

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DA CANA SOCA
CORRELACIONADAS COM ATRIBUTOS FÍSICO-
QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO
DO NOROESTE PAULISTA**

MÁILA TERRA GIOIA
Engenheira Agrônoma

ILHA SOLTEIRA
ESTADO DE SÃO PAULO
SETEMBRO/2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

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

**PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DA CANA SOCA
CORRELACIONADAS COM ATRIBUTOS FÍSICO-
QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO
DO NOROESTE PAULISTA**

MÁILA TERRA GIOIA
Engenheira Agrônoma

Orientador: Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP - Campus de Ilha Solteira para a obtenção do título de MESTRE EM AGRONOMIA, especialidade: Sistemas de Produção.

Ilha Solteira–SP
Setembro/2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

Gioia, Máila Terra.
G495p Produtividade e qualidade da cana soca correlacionadas com atributos físico-químicos de um argissolo vermelho distrófico do noroeste paulista /
Máila Terra Gioia. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2011
127 f. : il.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistema de Produção, 2011

Orientador: Morel de Passos e Carvalho
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar. 2. Solo - Manejo. 3. Agricultura de precisão.
4. Geologia – Métodos estatísticos. 5. Co-krigagem.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DA CANA SOCA CORRELACIONADAS COM ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO DO NOROESTE PAULISTA

AUTORA: MAILA TERRA GIOIA

ORIENTADOR: Prof. Dr. MOREL DE PASSOS E CARVALHO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA ,
Área: SISTEMAS DE PRODUÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MOREL DE PASSOS E CARVALHO
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. RAFAEL MONTANARI
Universidade Estadual de Mato Grosso do SUL (UEMS) - Campus de Aquidauana (MS)

Data da realização: 30 de agosto de 2011.

DEDICATÒRIA

A minha avó materna, ***Margarida Nunes Valentim***, que mesmo após 10 anos de seu falecimento, é para mim um exemplo de humildade e luta. Tenho certeza que olha por mim onde estiver e sabe do amor que lhe dedico. Saudades!!!

OFERECIMENTO

Aos meus pais

Jane Grei Valentim e

Marco Gioia

AGRADECIMENTOS

À **Deus** pela conquista de mais uma vitória. Obrigada!!!

Aos meus pais, **Jane Grei Valentim** e **Marco Gioia**, pelo apoio emocional e financeiro, incentivo para a conclusão dessa jornada, pela minha cultura geral, meus eternos agradecimentos e amor incondicional.

A **Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira UNESP** pela estrutura física e pessoal utilizada para realização desse trabalho.

Aos **colegas, professores e funcionários** que me ajudaram na realização desse trabalho, em especial: Barril, Berolo, Crocodilo, Mirna, Feijão, Bixera, Pertada, Preocupado, Bigato (alunos de graduação, colaboradores nas coletas de campo); Flávio Carlos Dalchiavon (orientado do Prof. Morel colaborador nas análises estatísticas e formatação); e Valdivino (funcionário do Laboratório de Física do Solo).

Ao **Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho** por sempre me incentivar com um abraço e uma palavra forte de animo, obrigada pela força, mais que um orientador, um amigo desde a graduação.

A **Usina Vale do Paraná** (Suzanápolis-SP) pela infraestrutura disponibilizada e aos **técnicos agrícolas e cortadores de cana** que participaram das coletas de dados.

Em especial ao amigo **José Alexandre Braga**, na época gerente agrícola da Usina Vale do Paraná, que salvou meu mestrado dando condições para condução dessa pesquisa e tornou-se um grande amigo e exemplo de vida.

A **Gisley Jane Ribeiro e família**, que me acolheram em sua casa e me ajudaram a chegar ao fim dessa etapa, meu eterno carinho.

A todos os amigos/parceiros que fiz na cidade de Ilha Solteira, que indiretamente me ajudaram a suportar os dias distante de casa.

Aos amigos da XXVI Turma de Agronomia da UNESP Ilha Solteira, “minha turma da facul”, os guardo no coração para todo o sempre.

Ao amigo **Rafael Montanari** pelo incentivo ao ingresso no programa de pós-graduação e participação na minha banca de defesa.

Aos professores **Marcelo Andreotti, Marlene Cristina e Antônio Bolonhesi** pela ajuda na compreensão do tema abordado.

A todos os participantes das bancas do exame geral de qualificação e da defesa da dissertação por suas colaborações na versão final desse trabalho.

GIOIA; M. T. **Produtividade e qualidade da cana soca correlacionadas com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico do noroeste paulista**. 2011. 125 f. Dissertação. (Mestrado em Sistemas de Produção)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

RESUMO

A cana-de-açúcar tem importância incontestável no Brasil, tanto por ser matéria-prima para a produção de etanol e açúcar, como para o seqüestro de carbono atmosférico mundial. A correta intervenção espacial na administração da lavoura, decorrente das zonas específicas de manejo do solo, aumenta sua produtividade e a lucratividade agrícola. No ano de 2010, em Suzanópolis, estado de São Paulo, Brasil (20°27' lat. S; 51°08' lon. W) foram empregadas correlações, de Pearson e espaciais, entre atributos da cana-de-açúcar e alguns atributos físico-químicos do solo, visando encontrar aquele que pudesse definir zonas específicas de manejo do solo. Para tanto, instalou-se a malha irregular para a coleta de dados do solo e da planta, numa área 10,5 ha, num talhão contendo a variedade de cana-de-açúcar RB 85 5453, no terceiro corte e bisada. Nela foram alocados aleatoriamente 118 pontos amostrais georreferenciados, de forma a cobri-la amplamente, num ARGISSOLO VERMELHO Distrófico (Typic Tropudult). Os atributos da planta foram a produtividade de plantas, a população de plantas, os açúcares totais recuperáveis e o percentual de sólidos solúveis, de sacarose, de pureza e de fibras. Enquanto que os do solo foram o teor e o estoque de carbono orgânico, a densidade global, a resistência à penetração, a umidade gravimétrica e volumétrica, a macroporosidade, a microporosidade e a porosidade total do solo. Dessa forma, para obtenção de máxima produtividade, para a variedade pesquisada, a população de plantas ideal é 16 plantas por metro. O teor de carbono orgânico e o seu estoque, por terem apresentado apreciáveis correlações lineares e espaciais de forma direta com a produtividade da cana-de-açúcar, revelaram-se como atributos potencialmente aptos para a definição de duas zonas específicas de manejo do solo. Nelas, a produtividade de cana-de-açúcar variou entre 107-86 t ha⁻¹ e 80-60 t ha⁻¹ quando respectivamente o estoque de carbono o foram de 29-25 t ha⁻¹ e 24-21 t ha⁻¹. Os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, ATR, brix, Pol e fibras, correlacionaram-se indireta e espacialmente com a produtividade de cana-de-açúcar definindo duas zonas específicas de manejo onde a produtividade variou entre 124-89 t ha⁻¹ e 75-37 t ha⁻¹. Em futuros trabalhos voltados à agricultura de precisão, que empreguem os mesmos atributos do solo e da planta que os do presente estudo, os alcances recomendados deverão estar compreendidos entre 73 e 360 metros.

