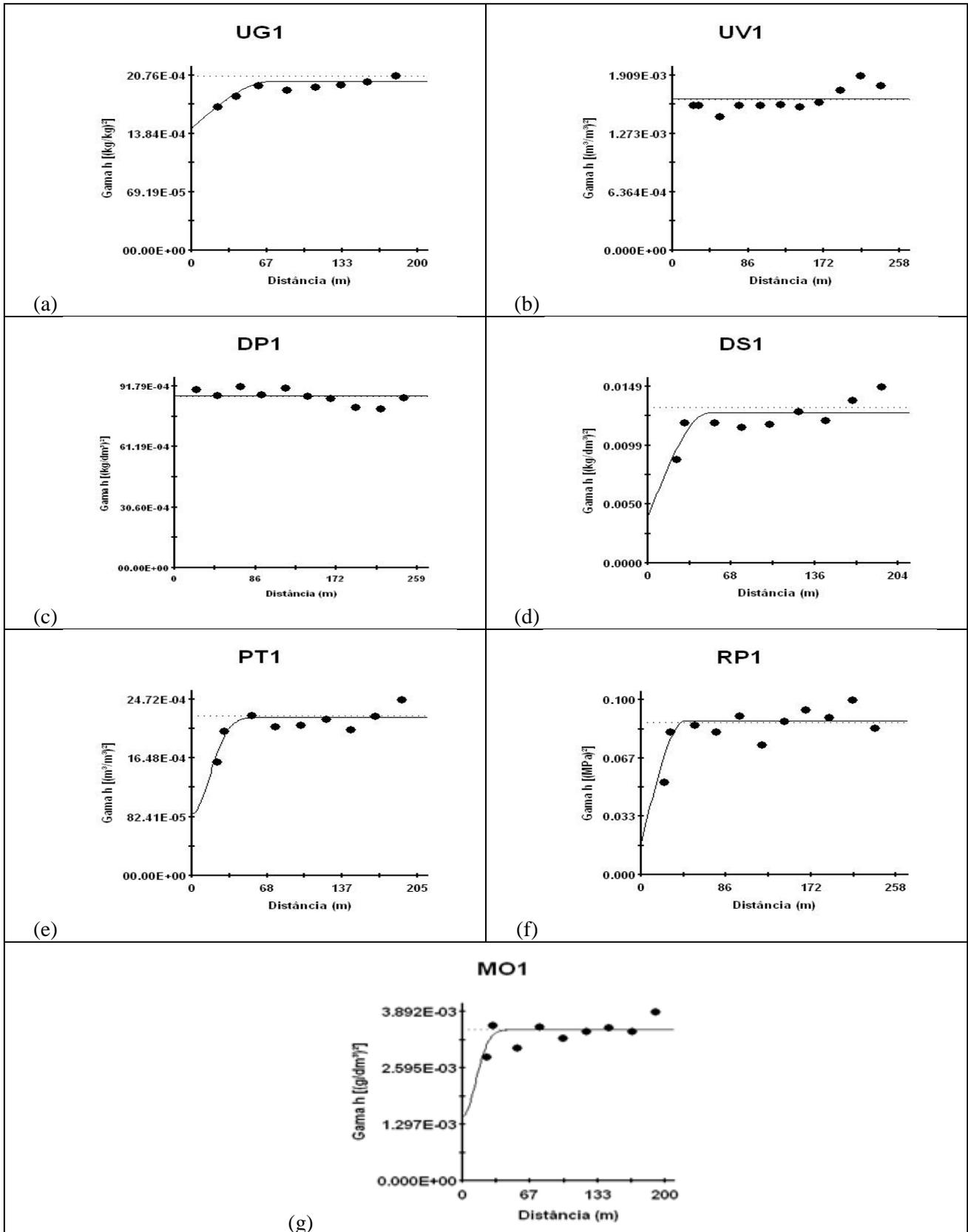
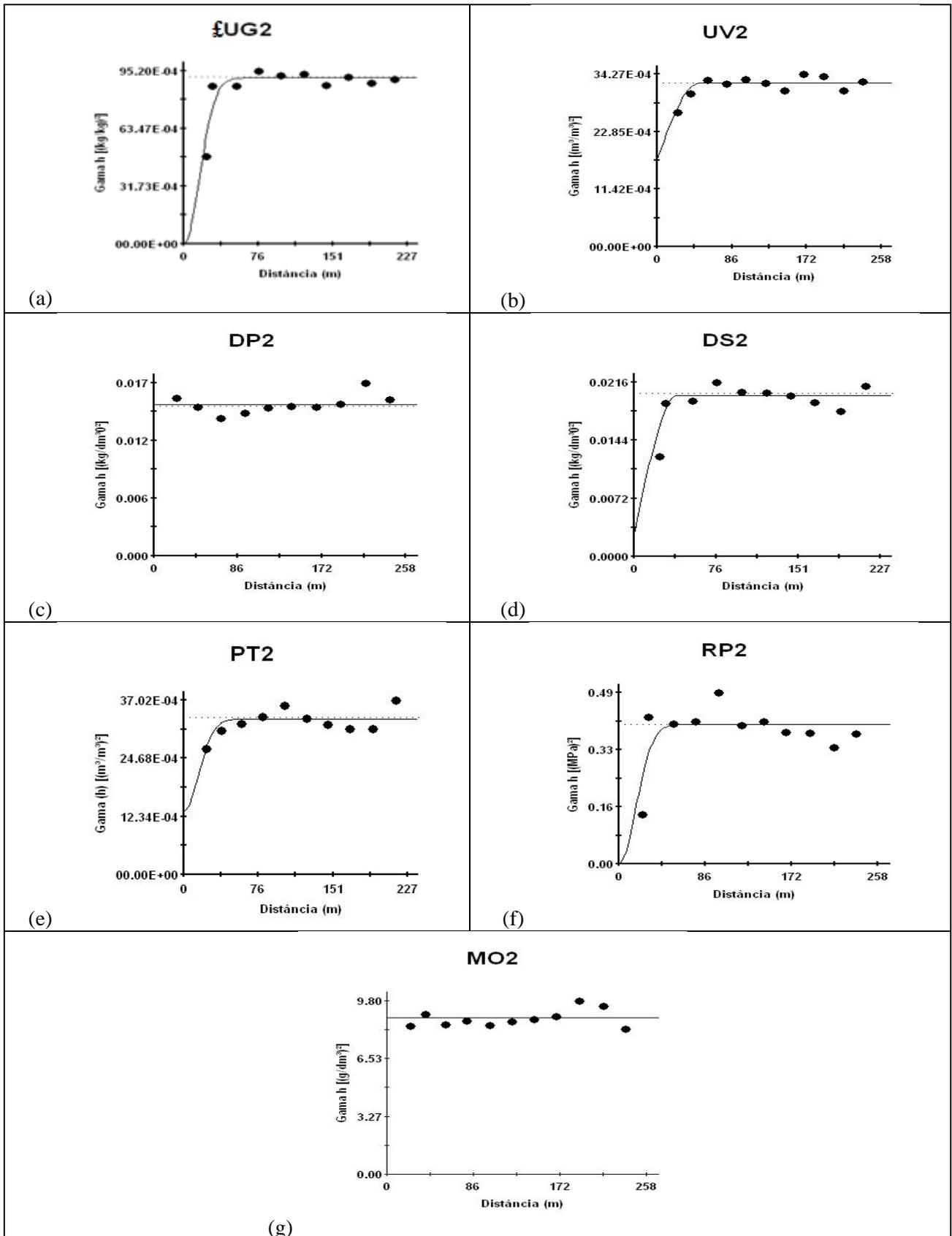


Figura 7 - Semivariogramas simples dos atributos físicos ξ UG2, UV2, DP2, DS2, PT2, RP2 e MO2 de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico.



4.3.1.3 Mapas de krigagem dos atributos

Na Figura 10 podem ser observados os mapas de krigagem para os atributos da cultura da cana-de-açúcar em primeiro corte, variedade IAC955000. Em relação ao mapa de krigagem da PRO (Figura 10e) constatou-se que no terço vertical à direita, nas duas extremidades, a ocorrência das produtividades variando de 88 a 106,7 t ha⁻¹. No terço médio horizontal à esquerda, ocorreram às maiores produtividades de cana-de-açúcar variando de 106,7 a 125 t ha⁻¹.

Para os mapas de krigagem dos atributos ATR, POL e PUR constataram-se elevadas relações e semelhanças entre os mapas obtidos. Em que no primeiro terço vertical à esquerda, no extremo oeste, há isolinhas bem semelhantes que expressam os menores valores desses atributos, em que o ATR ficou em 154,1 kg t⁻¹ (Figura 10b), o POL variou de 15,8 a 16,4 % (Figura 10d) e a PUR ficou em 83,7 % (Figura 10c). No terço vertical inferior, nos dois quadrantes a direita, foram observados os maiores valores para ATR, POL e PUR. O ATR nessa região foi de 164,2 kg t⁻¹, o POL variou de 16,4 a 17,0 % e a PUR variou de 85,7 a 87,5 %. Esses atributos se correlacionam, pois fazem alusão ao açúcar contido nos colmos da cana, por isso a semelhança direta dos mapas.

Para o mapa de krigagem do STD (Figura 10a), observou-se relação e semelhança com o mapa de krigagem da PRO, onde os valores maiores que 8,8 plantas por m² foi observado no terço médio horizontal a esquerda e os menores valores entre 5,7 e 7,3 plantas por m² foram observados no terço vertical a direita, nas duas extremidades. Para o mapa de krigagem de ATR (Figura 10b), observou-se que os maiores valores de ATR de 164 kg t⁻¹ foram encontrados na extremidade inferior do terço vertical direito e os menores valores de ATR de 154,1 kg t⁻¹ foram encontrados ao longo do terço vertical esquerdo, evidenciando comportamento inverso ao mapa de krigagem da PRO, onde foram encontrados os maiores valores de PRO, foram encontrados os menores valores de ATR. Para que possa haver maior acúmulo de sacarose no interior dos colmos da cana-de-açúcar, deve haver paralisação no crescimento vegetativo da planta e as regiões de maiores produtividades encontradas na área evidenciam que não houve paralisação do crescimento vegetativo da planta nestes locais, portanto, houve menor acúmulo de sacarose nos colmos da planta.

Figura 8 - Validação Cruzada dos atributos da produtividade da cana-de-açúcar.

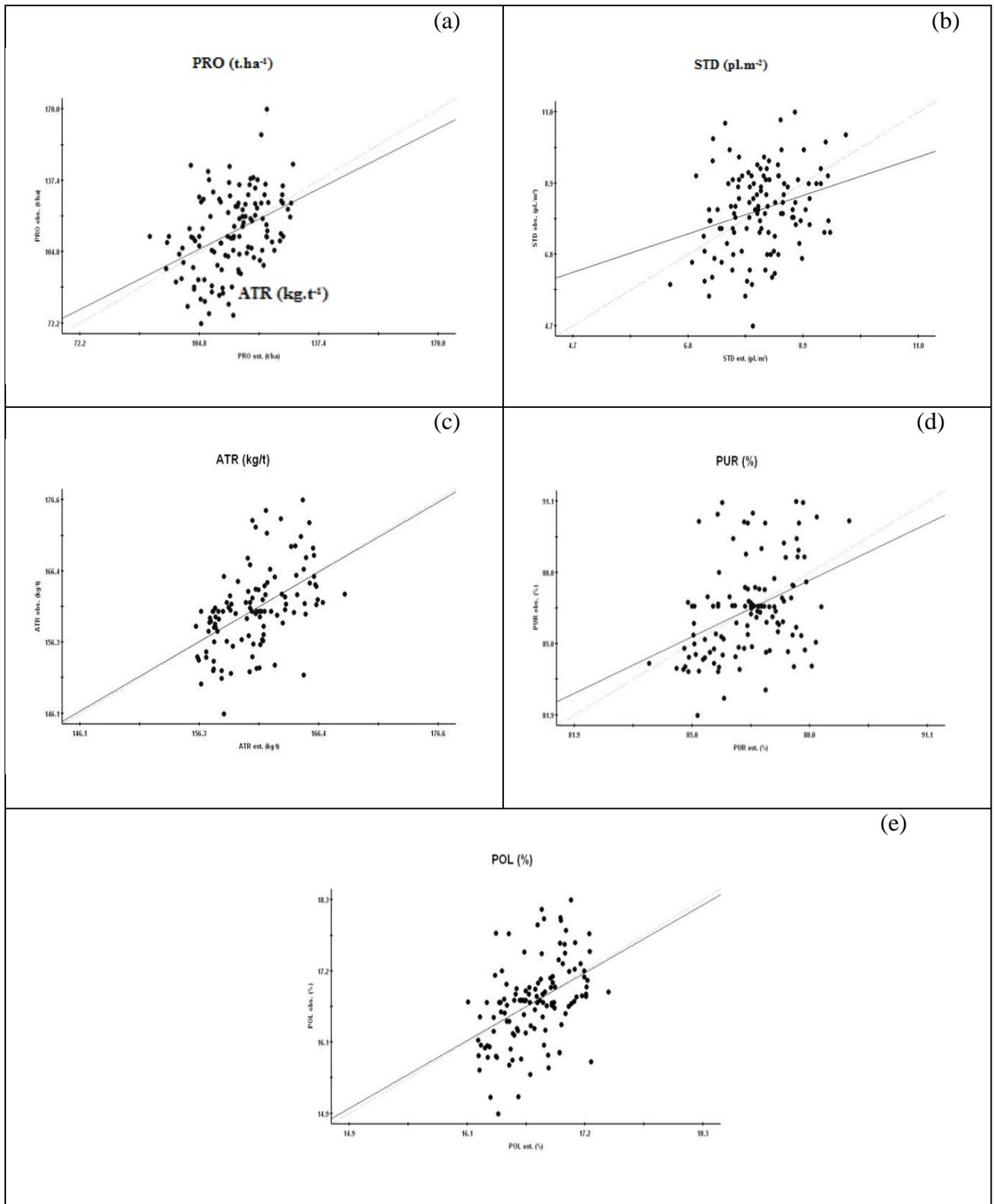
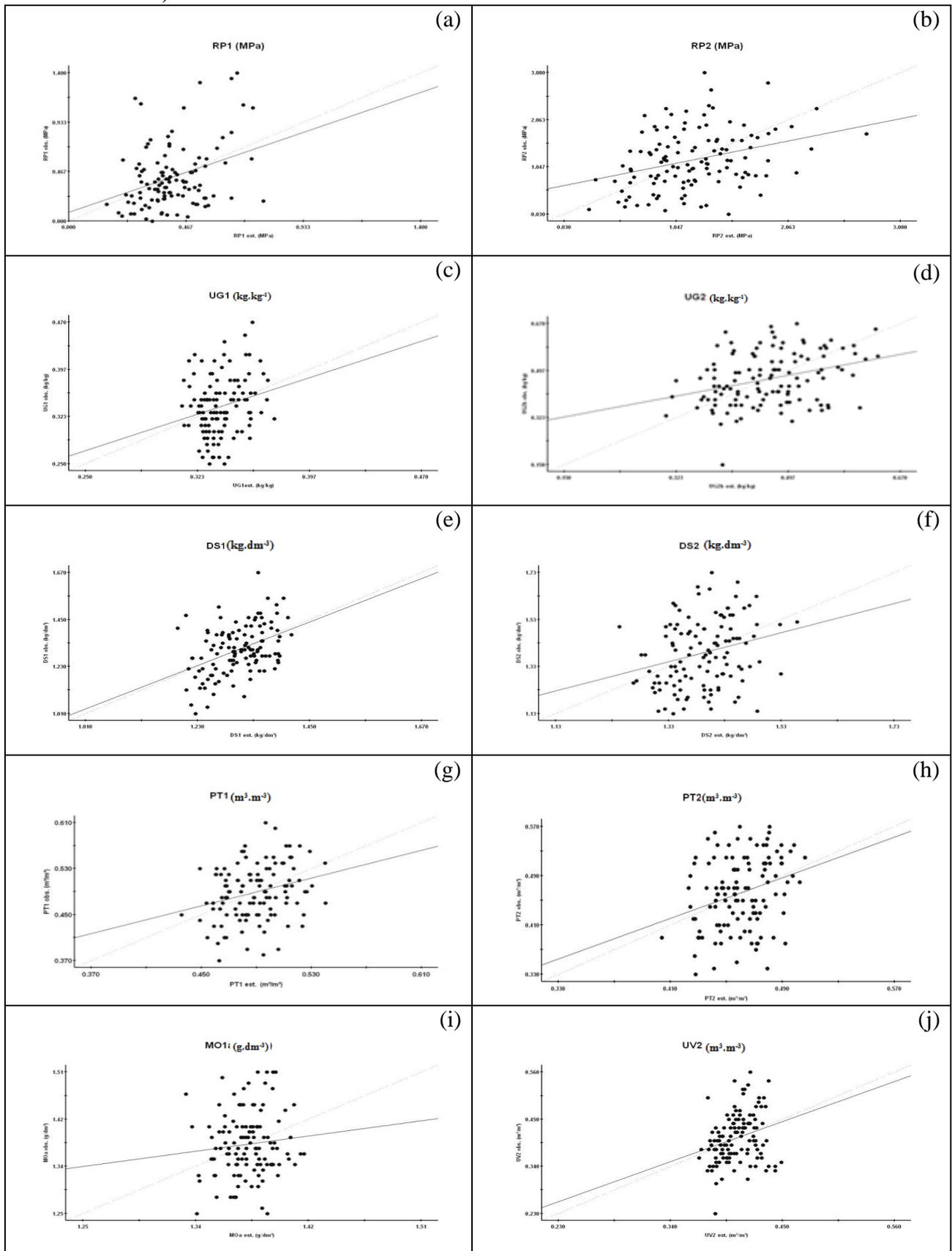


Figura 9 - Validação cruzada dos atributos (RP1, RP2, UG1, UG2, DS1, DS2, PT1, PT2, MO1, UV2) de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.



Na Figura 11 estão apresentados os mapas de krigagem para os atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. Nos mapas de krigagem para os atributos RP1 e UG1 houve uma semelhança nos dois primeiros terços verticais a esquerda, em que a UG1 variou de 0,310 a 0,333 kg kg⁻¹ (Figura 11c) e a RP1 variou de 0,00 a 0,4 MPa (Figura 11a). Na mesma linha comparativa entre os mapas de krigagem dos atributos do solo, para os atributos RP2 (Figura 11b) e UG2 (Figura 11d), houve semelhança no terço vertical direito onde se manifestaram áreas com umidade de 0,360 kg kg⁻¹ em sobreposição a áreas de resistência do solo à penetração de 0,010 MPa. A umidade no solo é responsável pela diminuição das forças de coesão do solo e consequentemente redução das forças de resistência do solo à penetração.

Nos mapas de krigagem dos atributos PT1 e DS1, houve semelhança da distribuição espacial dos dois atributos, com relação inversa. No terço vertical das figuras a direita, em que a PT1 variou de 0,460 a 0,510 m³ m⁻³ (figura 11e) e a DS1 variou de 1,10 a 1,25 kg dm⁻³ (Figura 11g). No terço vertical a esquerda, a PT1 variou de 0,410 a 0,460 m³ m⁻³ e a DS1 variou de 1,25 a 1,39 kg dm⁻³. E assim se percebe no restante das figuras a relação inversa entre os valores dos atributos distribuídos espacialmente. Há uma relação inversa entre a porosidade e densidade do solo, uma vez que o solo mais poroso apresenta menor densidade.

Nos mapas de krigagem dos atributos PT2, DS2 e RP2 houve semelhança da distribuição espacial dos atributos, principalmente no terço vertical à esquerda onde os valores de PT2 variaram de 0,370 a 0,483 m³ m⁻³ (Figura 11f), os valores de DS2, nas áreas correspondentes a PT2, variaram de 1,170 a 1,503 kg dm⁻³ (Figura 11h) e os valores de RP2 foram de 0,010 MPa (Figura 11b), este principalmente a noroeste da figura. No terço vertical à direita os valores de PT2 variaram de 0,427 m³ m⁻³, os valores de DS2 variaram de 1,170 a 1,337 kg dm⁻³. Na porção central das figuras, os valores de PT2 variaram de 0,370 a 0,427 m³ m⁻³, os valores de DS2 variaram de 1,337 a 1,503 kg dm⁻³. Nesses casos, além da relação inversa entre a porosidade e a densidade do solo, percebe-se uma relação positiva entre a densidade e a resistência do solo à penetração, onde os valores aumentados de densidade do solo levaram a um aumento nos valores de resistência à penetração e, percebe-se uma relação inversa entre a porosidade total e a resistência do solo à penetração, onde os maiores valores de porosidade levaram aos menores valores de resistência do solo à penetração.

4.3.2 Análise semivariográfica cruzada

4.3.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem dos atributos

Entre dois atributos quaisquer, se apresentarem elevado coeficiente de correlação de Pearson e significativo, e ambos derem semivariograma, a co-krigagem com certeza existirá. Entretanto, se apresentarem baixo coeficiente de correlação de Pearson e não significativo, mas ambos apresentarem semivariograma, a co-krigagem pode ou não existir.