Palavras-chave: *Saccharum spp.* Manejo do solo. Agricultura de precisão. Geoestatística. Co-krigagem.

GIOIA; M. T. **Productivity and quality of ratoon crop correlated to physical and chemical attributes of a Typic Tropudult in northwestern São Paulo state.** 2011. 125 f. Dissertation. (Master Degree on Systems of Production)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

ABSTRACT

Sugar cane is nowadays very important for Brazil as it is the raw material for the ethanol and sugar production, and also because it contributes to the sequestration of the world atmospheric carbon. The correct spatial intervention in the crop management, as a consequence of specific management zones of the soil, increases both soil productivity and yields. In 2010, Pearson and spatial correlations for sugar cane attributes and for some physical and chemical soil attributes were used, in Suzanápolis, São Paulo state, Brazil (20°27' S; 51°08' W), aiming at finding the one that would allow the definition of specific management zones of the soil. In order to achieve that, an irregular grid for collecting soil and plant data was installed in an area 10.5 ha, in a lot where the sugar cane variety RB 85 5453 had been growing, at the third cut and 24th month. 118 georeferenced sampling spots were randomly determined in order to cover all the area in a Typic Tropudult. The plant attributes were stems productivity, plants population, recoverable total sugars and soluble solids percentage, of sucrose, of purity and of fibers. Whereas the soil attributes were organic carbon level and stock, bulk density, penetration resistance, gravimetric and volumetric water contents, macroporosity, microporosity and total porosity. Therefore, in order to achieve maximum productivity, for the studied variety, the ideal plants population is of 16 plants per meter. The organic carbon level and stock proved to be potentially efficient attributes when it comes to defining two specific management zones of the soil, as some remarkable linear and spatial correlations were observed to be strongly linked to sugar cane productivity. In these zones, the sugar cane productivity varied from 107-86 t ha⁻¹ and 80-60 t ha⁻¹ when the carbon stock was respectively 29-25 t ha⁻¹ and 24-21 t ha⁻¹. The sugar cane productivity features were indirectly and spatially correlated to the sugar cane productivity, defining two specific management zones where productivity varied between 124-89 t ha⁻¹ and 75-37 t ha⁻¹. For future research on precision agriculture where the same soil and plant attributes are used, the recommended ranges shall be between 73 and 360 meters.

Keywords: *Saccharum spp.* Soil management. Precision agriculture. Geostatistics. Cokriging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exemplo de semivariograma experimental.....	40
Figura 2- Aspecto geral do local de coleta das amostras (talhão cultivado com cana-de-açúcar).....	47
Figura 3- Curva de resistência á penetração (a) e os valores de umidade gravimétrica (b) em um perfil de 60 cm de profundidade na área experimental	47
Figura 4- Croqui da malha experimental.....	49
Figura 5- Exemplos de semivariogramas: (a) não-estacionário e (b) estacionário.....	53
Figura 6- Equações de regressão entre atributos da cultura da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP)	70
Figura 7- Equações de regressão entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	71
Figura 8- Equações de regressão entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	72
Figura 9- Equações de regressão entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	73
Figura 10- Equações de regressão entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos na profundidade de 0,20 – 0,40m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	74
Figura 11- Equações de regressão entre atributos físicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP)	75
Figura 12- Equações de regressão entre atributos físicos na profundidade de 0,20 – 0,40m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	76
Figura 13- Semivariograma simples dos atributos da cultura da cana-de-açúcar (TCH, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB) em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	82

Figura 14- Semivariograma simples dos atributos físico-químicos (CO1, EC1, DS1, RP1, UG1, UV1, MA1, MI1 e PT1) de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)	83
Figura 15. Semivariograma simples dos atributos físico-químicos (CO2, EC2, DS2, RP2, UG2, UV2, MA2, MI2 e PT2) de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)	84
Figura 16- Mapas de krigagem dos atributos da cultura da cana-de-açúcar (ETCH, ATR, BRI, POL e FIB) em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	87
Figura 17- Mapas de krigagem dos atributos físico-químicos (CO1, EC1, DS1, UG1 e UV1) de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	88
Figura 18- Mapas de krigagem dos atributos físico-químicos (CO2, EC2, RP2, UG2, UV2 e PT2) de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	89
Figura 19- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ETCH em função do ATR em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	95
Figura 20- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ETCH em função do BRI em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	96
Figura 21- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ETCH em função do POL em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	97
Figura 22- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ETCH em função da FIB em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	98
Figura 23- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função da FIB em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	99

Figura 24- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ETCH em função do CO1 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	100
Figura 25- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ETCH em função do EC1 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	101
Figura 26- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função da DS1 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	102
Figura 27- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função da UG1 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	103
Figura 28- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função do UV1 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	104
Figura 29- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ETCH em função do CO2 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	105
Figura 30- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ETCH em função do EC2 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	106
Figura 31- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função da RP2 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	107
Figura 32- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função da UG2 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP).....	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Descrição morfológica e dados analíticos do solo estudado	45
Quadro 2- Análise química do solo da área de estudo	48
Quadro 3- Análise descritiva de atributos da cultura da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	56
Quadro 4- Análise descritiva de atributos físico-químicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	57
Quadro 5- Análise descritiva de atributos físico-químicos na profundidade de 0,20 – 0,40m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	58
Quadro 6- Matriz de correlação dos atributos da cultura da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP)	65
Quadro 7- Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	66
Quadro 8- Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos na profundidade de 0,20 – 0,40m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	67
Quadro 9- Análise da variância dos resíduos da regressão linear múltipla da TCH em função dos atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP)	78
Quadro 10- Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos nas profundidades de 0,0 – 0,20 e 0,20 – 0,40m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	79
Quadro 11- Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens para os atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos nas profundidades de 0,0 – 0,20 e 0,20 – 0,40m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP).....	85

Quadro 12- Parâmetros dos semivariogramas cruzados referentes as cokrigagens entre os atributos da cultura da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)	92
Quadro 13- Parâmetros dos semivariogramas cruzados referentes as cokrigagens entre os atributos da cultura da cana-de-açúcar em função dos atributos do solo nas profundidades de 0,0 – 0,20 e 0,20 – 0,40m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	A cultura da cana-de-açúcar.....	17
2.1.1	Aspectos históricos.....	17
2.1.2	Aspectos econômicos	18
2.1.3	Aspectos botânicos, morfológicos e fisiológicos	19
2.1.4	Aspectos agrônômicos.....	22
2.1.5	A variedade RB 85 5453	24
2.2	Manejo da cultura da cana-de-açúcar	24
2.3	Atributos do solo agrícola ideal.....	25
2.3.1	Matéria orgânica, carbono orgânico e estoque de carbono do solo.....	27
2.3.2	Densidade do solo.....	30
2.3.3	Resistência à penetração e umidade do solo.....	30
2.3.4	Porosidade do solo.....	33
2.4	Estudos sobre aspectos físicos, manejo do solo e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar	34
2.5	Agricultura de precisão.....	38
2.6	A geoestatística na pesquisa agrônômica.....	39
2.6.1	Semivariograma.....	39
2.6.2	Interpolação dos dados por krigagem ordinária	41
2.6.3	Semivariograma cruzado e co-krigagem	42
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	44
3.1	Caracterização do local de origem dos dados.....	44
3.2	Implantação e caracterização da malha experimental	46
3.3	Coleta e metodologia de determinação dos atributos pesquisados	48
3.4	Análise estatística e geoestatística dos atributos pesquisados	51
3.4.1	Exclusão da tendência quando da não-formação da estacionariedade	52

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	Análise descritiva dos dados	55
4.1.1	Variabilidade dos atributos	55
4.1.1.1	Atributos da planta.....	55
4.1.1.2	Atributos do solo	55
4.1.2	Distribuição de frequência dos atributos	59
4.1.2.1	Atributos da planta.....	59
4.1.2.2	Atributos do solo	60
4.1.3	Valores médios dos atributos estudados	60
4.1.3.1	Atributos da planta.....	60
4.1.3.2	Atributos do solo	62
4.2	Análise de regressão entre os atributos	64
4.2.1	Regressão linear simples	64
4.2.1.1	Matriz de correlação linear simples entre os atributos	64
4.2.1.1.1	Atributos da planta versus atributos da planta.....	64
4.2.1.1.2	Atributos da planta versus atributos do solo na profundidade de 0,0 – 0,20m.....	68
4.2.1.1.3	Atributos da planta versus atributos do solo na profundidade de 0,20 – 0,40m.....	68
4.2.1.2	Regressão linear simples entre os atributos estudados	68
4.2.2	Regressão múltipla entre os atributos estudados (<i>stepwise</i>).....	77
4.3	Análise geoestatística dos atributos estudados	78
4.3.1	Análise semivariográfica simples	78
4.3.1.1	Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos	78
4.3.1.2	Validação cruzada dos semivariogramas simples ajustados dos atributos	81
4.3.1.3	Mapas de krigagem dos atributos	86
4.3.2	Análise semivariográfica cruzada.....	90
4.3.2.1	Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem dos atributos	90
5	CONCLUSÕES	110

REFERÊNCIAS	111
-------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura semiperene da família *Poaceae*. A sua importância socioeconômica para o Brasil é inquestionável, sendo a principal matéria-prima para a produção do etanol utilizado pelos veículos automotores, além da sua destinação para a produção do açúcar, um dos principais produtos de exportação nacional. Na safra 2010/11, o setor sucroalcooleiro nacional processou uma produção de 604,5 milhões de toneladas de colmos, tendo o estado de São Paulo como o maior produtor, participando com 54% desta (362,7 milhões de toneladas), numa área de 4,1 milhões de hectares, com a produtividade média em torno 87,5 t ha⁻¹.

O correto preparo do solo é etapa primordial à implantação da lavoura canavieira. Entretanto, muitas vezes, tal preparo é realizado sem levar em conta as condições físicas atuais do solo, como a sua umidade, a qual é um fator controlador da compactação do solo. 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.

Em consequência à degradação dos atributos do solo decorrente do manejo inadequado, há queda condicional da produção de cana-de-açúcar. Por outro lado, manejo visando a manutenção e/ou adição de matéria orgânica no solo é muito importante, uma vez que os benefícios são, principalmente, o aumento na resistência à erosão e na capacidade de armazenamento de água devido à sua atuação sobre a estrutura do solo, pelo aumento da estabilidade dos agregados, além da melhoria na fertilidade do solo.

No âmbito das mudanças climáticas globais, o solo e suas formas de uso agrícola estão em foco, pois podem atuar como dreno ou fonte de gases de efeito estufa dependendo do sistema de manejo a que forem submetidos. Sistemas de manejo que aumentem a adição de resíduos vegetais e a retenção de C no solo se constituem em alternativas importantes para aumentar a capacidade de dreno de C atmosférico e mitigação do aquecimento global.