Neste sentido, estão relacionados no Quadro 10 os parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados entre atributos da planta de cana-de-açúcar e atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu (GO). Assim, ficou comprovado que as co-krigagens: PRO = f (STD); PRO = f (PUR), PRO = f (ATR) e PRO = f (POL) foram os atributos de planta que apresentaram dependência e correlação espacial. Já para as co-krigagens entre atributos de planta e atributos do solo foram PRO = f (RP2) e PRO = f (MO1).

A relação decrescente dos coeficientes de determinação espacial (r^2) dos semivariogramas cruzados, que podem ser observados no Quadro 10, foi a seguinte: 1) PRO = f (MO1) (0,821); 2) PRO = f (PUR) (0,771); 3) PRO = f (ATR) (0,746); 4) PRO = f (STD) (0,737); 5) PRO = f (POL) (0,492); 6) PRO = f (RP2) (0,187).

Os melhores alcances foram obtidos em ordem decrescente para as co-krigagens a seguir: 1) PRO = f (MO1) (108,3m); 2) PRO = f (PUR) (101,7m); 3) PRO = f (ATR) (75,5m); 4) PRO = f (RP2) (73,1m); 5) PRO = f (POL) (65,9m); 6) PRO = f (STD) (40,0m). No entanto, se for considerada a relação decrescente das validações cruzadas analisada a partir da grandeza do coeficiente de correlação (r), o comportamento passa a ser (Quadro 10) para as co-krigagens entre atributos de planta: 1) PRO = f (ATR) (0,439); 2) PRO = f (STD) (0,436); 3) PRO = f (POL) (0,425); 4) PRO = f (PUR) (0,409). Já para as co-krigagens entre atributos de planta versus atributos do solo passa a ser: 1) PRO = f (MO1) (0,425) e 2) PRO = f (RP2) (0,425).

Nas Figuras 12 a 17, estão contidos os semivariogramas cruzados, as validações cruzadas e os mapas de co-krigagens entre os atributos que apresentaram dependência espacial entre si. Assim, entre os atributos de planta, as co-krigagens atestadas pelo coeficiente de determinação espacial (r^2): PRO = f(PUR) (Quadro 10) (Figura 15) que evidenciou que 77,1 % da variabilidade espacial da PRO foram explicadas pela variabilidade da PUR para essa co-krigagem, o modelo ajustado foi esférico, com alcance de 101,7 metros e um ADE muito alto (85,9%); PRO = f(ATR); PRO = f(POL) e PRO = f(STD) (Figura 12); (Figura 14) e (Figura 13), em que foram modelados

semivariogramas cruzados do tipo esférico, com o ATR explicando 74,6% da PRO, com alcance de 75,5 metros, ADE muito alto (97,0%) (Quadro 10), STD explicando 73,7% da PRO com alcance de 40,0 metros, ADE muito alto (80,8%) (Quadro 10) e a POL explicando 49,2% da PRO com alcance de 65,9 metros, ADE muito alto (71,0%) (Quadro 10).

Para essas co-krigagens pode-se definir duas zonas específicas de manejo em que, quando o ATR (Figura 12), a POL (Figura 14) e a PUR (Figura 15) atributos da planta da cana-de-açúcar, estiverem variando entre 159,2 a 154,1 kg t⁻¹, 16,4 a 15,8 % e 85,7 a 83,5 %, respectivamente, em seus menores valores, a PRO apresentará uma variação entre 106,7 a 125,3 t ha⁻¹ seus maiores valores. E quando os mesmos atributos variarem entre, respectivamente, 159,2 a 164,2 kg t⁻¹, 16,4 a 17,0% e 85,7 a 87,7% seus maiores valores, a PRO apresentará uma variação entre 88,0 a 106,7 t ha⁻¹ por apresentarem uma relação indireta.

Já para a correlação espacial direta entre PRO = f(STD) (Figura 13) pode-se distinguir duas zonas de manejo, pois quando o STD variar entre 7,3 a 8,8 pl m⁻², seus maiores valores, PRO apresentará uma variação entre seus maiores valores de 106,7 a 125,3 t ha⁻¹, já quando o STD variar entre 5,7 a 7,3 pl m⁻², seus menores valores, PRO apresentará valores de 88,0 a 106,7 t ha⁻¹.

No âmbito das co-krigagens entre os atributos de planta *versus* atributos de solo pode-se observar a modelagem de um semivariograma cruzado direto para a relação PRO = f(MO1) (Figura 17), apresentando semivariograma cruzado do tipo exponencial, com alcance de 108,3 metros com ADE médio (56,2%). Pode-se observar que a MO1 explicou 82,1% da PRO (Quadro 13). Para essa co-krigagem pode se definir duas zonas específicas de manejo em que, quando o atributo do solo MO1 variar entre 19,5 e 22,6 g dm⁻³, em seus menores valores, a PRO apresentará uma variação entre 88, a 106,9 t ha⁻¹ seus menores valores. E quando os valores de MO1 variarem entre 22,6 e 25,7 g dm⁻³, em seus maiores valores, a PRO apresentará uma variação entre 106,7 a 125,3 t ha⁻¹ seus maiores valores.

Na análise da co-krigagem do ajuste PRO=f(RP2) (Figura 16), que evidenciou que 50,0% da variabilidade espacial da PRO pode ser explicada pela variabilidade do RP2, pode-se definir uma zona de manejo específica, nas quais o RP2 apresentou seus menores valores variando de 0,010 a 1,060 MPa, a PRO variou de 106,7 a 125,3 t ha⁻¹, seus maiores valores.

Figura 10 - Mapas de krigagem dos atributos da cana-de-açúcar (ARC, ATR, POL, PRO, PUR e STD).

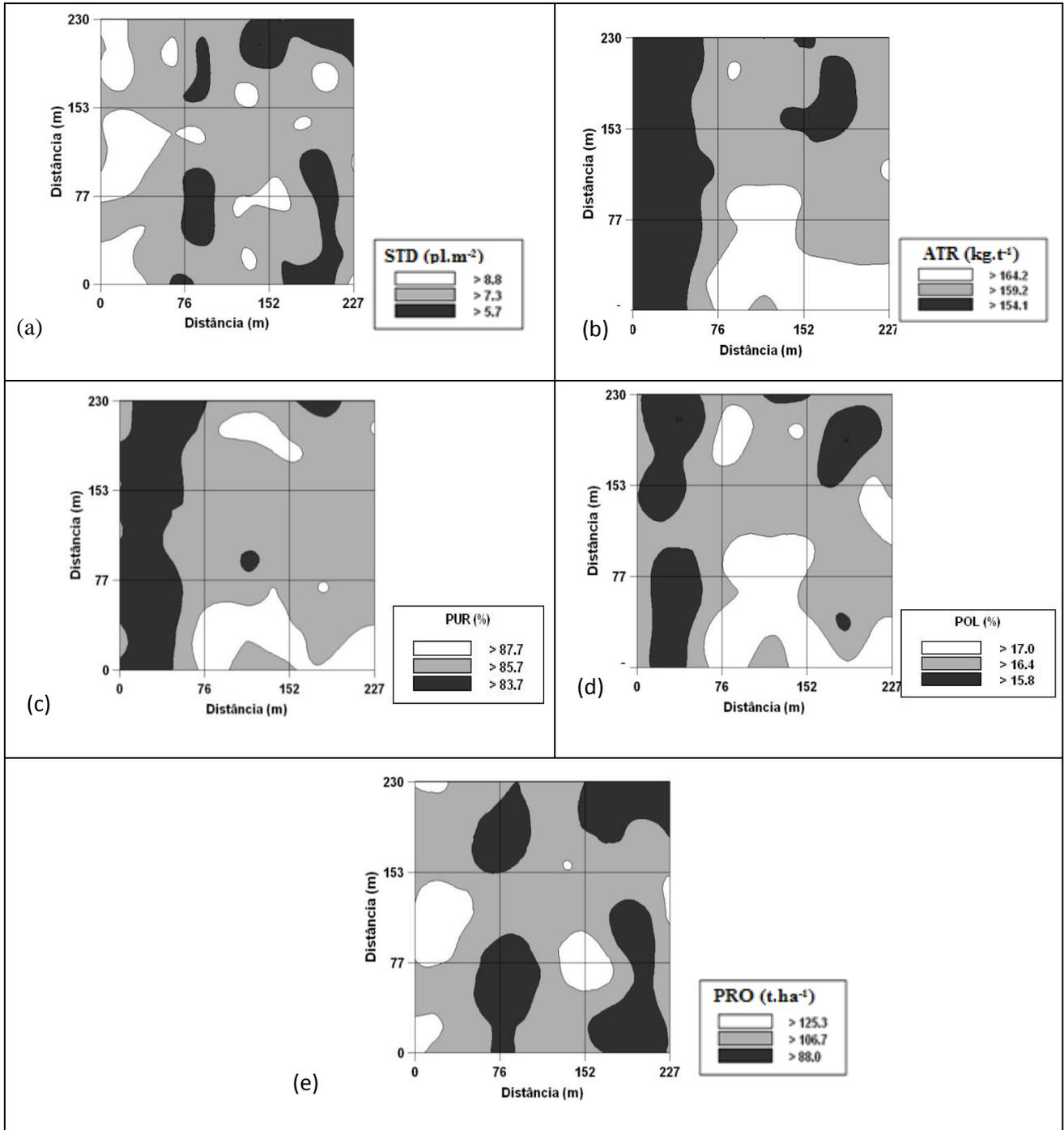
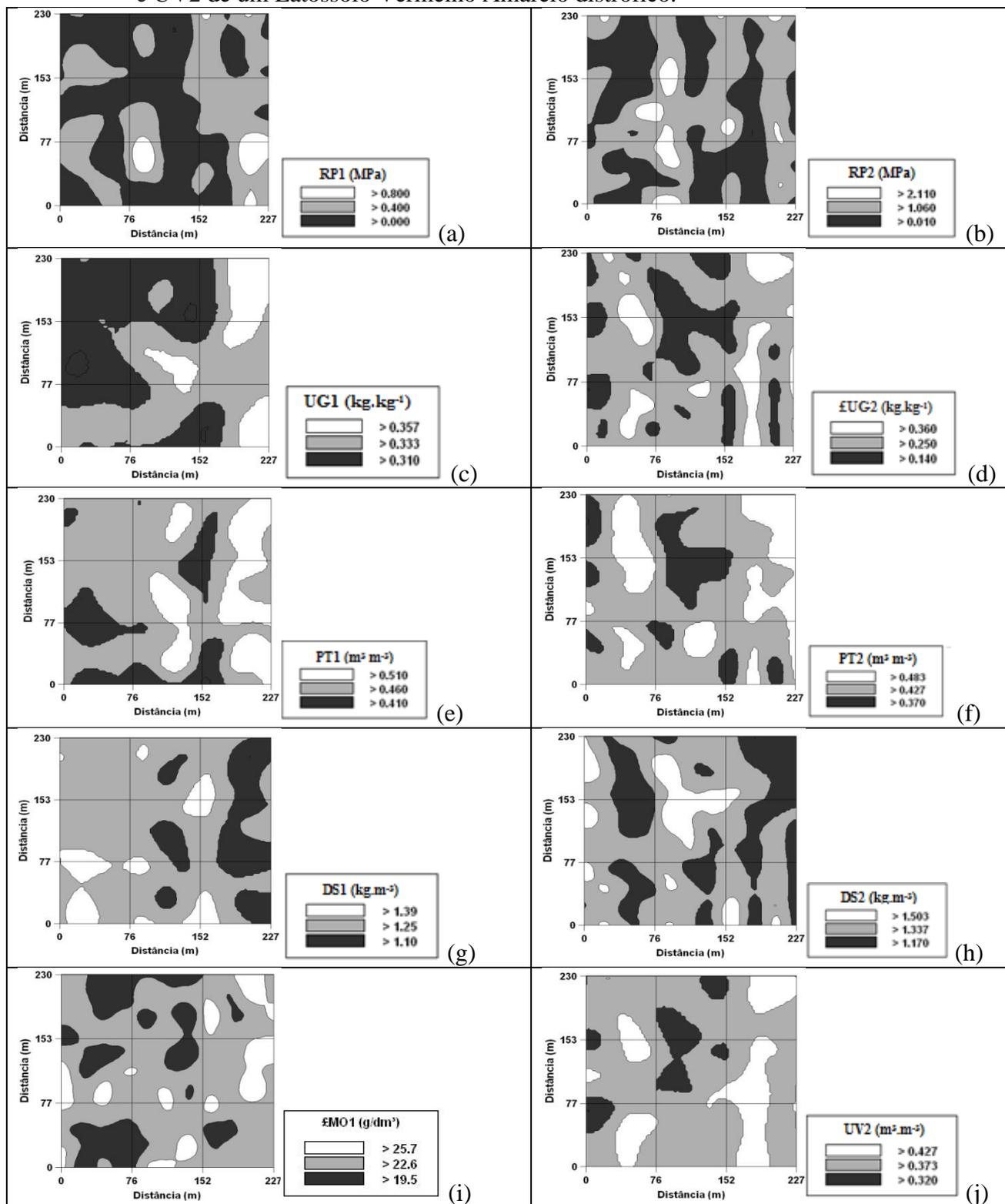