No Brasil, a partir do ano 2000, vem ocorrendo substancial modificação tecnológica no cultivo do solo, dada pela agricultura de precisão (AP). Esta permite ao agricultor buscar soluções para problemas levantados na propriedade agrícola, dados principalmente pela adoção de um mapa de produtividade que possua elevada correlação espacial com os mapas dos atributos físico-químicos do solo. A partir desse fato, pode-se perfeitamente efetuar

qualquer prática conservacionista do solo, com taxas variáveis, de forma que nos locais onde ocorrerem uma má condição físico-química do solo, normalmente associados às mais baixas produtividades agrícolas, deverão ser empregadas o manejo localizado.

Em sistemas de cultivos altamente tecnificados, como na AP 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 os nutrientes, assim como aqueles voltados às melhores condições físico-biológicas, 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 físico-químicos do solo. Desta forma, considerando o atual e substancial avanço da cultura canavieira no Brasil, o estudo da produtividade e da qualidade da cana soca, em função de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico, 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

O aparecimento dos produtos extraídos da cana-de-açúcar se deu por povos persas, chineses e árabes. No início os produtos eram raros e caros, consumidos por reis e nobres, e sua expansão marcante foi na difusão do produto no comércio árabe. No século XV, foi levado por europeus às Ilhas do Atlântico e portugueses estabeleceram uma indústria açucareira organizada e difusora da cultura da cana-de-açúcar para as Américas e África. Esse foi o período de estabelecimento em regiões de clima tropical e subtropical. No Brasil, as primeiras canas foram introduzidas no ano de 1502, no entanto, nesse período, o maior interesse dos colonizadores era a extração de madeiras e metais (FIGUEIREDO, 2008).

Segundo mesmo autor três décadas à frente, início da colonização real, houve uma intensificação da demanda por açúcar no mercado europeu, e na capitania de São Vicente, a indústria açucareira teve prosperidade expandindo-se para outras capitanias. E em 1580 o Brasil detinha o monopólio mundial de produção de açúcar. No entanto, a partir de 1630, por dificuldades de comercialização, novos produtos e restrições políticas, a produção da cana-de-açúcar desenvolveu-se fora da costa brasileira, o que revelou um histórico de altos e baixos para a cultura no país, e entre os motivos estavam a intensificação da produção do açúcar de beterraba na Europa, o aparecimento da gomose nos canaviais brasileiros e o aumento das áreas com café.

Em 1960 impulsionada por aumento dos preços no mercado internacional e a extinção das cotas de exportação, deu-se a modernização do setor através de novas políticas, moedas e alterações no processo de fabricação do açúcar. E atualmente, a agroindústria se mostra proeminente favorável em função do preço do petróleo e a força da sociedade com relação ao meio ambiente. No Brasil a tecnologia aplicada no setor canavieiro é considerada avançada e notável, com variedades desenvolvidas para ambientes e manejos específicos (FIGUEIREDO, 2008).

2.1.2 Aspectos econômicos

A cultura da cana-de-açúcar pode ser cultivada em grande parte do território nacional. Tem importância no desenvolvimento econômico desde sua chegada ao Brasil, trazendo divisas com a produção de açúcar e álcool e diversificando a matriz energética brasileira na geração de combustível renovável. A produção de etanol participa com 16,6% na matriz energética do país e é responsável por 36,5% da geração de energia renovável, ressaltando sua importância no contexto da sustentabilidade ambiental. O uso do combustível etanol em carros, tecnologia 100% brasileira, a adoção de carros bicombustíveis, o desenvolvimento de tecnologias para produção de biodiesel por rotas etílicas e a constante busca pela inclusão de fontes renováveis na matriz energética mundial, elevou a importância do setor e antecipou uma crescente demanda por produção (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2009).

No Brasil, o setor sucroalcooleiro movimenta 56 bilhões de reais, que representa 2 % do PIB. Gera 4,5 milhões de empregos diretos e indiretos, sendo 72 mil no campo. Recolhe 14 milhões de reais em impostos e taxas. Conta com 420 usinas e destilarias em operação e 40 projetos em andamento. Detém uma área de 7,8 milhões de hectares cultivados, que corresponde a 3,5% da área agricultável do país, segundo dados da safra de 2009/10 (JORNAL CANA, 2011).

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, na safra 2010/11 a produção nacional foi de 604,5 mil toneladas, que representou um aumento de 12,8% em relação a safra anterior. E estima-se, para a safra 2011/12, uma colheita de 624,9 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, um aumento de 3,3% (CONAB, 2011). A evolução crescente na produção de cana-de-açúcar evidencia a importância do setor na economia brasileira e os investimentos em pesquisas na área.

No Brasil as áreas cultivadas com cana-de-açúcar também tiveram uma evolução crescente com o passar das safras, na safra 2010/11, houve uma estimativa de área de 7,7 milhões de hectares, um aumento de 8,4% em relação à safra anterior, 2009/10. Com uma produtividade média nacional de aproximadamente $77,8 \text{ t ha}^{-1}$, que registrou uma queda de -4,6% quando comparando a safra anterior. Segundo CONAB (2011), a queda na produtividade média brasileira foi provavelmente influenciada pelas baixas pluviosidades ocorridas na região centro – sul, durante o ano de 2010.

A região sudeste com uma área de 5,1 milhões de ha na safra 2010/11 (6,1% maior que a safra passada) representou 63,7% da área cultivada com cana-de-açúcar no país. Apresentou

uma estimativa de produtividade média de 82,0 t ha⁻¹ safra 2010/11, uma variação de -5,6% em relação a safra anterior, e uma produção total de 420,6 milhões de toneladas, 0,2% de variação que pode ser considerada estável (CONAB, 2011).

O estado de São Paulo detém 54,2% da área total brasileira cultivada com a cultura em questão (safra 2010/11) abrangendo uma área de 4,4 milhões de hectares, que apresentou um aumento de 5,5% na área comparando-se com a safra anterior. O estado é responsável por uma produtividade média de 82,5 t ha⁻¹, valor acima da média nacional, no entanto, houve uma queda de - 6,1%, comparando-se com a safra 2009/10. Quanto à produção, essa manteve uma variação de -0,9% em relação a safra passada que pode ser considerada estável (359,2 milhões de toneladas, safra de 2010/11). Para a região sudeste foi um ano atípico, pois houve queda na produtividade de cana-de-açúcar provavelmente pelos problemas enfrentados com estiagens tendo em vista que esse estado é historicamente o mais produtivo do Brasil (CONAB, 2011).