Figura 11 - Mapas de krigagem dos atributos RP1, RP2, UG1, ϵ UG2, PT1, PT2, DS1, DS2, MO1 e UV2 de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.



Quadro 10 - Parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados para atributos da cultura da cana-de-açúcar e de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

Atributos ^(a)	Parâmetros										
	Modelo ^(b)	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ + C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
PRO=f(STD)	esf. (41)	3,9029	20,280	40,0	0,737	21,5	0,808	MA	40,77	0,639	0,436
PRO=f(ATR)	esf. (190)	-0,9500	-31,310	75,5	0,746	93,3	0,970	MA	36,97	0,676	0,439
PRO=f(POL)	esf. (204)	-0,6560	-2,2610	65,9	0,492	5,85.10 ⁻¹	0,710	AL	42,67	0,620	0,425
PRO=f(PUR)	esf. (44)	-0,1460	-10,360	101,7	0,771	14,6	0,859	MA	45,47	0,594	0,409
PRO=f(RP2)	esf. (219)	-1,3750	-2,7510	73,1	0,187	1,9	0,500	ME	42,67	0,620	0,425
PRO=f(MO1)	exp. (217)	0,7800	1,7820	108,3	0,821	5,52.10 ⁻²	0,562	ME	42,67	0,620	0,425

^(a)PRO=f(STD), PRO=f(ATR), PRO=f(POL), PRO=f(PUR), PRO=f(RP2), PRO=f(MO1) são respectivamente produtividade de cana-de-açúcar em função do número de plantas por m², produtividade de cana-de-açúcar em função dos açúcares totais recuperáveis, produtividade de cana-de-açúcar em função da porcentagem de sacarose, produtividade de cana-de-açúcar em função da porcentagem de pureza, produtividade de cana-de-açúcar em função da resistência a penetração na 2^a camada de solo e produtividade de cana-de-açúcar em função da matéria orgânica do solo na 1^a camada de solo. ^(b)exp = exponencial, esf = esférico, com seus devidos pares de lags; ^(c)sqr = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d)ade = avaliador da dependência espacial, sendo MA = muito alta, al = alta, me = média e ba = baixo.

Figura 12 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade em função de ATR da cultura da cana-de-açúcar.

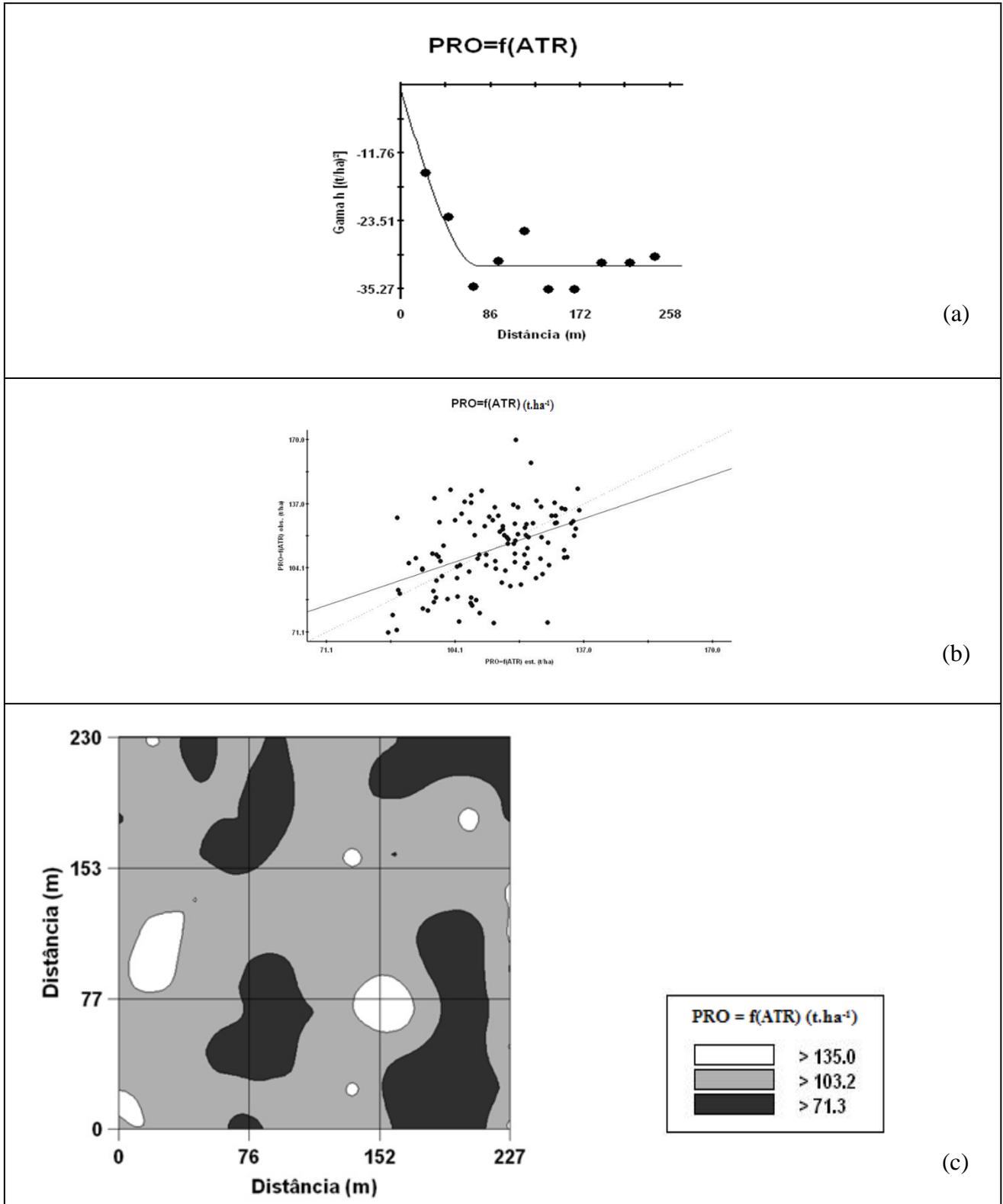


Figura 13 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade em função de STD da cultura da cana-de-açúcar.