Cabe ressaltar que todas as regiões do país tiveram um aumento nas áreas cultivadas, destacando-se os estados: Bahia, Ceará, Goiás, Mato Grosso do sul, Minas Gerais, Pernambuco, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Rondônia e Tocantins. O mesmo não aconteceu com a produtividade e a produção, em que constatou-se um aumento relevante apenas nas produtividades da região sul do país e um aumento de produção, no centro-oeste (CONAB, 2011).

O aumento do consumo de açúcar e etanol incentiva o cultivo contínuo e o crescimento das usinas tradicionais ou novos empreendimentos que se expandem do oeste paulista para Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, norte e nordeste do Brasil. A busca por novas alternativas como a agregação de valores, a co-geração de energia e novos sistemas de administração é constante (FIGUEIREDO, 2008).

2.1.3 Aspectos botânicos, morfológicos e fisiológicos

A cultura em questão é uma gramínea do gênero *Saccharum* que é nativo do sudeste da Ásia, no entanto seu centro de origem é incerto. A espécie *Saccharum officinarum* tem origem na Nova Guiné e é a espécie base dos programas de melhoramento genético. Possui como característica alto teor de açúcares e baixa porcentagem de fibras, atributos importantes para a indústria, no entanto, com muitos problemas fitossanitários. Desse modo, hibridações interespecíficas e intervarietais foram realizadas para melhorar características como resistência as principais doenças, porte da parte aérea, ciclo e teor de açúcar. Segundo

Figueiredo et al. (2008), as variedades hoje utilizadas são todos híbridos melhorados e são chamados, na terminologia atual, de *Saccharum spp.*

A quantidade de estudos com cana-de-açúcar não é proporcional a sua importância mundial em termos de alimentação e fonte de energia. A cana-de-açúcar é uma planta com metabolismo do tipo C4 que tem como característica abundância de cloroplastos, fixação e re-fixação de CO₂, limite superior de temperatura superior a 45°C e ausência de fotorrespiração. Fatores estes que proporcionam maiores taxas de crescimento, maior eficiência no uso da água e maior eficiência fotossintética. As folhas incorporam o carbono (C) atmosférico transformando-os em carboidratos de alto valor energético (CASAGRANDE; VASCONCELOS, 2008).

A cana-de-açúcar é uma planta que têm por característica o desenvolvimento em forma de touceira e ciclo semi-perene, em média 4 anos. Sua parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescência e frutos, esses dois últimos importantes para o melhoramento genético e exercem influência negativa na produção comercial (SEGATO et al., 2006).

O florescimento, fenômeno indesejável à indústria, leva a perdas no teor de sacarose e variações na sua qualidade. O fenômeno pode levar à chamada isoporização, onde ocorre translocação do caldo em direção a panícula, reduzindo a eficiência de extração industrial da sacarose. Algumas variedades isoporizam mesmo sem florescimento sendo estas descartadas para o melhoramento (CASAGRANDE; VASCONCELOS, 2008).

Seu plantio é realizado de forma assexuada utilizando-se toletes (pedaços de colmo) que definem o número de gemas por metro linear, recomendado entre 12 a 14 gemas. Cada perfilho é uma planta independente e autônoma, com órgãos próprios e ligados entre si pela touceira onde podem competir nutrientes e água. O perfilhamento é influenciado por fatores ambientais (luz, temperatura, umidade do solo e nutrientes) e pelo manejo (espaçamento, profundidade de plantio, número e altura de corte, pragas e doenças). A extensão e a sobrevivência do perfilho tem caráter varietal e essa fase determina em grande parte a produtividade da cultura (SCAPARI; BEAUCLAIR, 2008).

Os colmos, parte de importância industrial, são formados externamente por células lignificadas que protegem os tecidos internos, feixes vasculares, a fibra da matéria prima, e células que armazenam o caldo. Os fatores que influenciam a quantidade de fibras são água disponível, nutrientes, temperatura, luz e área foliar (SCAPARI; BEAUCLAIR, 2008).

A parte subterrânea é formada por raízes e rizomas, com função de sustentação e absorção de água e nutrientes, do tipo fasciculada. Segundo Scapari e Beauclair (2008), a cana planta (cana-de-açúcar no primeiro corte) explora mais as camadas superficiais comparando-

se com a soqueira (cana-de-açúcar a partir do primeiro corte), que apresenta um incremento na exploração do solo em subsuperfície. A cana planta apresenta menos raízes, mas sua eficiência de absorção é maior com raízes novas e tenras, já a soqueira, com raízes mais velhas e lignificadas tem arquitetura que varia com a idade e o número de ciclos da cultura.

Segundo Segato et al. (2006), 85% da raízes estão concentradas nos primeiros 50 cm de profundidade do solo e aproximadamente 60% entre os primeiros 20-30 cm de profundidade, com pequenas variações dependendo do manejo e variedades utilizadas. Daí a importância de dar condições ideais de desenvolvimento para as raízes na região superficial do solo. A distribuição do sistema radicular depende das variações das condições químicas, físicas e biológicas do solo assim como da variabilidade dessas condições no tempo. Com funções de sustentação, absorção e transporte, manutenção de reservas e defesa, a sua eficácia depende de mecanismos fisiológicos e refletem atributos da planta como tolerância a seca, capacidade de brotação e perfilhamento, porte, tolerância a mecanização, eficiência em absorver água e nutrientes, tolerância a pragas e doenças, fatores estes que por fim influenciam na produtividade final da cultura. O conhecimento da sua dinâmica de crescimento proporciona embasamento para aplicar técnicas de manejo para otimizar o potencial de produção da cultura (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2008).

Segundo Landell et al. (2003), a cana planta explora mais intensamente camadas mais superficiais e a soqueira apresenta um incremento na exploração em subsuperfície. Faroni e Trivelin (2006), destacaram que as raízes ativas da cana soca se concentram 31% de 0,6 - 0,8m de profundidade e 23% de 0,0 – 0,2m de profundidade no solo.

Os fatores que mais influenciam o desenvolvimento radicular são os genéticos e as condições físico-químicas do solo. Os fatores genéticos influenciam na dinâmica de estabelecimento que pode alterar características do solo, onde a morte de raízes cria canais de drenagem e aeração nas camadas mais profundas, onde se beneficiam da umidade do solo em profundidade durante períodos de estiagem (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2008).

Ainda segundo os mesmos autores, das condições físicas do solo, a densidade do solo é o atributo que mais interfere no desenvolvimento radicular e o aumento nos seus valores é devido à compactação resultante do tráfego de máquinas, veículos, implementos e animais. Quando a densidade do solo aumenta, a macroporosidade é reduzida, assim como há a redução da aeração, da condutividade hidráulica e gasosa e aumento na resistência à penetração, alterações que interferem direta ou indiretamente no desenvolvimento radicular.

Por exemplo, em um solo com 60 % de argila tem normalmente uma densidade do solo de $1,19 \text{ g cm}^{-3}$ na profundidade de 0,6-0,8 m do solo. Quando verificados valores de $1,45 \text{ kg}$

dm⁻³ houve impedimento de desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, inferindo que para essa classe de solo essa densidade é muito alta (VASCONCELOS; GARCIA, 2005).

A distribuição de raízes depende da umidade do solo e dos ciclos hídricos e vice-versa. Regiões ou períodos muito secos, influenciam no aprofundamento radicular, no entanto pouco adianta um teor de água satisfatório se houver baixa aeração e alta resistência à penetração, evidenciando que a porosidade e a resistência influenciam no crescimento radicular, assim se a raiz tiver algum impedimento ao seu crescimento em profundidade a planta estará sujeita ao estresse hídrico nos períodos de seca (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2008).

A textura do solo também influencia o desenvolvimento radicular em profundidade, por exemplo, em solos com textura média há um maior aprofundamento do sistema radicular que proporciona a planta uma maior tolerância à seca. Já para uma textura argilosa, nos períodos de seca há morte de raízes superficiais pelo ressecamento superficial do solo. No entanto a variação do desenvolvimento do sistema radicular em solos de classes e texturas diferentes está em função as suas características físicas. Por outro lado, a precipitação deficiente que resulta em morte de raízes e redução da parte aérea, favorece o acúmulo de sacarose. (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2008). Argissolos diferem muito quanto a sua disponibilidade hídrica por que é muito variável a profundidade na qual se inicia o horizonte B, onde a água é armazenada em maior quantidade que no horizonte A (PRADO et al., 2008).

2.1.4 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 tonelagem de cana-de-açúcar, respectivamente. Como matéria prima, entende-se, colmos industrializáveis e impurezas vindas do campo que ao chegar na 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. Esses atributos 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 pagamento de cana implantado no estado de São Paulo desde a safra de 1998/99, utiliza-se do ATR que representa a quantidade de açúcares recuperáveis totais da cana descontando-se o xarope (FERNANDES, 2000).

Outro parâmetro tecnológico importante é a Pol, que refere-se a 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 contido 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 parâmetro, 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 a 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 do 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).

A qualidade da cana-de-açúcar pode ser influenciada por fatores como a queima da planta, em que ocorrem perdas de açúcares por exsudação do caldo e aderência de impurezas minerais nos colmos e também perdas de até 30% da matéria bruta que poderia ser utilizada na cogeração de energia (LAVANHOLI, 2008). Fungos e insetos também causam a redução

dos teores de açúcares e deterioração do material colhido. A altura de desponte pode incrementar açúcares redutores, aminoácidos, pigmentos e inibidores de fermentação que reduzem a qualidade da matéria prima (STUPIELLO, 2000). Ainda a matéria estranha ou impurezas, influenciada pelas condições climáticas, o tipo de colheita e o cuidados no carregamento reduzem a qualidade. Fernandes (2000), afirma que a terra aderida no carregamento da material em campo é o maior problema da qualidade da matéria prima, pois podem interferir nos processos de fermentação para a produção de álcool.

2.1.5 A variedade RB 85 5453

Desenvolvida pelo Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar da Universidade Federal de São Carlos – SP, a variedade RB 85 5453, tem como características uma boa brotação, perfilhamento médio, crescimento com velocidade regular, porte médio, hábito de crescimento ereto, bom fechamento das entrelinhas e tombamento raro. Com alto teor de açúcar, médio teor de fibras e PUI curto, apresenta média resistência a seca, tolerância a herbicidas, despalha regular e densidade do colmo alta. A época de corte recomendada para essa variedade é entre maio e junho, para plantios em ambientes de produção com restrições.

Resistente a maioria das fitossanidades, destaca-se por ser precoce com alta produtividade agroindustrial quando não houver limitações de água no solo. No manejo é relevante colher antes de junho, se necessário deve se fazer uso de maturadores e não utilizar como cana-de-ano. A brotação das socas podem ser prejudicadas em colheitas realizadas após o mês de junho em ambientes de baixa disponibilidade de água no solo e necessita manejo adequado em ambientes de médio/baixo potencial de produção (SOCICANA, 2011).

2.2 Manejo da cultura da cana-de-açúcar

Na condução da lavoura canavieira, muitas tecnologias têm diversificado o seu manejo, principalmente no âmbito do tipo de colheita. Em pouco tempo, a colheita realizada manualmente, com necessidade de queima e consequências negativas para o ambiente, será substituída pela colheita mecanizada. Uma lei do governo do estado de São Paulo (lei 11.941/2002) estabeleceu prazos para a erradicação da queima até o ano 2021 para áreas mecanizáveis e 2031 para áreas não mecanizáveis.

Em 2007, visando à proteção ambiental, a Secretaria de Meio Ambiente, Agricultura e Abastecimento e a UNICA firmaram o Protocolo Agroambiental que reduziu ainda mais os

prazos para a eliminação da queima, acordado para 2014 e 2017 o término da queima para áreas mecanizáveis e não mecanizáveis, respectivamente. Para as usinas que aderirem ao protocolo e cumprirem as regras será garantido o selo ambiental, que contribuirá para facilitar a comercialização do etanol. O protocolo já foi assinado por 155 usinas instaladas no Estado, o que representa 90% das empresas paulistas do setor (IEA, 2008).