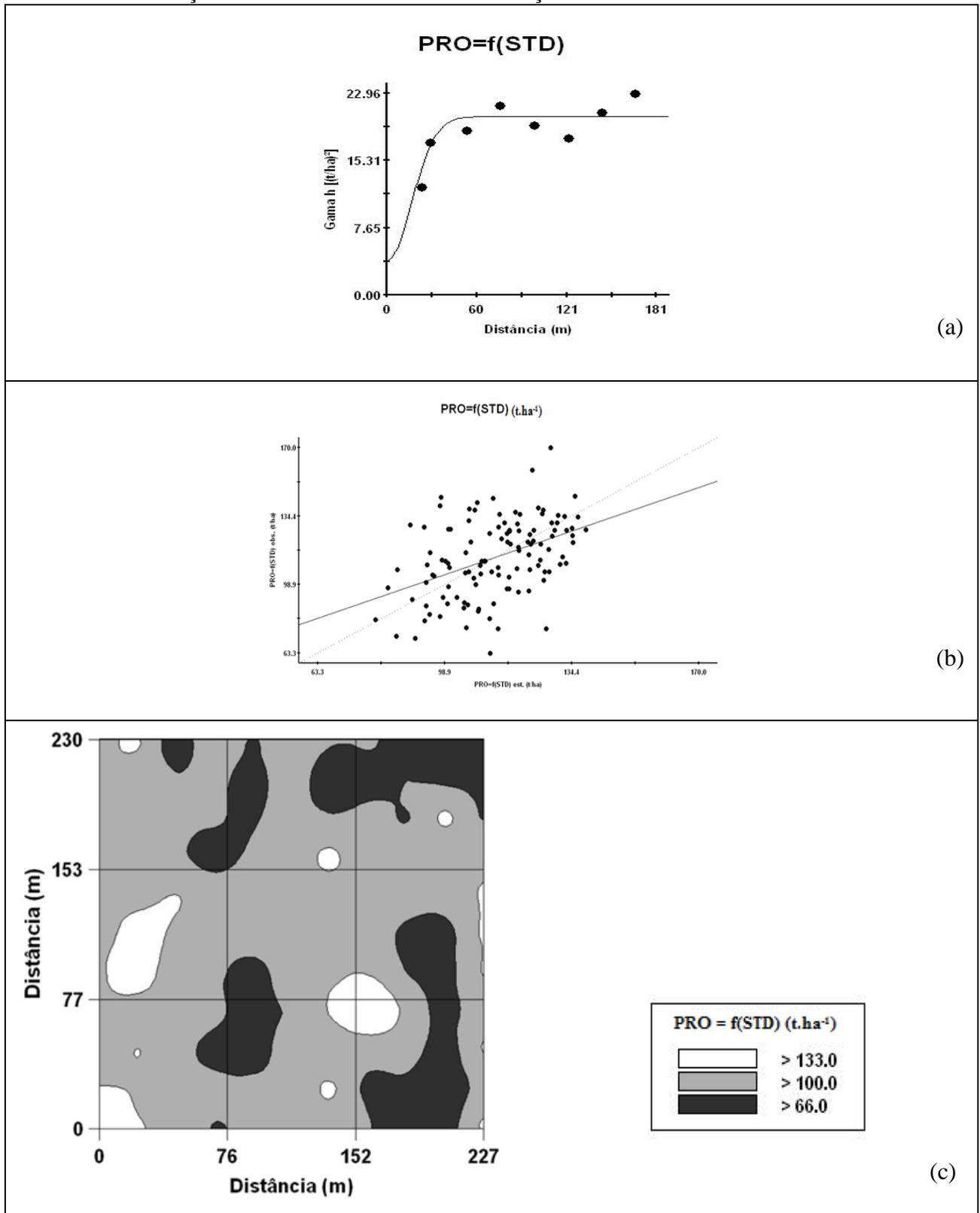


Figura 14 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade em função de POL da cultura da cana-de-açúcar.

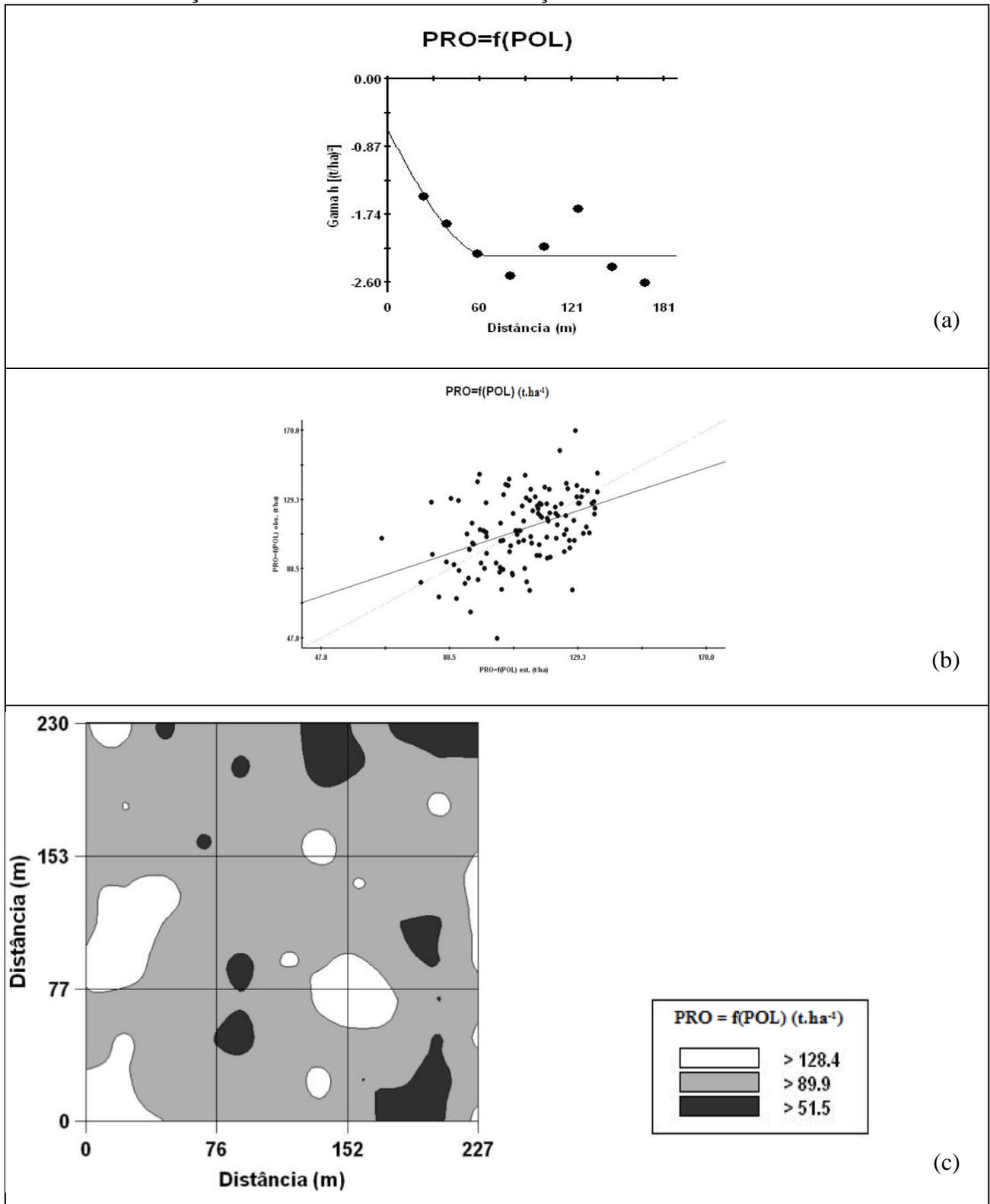


Figura 15 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade em função de PUR da cultura da cana-de-açúcar.

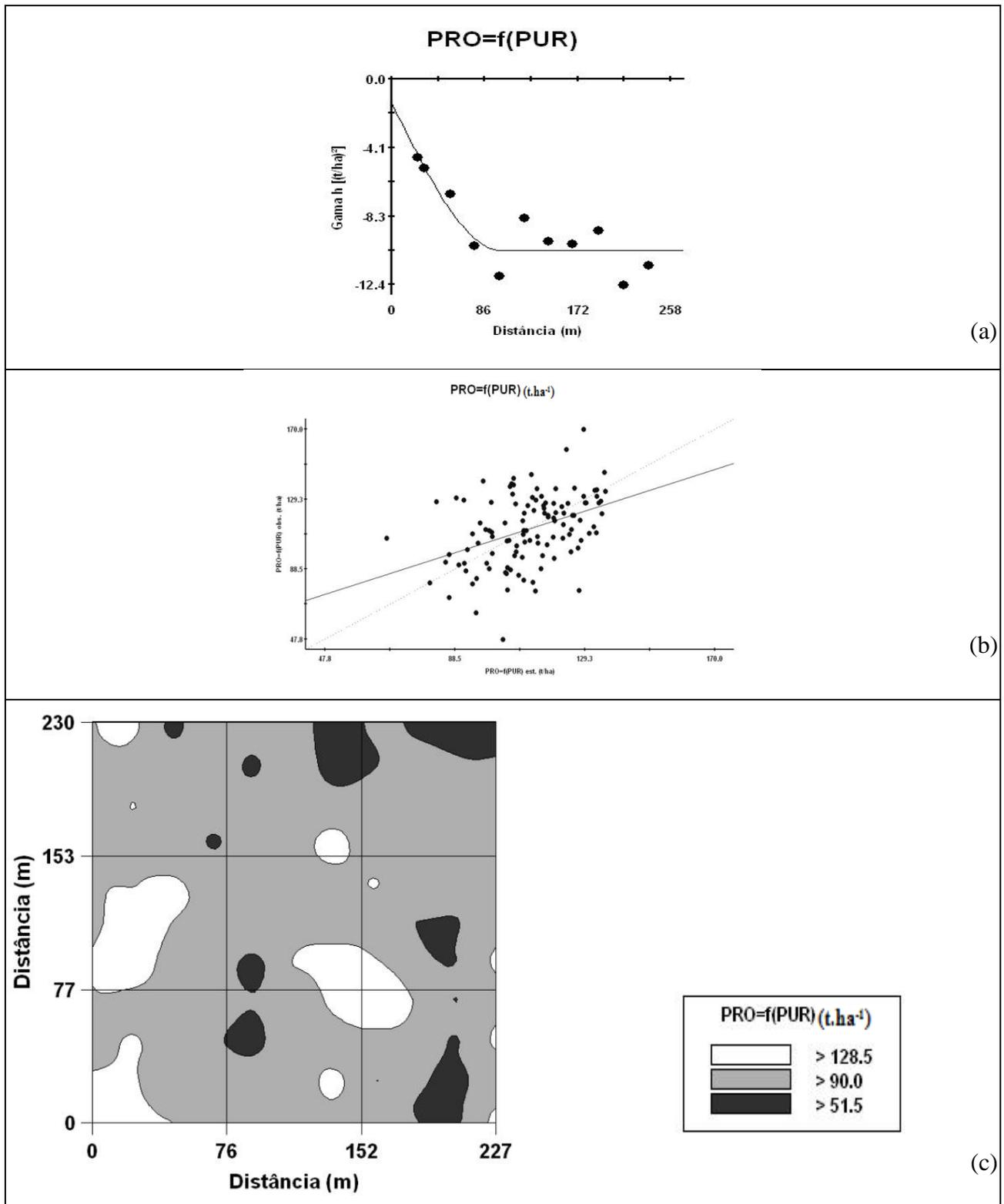


Figura 16 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função da RP2 de um Latossolo Vermelho-Amarelo, distrófico.