Considerando que a rentabilidade da produção de cana-de-açúcar recebe influência direta das usinas sucroalcooleiras, Rapassi et al. (2009) estimaram os custos de implantação e produção, com o objetivo de avaliar aspectos técnicos e econômicos da produção da cana-de-açúcar para diferentes tipos de colheita, na região oeste do Estado de São Paulo. Definindo quatro sistemas de colheita (colheita manual cana queimada, colheita manual cana crua, colheita mecanizada cana queimada e colheita mecanizada cana crua), os autores puderam observar que o maior lucro operacional observado no primeiro corte foi com a colheita manual, cana queimada e o menor resultado econômico com a colheita mecanizada, cana crua. No entanto, o setor sucroalcooleiro tem a intenção de buscar resultados que visem, além da redução de custos e aumento na produtividade da cana, uma maior responsabilidade com as questões socioambientais.

2.3 Atributos do solo agrícola ideal

Segundo Kiehl (1979), o solo é constituído por um sistema trifásico, em que uma parte é formada pela fase sólida, ou seja, os constituintes minerais e orgânicos, outra parte formada pela fase líquida, a solução do solo (quando há água no sistema) e por fim, a fase gasosa, formada pelo ar contido nos poros do solo que mantém praticamente a mesma constituição do ar atmosférico (oxigênio 21%, nitrogênio 78%, gás carbônico 0,03% e outros 0,97%).

Nesse contexto, o solo agrícola dito como ideal guarda as proporções de 50% de fase sólida e 50% de espaço poroso, devendo ser assim distribuídos, 45% de constituintes minerais e 5% de constituintes orgânicos, 33% de microporos, onde se encontra a solução do solo e aproximadamente 17% de macroporos responsável pela aeração do solo. Essas proporções são variáveis e dependem do tipo de solo e principalmente o manejo utilizado na área (KIEHL, 1979)

Um solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta atributos físicos e químicos, tais como a permeabilidade, estrutura, densidade global, porosidade, pH, teores de P e MO, adequados ao satisfatório desenvolvimento das plantas. Nessas condições, o seu volume explorado pelas raízes é relativamente grande (ANDREOLA et al., 2000). Entretanto,

a partir do momento em que são intensamente utilizados à produção agrícola, ocorrem alterações dos referidos atributos. De modo geral, verificam-se aumentos da densidade do solo, da resistência mecânica à penetração e da microporosidade e diminuições da porosidade total e da macroporosidade (BEUTLER et al., 2004; SOUZA et al., 2006), atributos que podem ser base para a interpretação de resultados e avaliação da qualidade física do solo.

Muitos trabalhos demonstram que o tipo de exploração agrícola afeta peculiarmente alguns atributos físicos de solo (ALBUQUERQUE et al., 1995; ANDREOLA et al., 2000). Por outro lado, atributos tais como a macroporosidade, microporosidade, porosidade total, a densidade do solo e resistência mecânica a penetração, têm sido usados para indicar restrições ao desenvolvimento das plantas. Assim, Unger e Kaspar (1994) destacaram que a compactação do solo reduz o crescimento das plantas, principalmente quando o suprimento de água e nutrientes é insuficiente, fato verificado quando as raízes se desenvolvem abundantemente sobre as camadas compactadas.

Uma das principais causas da degradação do solo é a compactação, resultado do processo de aumento da densidade e resistência à penetração. A compactação do solo ocorre de maneira muito freqüente em ambientes que utilizam máquinas e implementos ou em áreas onde o pisoteio de animais é intenso, constituindo um dos mais sérios fatores de restrição ao desenvolvimento das plantas (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento de sua densidade em consequência da redução de seu volume, resultante da expulsão do ar dos poros do solo. Um aumento da densidade do solo em consequência de uma redução do seu volume pode ou não causar compactação adicional. A compactação é uma alteração estrutural que promove a reorganização das partículas e de seus agregados, podendo limitar a absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, resultando em decréscimo da produtividade das culturas (STONE et al., 2002).

Segundo Dias Junior (2000), vários pesquisadores tem constatado efeitos benéficos ou adversos da compactação do solo. Os efeitos benéficos são atribuídos à melhora do contato solo-semente e aumento da disponibilidade de água em anos secos. Dos efeitos maléficos a compactação excessiva pode limitar a absorção de nutrientes, a infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular, resultando na redução da produção e aumento da erosão e da energia necessária para o preparo de solo.

Os diferentes sistemas de manejo do solo têm a finalidade de criar condições favoráveis ao desenvolvimento da cultura. Todavia, o desrespeito às condições mais favoráveis para o

preparo do solo e o uso de máquinas cada vez maiores e pesadas para essas operações pode levar a modificações na estrutura do solo, causando-lhe maior ou menor compactação. O conhecimento do comportamento físico do solo possibilita adequar as atividades agrícolas à sua aptidão, o que pode reduzir a erosão das camadas superficiais e, por consequência, sua degradação física, química e biológica. A infiltração de água no solo e a espessura do horizonte A fornecem indicativos de sua qualidade gerando informações que tornam possível verificar a existência de camadas compactadas, como a formação superficial de crostas, bem como as consequências dos processos erosivos (BERTOLANI; VIEIRA, 2001).

Fallero et al. (2003) avaliaram a influência de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas do solo, testando preparos que envolviam revolvimento do solo versus sem preparo e concluíram que o tratamento sem revolvimento apresentou maiores valores de densidade, no entanto, os valores de macro e microporosidade mantiveram-se inalterados. Evidenciando que sistemas que tem por premissa o não revolvimento do solo podem aumentar a compactação superficial, no entanto, os espaços porosos permanecem inalterados.

Quatro fatores físicos do solo necessitam ser considerados, prioritariamente, quando se avalia a resposta das culturas a determinado tipo de preparo do solo: o teor de água, temperatura, aeração e impedimento mecânico. A compactação do solo pode influenciar todos esses fatores, afetando a planta durante alguma fase do seu ciclo de desenvolvimento (GAMERO, 1985).