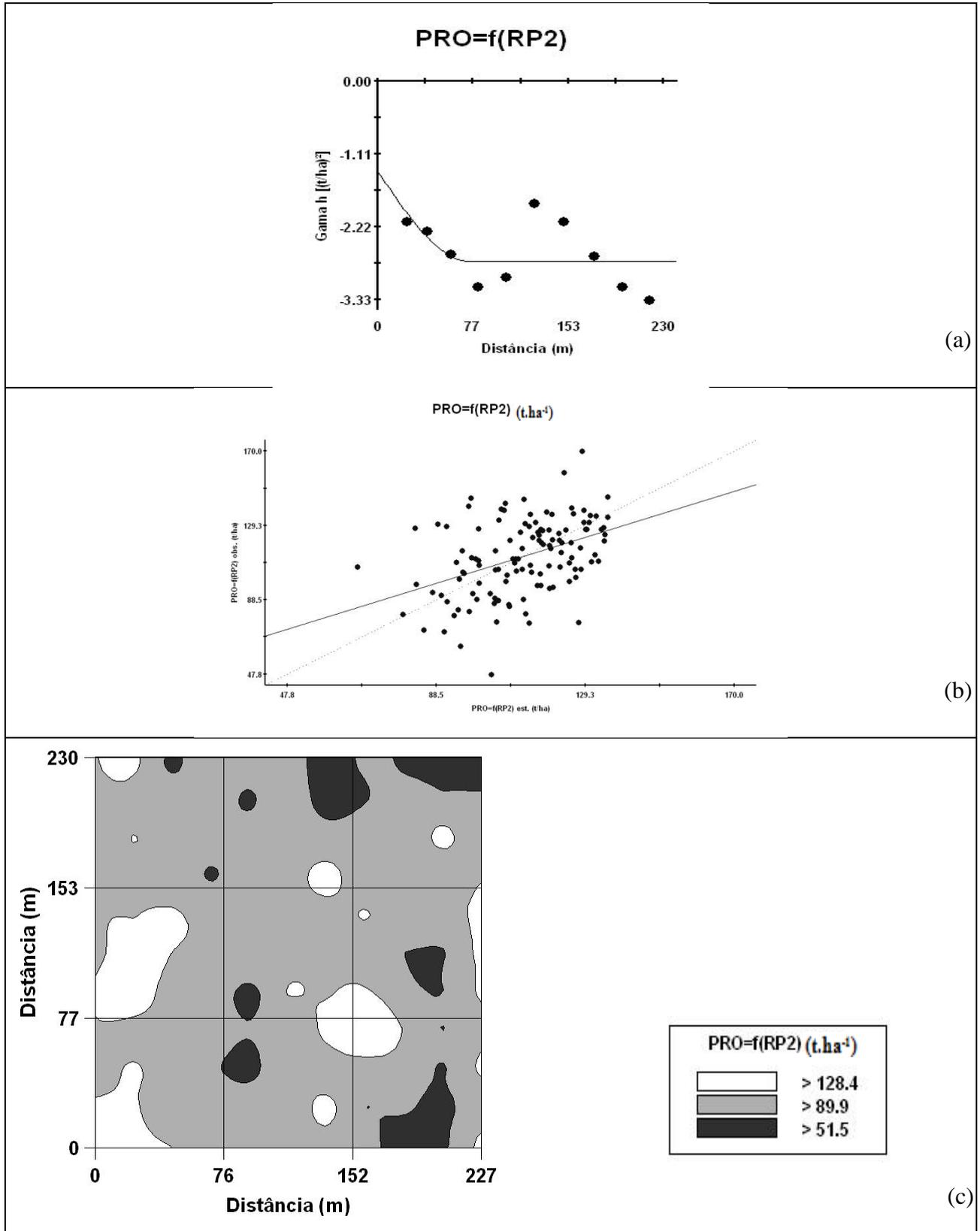
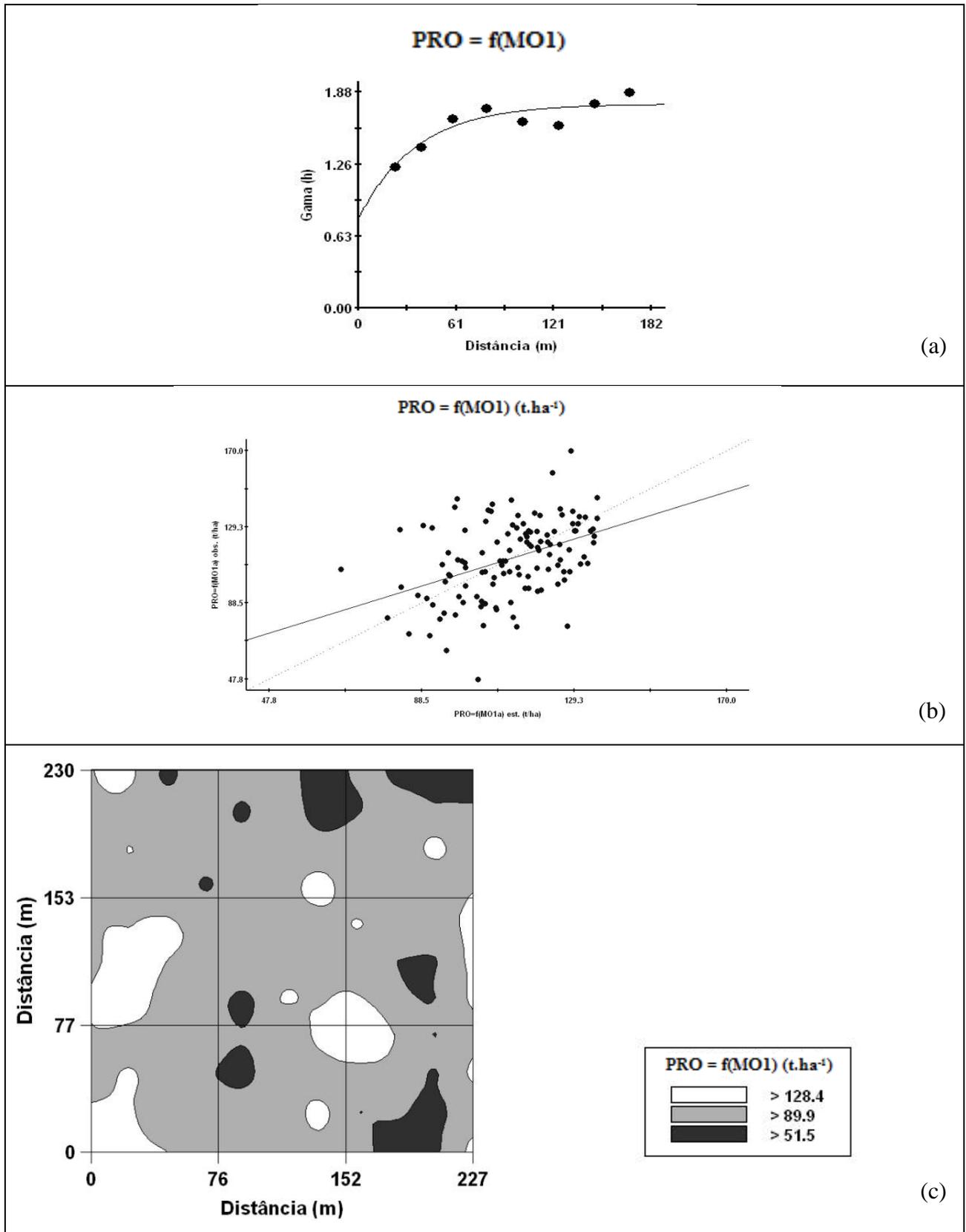


Figura 17 - Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função da MO1a de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico .



CONCLUSÕES

1- O atributo matéria orgânica na camada de 0,0 a 0,25 m de profundidade no solo correlacionou-se espacialmente com a produtividade de cana-de-açúcar definindo duas zonas específicas de manejo, onde a produtividade variou entre 88-106 t ha⁻¹ e 106-125,3 t ha⁻¹.

2 - Os atributos açúcares totais recuperáveis (ATR), a porcentagem de sacarose do caldo (POL) e a porcentagem de pureza (PUR) correlacionaram-se indireta e espacialmente com a produtividade de cana-de-açúcar, de forma a definir duas zonas específicas de manejo. Nelas, a produtividade variou entre 88-106 t ha⁻¹ e 106-125,3 t ha⁻¹.

3 – O estande de plantas apresentou uma correlação direta com a produtividade da cana planta indicando que, para a variedade IACSP 95 5000, a máxima produtividade de 170 t ha⁻¹ somente poderá ser obtida com 11 plantas por metro quadrado. Do ponto de vista espacial, a melhor correlação com a produtividade da cana-de-açúcar é determinada pelo componente da produção população de plantas.

4 – A resistência do solo a penetração correlacionou-se negativamente, na camada de 0,25 – 0,50 m, com o estande de plantas m⁻² e com a produtividade da cana-de-açúcar. A redução da resistência do solo à penetração em 3,046 MPa proporcionaria incremento na produtividade de 20,19 t ha⁻¹.

5 - Visando-se auxiliar futuros trabalhos voltados à agricultura de precisão, os quais empreguem os mesmos atributos do solo e da planta que os do presente estudo, os alcances das dependências espaciais recomendados deverão estar compreendidos entre 31,2 e 180,3 metros.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J.A. & REINERT, D.J. Densidade radicular do milho considerando os atributos de um solo com horizonte B textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:539-549, 2001.
- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FLORIN, J.E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. & FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19:115-119, 1995.
- ANGUINONI, I.; MEURER, E.J.; Suprimento de nutrientes pelo solo e sua absorção pelas plantas. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.) **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Genesis, 2004. p.33-43.
- ANJOS, J.T. et al. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, n.1, p.139-145, 1994.
- ARBEX, M. A. **Avaliação dos efeitos do material particulado proveniente da queima da plantação de cana-de-açúcar sobre a morbidade respiratória na população de Araraquara – SP**. São Paulo, 2001. Tese de Doutorado - Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo.
- ARMESTO, M.V. **Variabilidade espacial e temporal da erosión en solos de cultivo**. 1999. 118f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências, Universidade da Coruña, La Coruña.
- BAKKER, D. M.; DAVIS, R. J.. Soil deformation observations in a Vertisol under field traffic. **Australian Journal of Soil Research** 33(5): 817-832. 1995.
- BAUDER, J.W.; RANDAL, G.W. & SWAN, J.B. Effect of four continuous tillage system on mechanical impedance of a clay loam soil. **Soil Science Society of America Journal**. J., 45:802-806, 1981.
- BAUMGARTL, T. & HORN, R. Effect of aggregate stability on soil compaction. **Soil Till. Res.**, 19:203-213, 1991.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Matéria orgânica do solo: fundamentos e caracterização**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.9-26.

BELTRAME, L. F. S.; TAYLOR, J. C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lav. Arroz.**, v. 33, p. 59-62, 1980.

BEUTLER, A. N. et al. Densidade relativa ótima de latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciencia do solo**, v. 29, p. 843-849, 2005.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ALVARO, P. SILVA. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.146-151, jan./abr. 2007.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.575-580, 2004.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: Klute, A., ed. Methods of soil analysis, physical, chemical and mineralogical methods. **Madison, America Society of Agronomy**, 1986. p 463-478.

BRAGA, J.A. **Inter-relações da produtividade de cana-de-açúcar com atributos físico-químicos de um argissolo vermelho eutrófico do noroeste paulista**. Tese (Mestrado em Sistema de Produção) Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia, p.87, 2011.

BRAIDA, J. A. ; BAYER, C. ; ALBUQUERQUE, J. A. ; REICHERT, J. M. . Matéria Orgânica e seu Efeito na Física do Solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. VII, p. 221-278, 2011.

BRONICK, C.J. & LAL, R. **Soil structure and management: A review**. *Geoderma*, 124:3-22, 2005.

BUENO, B. S. ; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: USP, EESC, 1998, v. 1, 131p.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, v.3, p 519-524, 1990.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 617-630, 2010.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F.. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba : Degaspar, 1997. 132p.

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

CAMPOS, P. F., Jr, J. A., SOARES, R. A. B., RIBEIRO, P. H. P., & EVANGELISTA, A. W. P. Resposta da cultura da cana-de-açúcar a irrigação de salvamento e ao uso de palha na cobertura do solo na região do Cerrado. In: **X Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola e XLI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, CLIA/CONBEA**, Vol. 18, 2012.

CANARACHE , A. P. A generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. *Soil ; Tillage Resource*. Amsterdam, v. 16, p. 51-70, 1990.

CARVALHO LA, NETO VJM, SILVA LF, PEREIRA JG, NUNES WAGA & CHAVES CHC (2008) Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante-MS. **Agrarian**, 1:07-22.

CARVALHO, L.A.; JUNIOR, C.A.S.; NUNES, W.A.G.A.; MEURER, I. & JÚNIOR, W.S.S. Produtividade e viabilidade econômica da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo no Centro-Oeste do Brasil. **R. Ci. Agrárias**, v.34, 2011.

CINTRA, F. L. D., MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.197-201, 1983.

CINTRA, F. L. D.; MELLO IVO, W. M. P.; SILVA, L. V.; SILVA, M. L. L. L. **Distribuição das Raízes de Cana-de-Açúcar em Sistemas de Cultivo com Adubação Orgânica e *Crotalaria spectabilis***. 2006. Disponível em <<http://www.cpatc.embrapa.br>>. Acesso em 10 Jun. 2013.

COLET, M. J.; SVERZUT, C. B.; WEIRICH NETO, P. H.; SOUZA, Z. M. Alterações em atributos físicos de um solo sob pastagem após escarificação. **Ciência Agrotecnológica**, v. 33, n. 2, p. 361-368, 2009.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento**, agosto/2013 - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : Conab 2013.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, quarto levantamento**, abril/2014 - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : Conab 2014.

CONSECANA - Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do estado de São Paulo -. **Manual de instruções**. 5.ed. Piracicaba, 2006. 112p.

COOPER, A. W., A. C. TROUSE, AND W. T. DUMAS. **Controlled traffic in row crop roduction**. In: PROC. 7., 1969, INTERNATIONAL CONGRESS OF C.I.G.R., 1-6. Baden-Baden, Germany: CIGR. 1969.

COOPERSUCAR UNIÃO. **Características Agronômicas das Variedades SP**. 2012. Disponível em: <www.socicana.com.br/variedadescana/variedades%20sp.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2013.

CORÁ, J.E.; BERALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.2, p.374-387, 2006.

COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:527-535, 2003.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A.C. ; FONTES, L.E.F. Vocabulário da ciência do solo. Campinas: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1993. 90p.

DALCHIAVON FC, CARVALHO M.P.; NOGUEIRA DC, ROMANO D, ABRANTES FL, ASSIS JT & OLIVEIRA MS. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 41:08-19, 2011.

DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M. & MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob Sistema Plantio Direto. **R. Ci. Agron**, 43:453-461, 2012.

DAVIS, J.C. **Statistics and data analysis in geology**. 2.ed. New York, John Wiley, 1986. 646p.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M. ; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, p703-709, 1999.

DEMATTÊ, J.L. I. Recuperação de manutenção da fertilidade dos solo. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, SP, n. 111, p.1- 24, 2005.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. **Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth**. *Geoderma*, v.120, p.201-214, 2004.

DIAS JUNIOR, M. de S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. 1994. 114p. **Michigan State University**, East Lansing, 1994. 114p.

DIAS JUNIOR, M.S. & MIRANDA, E.E.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de lavras (MG). **Ciênc. agrotec.** v. 24, p. 337-346, 2000.

DUTRA FILHO, J.A.; MELO, L.J.O.T.; RESENDE, L.V.; ANUNCIÇÃO FILHO, C.J. & BASTOS, G.Q. Aplicação de técnicas multivariadas no estudo da divergência genética em cana-de-açúcar. **R. Ci. Agron**, 42:185-192, 2011.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 3 ed., 2013. 353p.

EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Embrapa-Cerrado, 2004. 209 p.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB, 2000. 193 p.

FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V.L., STOLF, R. O subsolador alado como implemento de preparo de solo para a cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.96, n.6, p.33-40, 1980.

FLOWERS, M.D. ; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a Molic Ochraqualf in Northwest Ohio. **Soil Till. Res.**, v.48, p 21-35, 1998.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G. J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, v.26, p.113-121, 2006.

FREIXO, A. A. **Caracterização da matéria orgânica de latossolos sob diferentes sistemas de cultivo por meio de de fracionamento físico e espectroscopia de infravermelho.**, 2000. Dissertação (Mestrado em Agronomia) UFRJ, Rio de Janeiro, 2000. 86 p.

GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J . ; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 28:477-484, 2004.

GIOIA, M.T. **Produtividade e componentes produtivos da cana-de-açúcar correlacionados com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico.** 2011, 91f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Ilha Solteira, SP, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia, 2011.

GÓES, G. B.; GREGGO, T. C.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ANDRIOLI, I. Efeito do cultivo da cana-de-açúcar na estabilidade de agregados e na condutividade hidráulica do solo. **Irriga**, Botucatu-SP, v. 10, n. 02, p. 116-122, 2005.

GOMES, A. da S.; PEÑA, Y.A. Caracterização da compactação por meio de do uso do penetrômetro. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.49, n.426, p.18-20, 1996.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; MATA, J.D.V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.23, n.5, p.1149-57, 2001.

GONÇALVES, N. H. Manejo do solo para implantação da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V. (Org.) et al. **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: CP 2, 2006.

GS+: Geostatistics for environmental sciences. 7. ed. Michigan, Plainwell: **Gamma Desing** Software, 2004. 159p.

GUERIF, J. L'analyse de la porosité: application à l'étude Du compactage des sols. In: MONIER, G.; GROSS, M. J. (Ed.). **Soil compaction and regeneration**. Rotterdam: AAB, 1987. p.122-131.

HAKANSSON, I., VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R., BLUM, W.H., VALENTIN, C., et al. (eds.) **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis, 1997. p.167-179.

HAKANSSON, I.; STENBERG, M.; RYDBERG, T. Long-term experiments with different depths of mouldboard ploughing in Sweden. **Soil and Tillage Research**, v.46, p.209-223, 1998.

HAMZA, M. A.; ANDERSON W. K.. Soil compaction in cropping systems, a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Till. Res.** V. 82, n.2, p.121-145, 2005.

HARRIS, R.F.; CHESTERS, G. & ALLEN, O.N. Dynamics of soil aggregation. **Adv. Agron.**, 18:107-169, 1966.

HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H.; SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.34, n.4, p.535-546, 1988.

HENDERSON, C. W. L. Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform, sandy soils. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 40, p. 497-508, 1989.

HERNÁNDEZ, D. I. M. Efeitos da produção de etanol e biodiesel na produção agropecuária do Brasil. 2008. 163 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Agronegócios, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, UnB, Brasília, 2008.

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

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. **An introduction to geotechnical engineering**. New Jersey, Prentice-Hall, 1981. 733p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; van Ouwkerk, C., eds. Soil compaction in crop production. Amsterdam: **Elsevier**, 1994. p.45-69.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações de curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.7, p.1493-1500, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção agrícola municipal 2011. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Producao_Agricola_Municipal_\[anual\]/2011/pam2011.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Producao_Agricola_Municipal_[anual]/2011/pam2011.pdf)> Acesso em : 12 jan 2013.

IVO, W. M. P. de M. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo de tabuleiros costeiro. In: FERNANDES, M. F.; TAVARES, E. D.; LEAL, M. de L. da S. **Workshop sobre sistema radicular: metodologias e estudos de casos**, Anais. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1999. p.101-138.

KAISER, D.R. Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho. 2010. 151f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

KERTZMANN, F.F. Modificações na estrutura e no comportamento de um Latossolo Roxo provocados pela compactação. São Paulo, SP, 1996. 153p. (Doutorado em Geografia Física, São Paulo) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1996.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relação solo-planta. São Paulo: **Ceres**, 1979. 262p.

KIRBY, J. M., B. G. BLUNDEN, AND C. R. TREIN. Simulating soil deformation using a critical-state model: II. Soil compaction beneath tyres and tracks. **European Journal of Soil Science** v. 48, n.1, p.59-70, 1997. .

KIRUBAKARAN, R.; VENKATARAMANA, S.; JAABIR, M. S. M. Effect of Ethrel and Glyphosate on the ripening of Sugar Cane. **International Journal of Chem Tech Research**, Inglaterra, v. 5, n 4, p. 1927-1938, 2013.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v. 26, p 857-67, 2002.

KLEIN, V. A.; MASSING, J. P.; CAMARA, R. K.; BIASUZ Jr., I. J.; SIMON, M. A. Densidade máxima e relativa de solos sob plantio direto. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do

Solo e da Água, 15, 2004, Santa Maria. *Resumos expandidos*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.

KLEIN, V.A. & CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:221-227, 2007.

KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo. 1998. 130p. (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

KOPI, A.J.; DOUGLAS, J.T. A rapid inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use and Management**, v.7, p.52-56, 1991.

LAVANHOLI, M. G. D. P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria prima para produção de açúcar e álcool. In DINARDO-MIRANDA, L. L., VASCONCELOS, A. C. M., LANDELL, M. G. A. **Cana-de-Açúcar** (eds.), Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação IAC, 2008.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Res.**, Amsterdam, v.19, p.274-286, 1991.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop reduction. **Adv. Soil Science**, v.1, p. 27-294, 1985.

LIMA, R. P., LEON, M. J., GONZAGA, B. A. B. S., SANTOS, R. F. 2009. Resistência a Penetração e Densidade do Solo como Indicativos de Compactação do Solo em Área de Cultivo da Cana-de-Açúcar. Disponível em. <http://www.falcker.com.br/artigos/CBCS_UFPB_RP_CompactacaoCana-de-Acucar.pdf> Acesso em 11mar. 2013.

LIMA, R. P.; DE LEÓN, M. J.; SILVA, A. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 60, n.1, p. 016-020, 2013b.

LIPIEC, J. ; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v.116, p.107-136, 2003.

LOWERY, B. ; MORRISON, J.E. Soil penetrometers and penetrability. In: DANE, J.H. ; TOPP, C., eds. Methods of soil analysis: Part 4 - Physical methods. Madison: **Soil Science Society of America**, 2002. p.363-388.

Lynch, J.M., Bragg, E. 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. **Adv. Soil Science**. 2: 133-171.

MACEDO, V. R. M.; SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Influência de tensões compressivas na pressão de precompactação e no índice de compressão do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 856-862, 2010.

MARCOLIN, C. D.; et al. Influência do teor de argila no solo nos limites de consistência e na umidade ótima para compactação. In: REUNIÃO SUB-BRASILEIRA DE CIÊNCIAS DO SOLO, 6. 2006, Passo Fundo. 2006.

MATERECHERA, S. A.; ALSTON, A. M.; KIRBY, J. M.; DEXTER, A. R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 144, p. 297-303, 1992.

MATHERON G. *Traité de géostatistique appliquée*. Tome I. **Memoires du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres**. No.14. Paris: Technip. 1962.

MENDONÇA, J. R., NOCITI, P. R. H., DEOTTI, R. C. Estudo de diferentes épocas de corte em cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 2., Piracicaba, 1984. **Anais**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1984. p. 140 – 149.

MOLIN, J. P., DIAS, C.T.S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.5, p.584–590. 2012.

MONTANARI R, CARVALHO MP, ANDREOTTI M, DALCHIAVON FC, LOVERA LH & HONORATO MAO Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1811-1822,2010.

MONTANARI R, ZAMBIANCO EC, CORRÊA AR, PELLIN DMP, CARVALHO MP & DALCHIAVON FC. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milheto. **Revista Ceres**, 59:125-135, 2012.

MONTANARI, R.; LIMA, R.C.; BONINI, A.S.; MARQUES, L.S.; MINGUINI, R.; CARVALHO, M.P.; FERREIRO, J. & COSTA, N.R. Variabilidade dos atributos de um Latossolo Vermelho sob plantio direto no cerrado brasileiro e produtividade da soja. *Cad. Lab. Xeol. Laxe*, 36:61-78, 2011.

MONTENEGRO, A. A. A. & MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutibilidade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.1, p. 30-37, 2006.

MORAES, M. H.; MULLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Ed.). Qualidade física do solo: métodos de estudo, sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p. 1-18.

MORAES, W. V. de. Comportamento de características e propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro, submetido a diferentes sistemas de cultivos. 1984. 107p. (Mestrado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1984.

MOZAMBINI, A.E.; PINTO, A.S.; SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba, SP: Prol Editora Gráfica, 2006. p.11-18.

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

NEUFELDT, H.; RESCK, D. V. S.; AYARZA, M. A.; ZECH, W. *Soil organic matter in Oxisols of the Brazilian Cerrados*. In: THOMAS, R.; AYARZA, M.A. (Eds.). *Sustainable land management for the Oxisols of the Latin American Savannas: Dynamics of soil organic matter and indicators of soil quality*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1999, p. 89-109.

NÓBREGA, J. C. M; DORNELAS, M. C. Biotecnologia e melhoramento da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba, SP: Prol Editora Gráfica, 2006. p.39-56.

OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; MELLO, C. R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da microrregião de Goiânia, GO. R. **Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 265-270, 2007.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 1, p. 1103-1112, 2013.

PABIN, J., LIPIEC, J., LODEK, S., et al. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil; Tillage Research**, Amsterdam, v.46, p.203-208, 1998.

PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v.35, p.417- 428, 2011.

PASSIOURA, J. B. Soil structure and plant growth. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v. 29, p. 717-728, 1991.

PIMENTEL GOMES, F.P. & GARCIA, C.H. Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais. 309 p. 2002. Piracicaba. Brasil.

PRADO, R. M.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z. M. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília- DF, v. 37, n. 12, p. 1795-1801, 2002.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S.; MIRANDA, M.A.C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.929-938, 2000.

RAPER, R. L.; KIRBY, J. M. Soil compaction: how to do it, undo it, or avoid doing it. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA, 2006.

REICHARDT, K. & TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. São Paulo, Manole, 2004. 478p.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos Ciência do Solo**, v.5, p.49-134, 2007.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista de Ciências Ambientais.**, 27:29-48, 2003.

RIBEIRO, C. A. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em áreas mecanizadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). 2010. 85f. (Mestrado - Ciência do Solo). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Jaboticabal, 2010.

RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um latossolo vermelho sob cultura perene no norte do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p.1817-1825, 2008.

RICHARDS, L. A. Pressure-membrane apparatus, construction and use. *Agronomy Engineering*, n.28, p.451-454, 1947.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Barros & Marques Ed. Eletrônica, 2004. 302 p.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente Excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, p. 133 – 137,1998.

ROQUE, C. G. ; CENTURION, J. F. ; ALENCAR, G. V. ; BEUTLER, A. N. ; PEREIRA, G. T.; ANDRIOLI, I. Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Acta Scientiarum** (UEM), Maringá, v. 25, p. 53-57, 2003.

ROQUE, M. W.; MATSURA, E. E.; SOUZA, Z. M.; BIZARI, D. R.; SOUZA, A. L. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1827-1835, 2008.

ROSA JÚNIOR, E.J. Efeito de sistemas de manejo e tempo de uso sobre características físicas e químicas de dois solos de Ponta Porã. 1984. 89p.

ROSA, D. P. da et al. Métodos de obtenção da capacidade de suporte de carga de um Argissolo cultivado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.5, out. 2011.

ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.5, p.821-8, 1999.

RUSSEL, R. S.; GOSS, M. J. Physical aspects of soil fertility: the response of roots to the mechanical impedance. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 22, p. 305-318, 1974.

SATO, M. K.; OLIVEIRA, P. D.; LIMA, H. V. Textura e grau de compactação do solo no desenvolvimento de plantas. In: Anais do Seminário Anual de Iniciação Científica, 9, 2011, UFRA, 19 a 21 de outubro de 2011.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Variação espaço-temporal do índice de área foliar e do brix em cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 35-41, 2008.

SCHLOEDER, C.A.; ZIMMERMAN, N.E.; JACOBS, M.J. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.65, n.2, p.470-9, 2001.

SCHLOTZHAVER, S.D. & LITTELL, R.C. SAS system for elementary statistical analysis. 2.ed. Cary, SAS, 1997. 441p.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. ; SOUZA, C.R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. **Sci. Flores talis**, v.54, p.9-16, 1998.

SENE, M.; VEPRASKAS, M. J.; NADERMAN, G. C.; DENTON, H. P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 422-27, 1985.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. C.; COSTA, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p.404-413, 2012.

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

SILVA JÚNIOR, R.L. Variabilidade espacial do índice de cone correlacionada com mapas de produtividade. 2001. 117p. (Doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2001.

SILVA, A.P. DA; LIBARDI, P.L. ; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 10:91-95, 1986.

SILVA, M.A. Interação genótipo x ambiente e estabilidade fenotípica de cana-de-açúcar em ciclo de cana de ano. **Bragantia**, 67:109-117, 2008.

SILVA, P.C.M. & CHAVES, L.H.G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em alissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 5:431-436, 2001.

SILVA, R.B.; DIAS JÚNIOR, M.S.; SILVA, F.A.M. ; FOLE, S.M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latos solo dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.27, p.973-983, 2003.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C. TEIXEIRA, M. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.34, p. 15-22, 2010.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciencia Rural**. Santa Maria, v.30. n.5, 2000.

SILVEIRA, P. M.; CUNHA, A. A. Variabilidade de micronutrientes, matéria orgânica e argila de um Latossolo submetido a sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.9, p.1325-1332, 2002.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; CEDDIA, M.B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, 67:203-211, 2008.

SOANE, B. D.; C. Van Ouwerkerk,(Eds.). **Soil Compaction in crop production**. Institute for Soil Fertility Research (IB-DLO), P.O. Box 30003, 9750 RA Haren, The Netherlands, 2000.

SOJKA, R. E. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. **Soil Science Society of America Journal**, v.16, p.179-301, 1990.

SOUZA Z.M.; CERRI P.D.G., MAGALHÃES P.G. & CAMPOS M.C.C. Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, 8:183-190,2008.

SOUZA, Z.M.; CAMPOS, M.C.C.; CAVALCANTE, Í.H.L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L.G. & SOUZA, S.R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciencia Rural**, 36:128-134, 2006.

SOUZA, Z.M.; CERRI, D.G.P.; COLET, M.J.; RODRIGUES, L.H.A.; MAGALHÃES, P.S.G. & MANDONI, R.J.A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciencia Rural**, 40:840-847, 2010a.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & MOREIRA, L.F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciencia Rural**, 34:1763-1771, 2004.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. São Paulo: McGraw-Hill, 1985. 454 p.v.3, p.1-70, 1985.

STEPNIEWSKI, W. et al. Effects of compaction on soil aeration properties. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. (Ed.). Soil compaction in crop production. Amsterdam: **Elsevier**, 1994. p. 167-189

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI-NETO, V.L. Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. STAB. Açúcar, Álcool ; Subprodutos, v. 1, n. 3, p.18-23, jan./fev. 1983.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J. ; REICHERT, J.M. ; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciencia Rural** , v.34, p.755-760, 2004.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and to root systems subjected to soil compaction: towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, v. 30, p. 217- 243, 1994.

TAYLOR, H.M., ROBERTSON, G.M., PARKER, J.J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, New York, v.102, p.18-22, 1966.

TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, v.19, p.111-119, 1991.

THOMPSON, P.J., JANSEN, I.J., HOOKS, C.L. Penetrometer resistance and bulk density as parameters for predicting root system performance in mine soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.1288-1293, 1987.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1)

TOGNON, A. A., DEMATTE, J. L. I. e DEMATTE, J. A. M. Teor e distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil central. **Scientia agricola.**, 1998, v. 55, n. 3, p. 343-354.

TORMENA, C. A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.28, n.6, p.1023-1031, 2004.

TORMENA, C.A.; ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.333-339, 1996.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Embrapa Soja. **Circular Técnica**, 23).

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, 1997.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2000. v.1. p.1-54.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51:1-75, 1983.

VIEIRA, S.R.; NASCIMENTO, P.C.; SARVASI, F.O.C.& MOURA, E.G. Umidade e temperatura na camada superficial do solo em função da cobertura morta por resteva de soja em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 15:219-224, 1991.

VOGELMANN, E.S.; MENTGES, M.I.; REICHERT, J.M.; ROSA, D.P. da; BARROS, C.A.P. de; REINERT, D.J. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo trafegado e escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, p. 291-297, 2012.

VOORHEES, W.B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, p.129-133, 1983.

WEAICH, K.; BRISTOW, K.L.; CASS, A. Preemergent shoot growth of maize under different drying conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 1272-1278, 1992.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analyses of soil in field. New York: Springer-Verlag, 1985. 56 p.