2.3.1 Matéria orgânica, carbono orgânico e estoque de carbono do solo

A importância da matéria orgânica (MO) para os solos brasileiros é constatada por trabalhos que relacionam seus benefícios para as mais diferentes culturas. A matéria orgânica, ou húmus, é definida como sendo substâncias de natureza orgânica em avançado estágio de alteração, não sendo possível reconhecer sua origem. A MO tem efeito direto sobre as características físicas, químicas e biológicas dos solos, sendo considerada uma peça fundamental para a manutenção da capacidade produtiva dos solos em qualquer ecossistema terrestre. Do ponto de vista físico, melhora a estrutura do solo, reduz a plasticidade e a coesão, aumenta a capacidade de retenção de água e a aeração, permitindo maior penetração e distribuição das raízes. Atua diretamente sobre a fertilidade do solo por constituir a principal fonte de macro e micronutrientes essenciais às plantas, como também indiretamente, através da disponibilidade dos nutrientes, devido à elevação do pH, além de aumentar a capacidade de retenção dos nutrientes, evitando suas perdas. Biologicamente, a MO aumenta a atividade da

biota do solo (organismos presentes), sendo fonte de energia e de nutrientes para a mesma (BAYER; MIELNICZUK, 2008). Os níveis críticos estabelecidos por Raij et al. (1987), para a matéria orgânica do solo (MO), são: a) baixo: $MO < 25,0 \text{ g dm}^{-3}$; b) médio: $25,1 \leq MO \leq 50,0 \text{ g dm}^{-3}$; c) alto: $MO > 50,0 \text{ g dm}^{-3}$.

Braga (2011), em estudo realizado no noroeste do estado de São Paulo, constatou que a MO correlacionou-se linear e negativamente com a resistência mecânica à penetração, indicando que manejos do solo que visem seu aumento no perfil melhoram as condições físicas do solo e, por conseguinte, o desenvolvimento da cana-de-açúcar. O autor afirmou ainda que a matéria orgânica mostrou-se o melhor atributo para estimar e melhorar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar, já que apresentou correlação direta linear, e espacial com a mesma.

No âmbito das mudanças climáticas globais, o solo e suas formas de uso estão em foco, sobretudo no que se refere à agricultura. Os solos agrícolas podem atuar como dreno ou fonte de gases de efeito estufa (GEE), dependendo do sistema de manejo a que forem submetidos (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2001). No Brasil, a proporção entre as contribuições de gases de efeito estufa (GEE) provindas da queima de combustíveis fósseis *versus* agricultura e uso da terra é diferente em comparação ao padrão mundial. A queima de combustíveis fósseis é menos importante enquanto a utilização dos solos e alteração do sistema de cultivo na agricultura responde por mais de dois terços do total das emissões (MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - MCT, 2004). Para Roscoe (2003), a redução do uso de combustíveis fósseis e a substituição do consumo de produtos não renováveis por fontes renováveis (biomassa, álcool, biodiesel, energia solar e eólica) seria o melhor caminho para solucionar o problema.

Carvalho (2009) cita que os GEE provocam o aquecimento global e como a agricultura é totalmente dependente do clima, deve-se encontrar soluções para os problemas ligados ao tema no setor agrícola com a finalidade de buscar alternativas para minimizar esses danos e evitar uma grave crise mundial provocada pela falta de água potável e de alimentos.

As rochas sedimentares são o maior reservatório de carbono (C) do planeta. As trocas entre a atmosfera o solo ocorrem de forma gradativa com taxas anuais muito lentas. No ciclo geoquímico do C, esse pode ser incorporado aos sistemas terrestres pela fotossíntese. O CO_2 pode ser consumido pela respiração dos autótrofos, como fonte de energia para heterótrofos e em processos de decomposição. Parte desse C acumula-se no solo em forma de matéria orgânica do solo que também se decompõe em taxas lentas se tornando um importante reservatório nos sistemas terrestres (ROSCOE, 2003).

Watson et al. (2000) citam que os solos armazenam quatro vezes mais C que a vegetação. No entanto, o ciclo biogeoquímico desse elemento vem sendo perturbado de duas formas pela atividade humana: a queima de combustíveis fósseis e o uso de rochas carbonatadas e por meio de mudanças na cobertura vegetal resultados das diferentes formas de uso da terra associadas ao desmatamento.

O balanço dos estoques de carbono orgânico no solo é utilizado como um método indireto para a estimação do influxo/efluxo líquido de C-CO₂ no sistema solo-atmosfera. Solos, sob vegetação natural, apresentam estoque de C orgânico estável, porém quando cultivados resulta na diminuição dos estoques de C orgânico do solo. Isso ocorre devido o aumento do efluxo de CO₂ para a atmosfera e, nesse caso, a quantidade líquida de CO₂ emitida para a atmosfera pode ser determinada a partir da diferença dos estoques de carbono orgânico do solo cultivado em relação ao solo sob vegetação natural (COSTA et al., 2008).

O potencial de fixação e estocagem de C no solo sofre influência das condições climáticas locais, do relevo, da drenagem e do tipo de manejo de solo adotado, entre outras variáveis que ditam as taxas de aumento do C orgânico do solo (LAL, 2005; FALLOON et al., 2007; SMITH, 2008). O preparo de solo e o manejo de culturas afetam as taxas metabólicas dos microrganismos nos processos de decomposição dos resíduos vegetais e da matéria orgânica no solo (MOS), as quais também são influenciadas pela temperatura e umidade do solo (LA SCALA JUNIOR et al., 2006).

Há várias maneiras pelas quais o manejo apropriado da biosfera terrestre, particularmente do solo, possa resultar em significativa redução no aumento dos gases de efeito estufa. Uma destas é a adoção de práticas agrícolas com conservação do solo que possibilitaria não apenas aumentar a produtividade agrícola como também transformar os solos agrícolas em drenos ou sumidouros de CO₂ atmosférico, sequestrando o carbono presente na atmosfera em carbono estocado no solo, compondo a matéria orgânica do solo (MACHADO, 2005).

Sistemas de manejo que aumentem a adição de resíduos vegetais e a retenção de C no solo se constituem em alternativas importantes para aumentar a capacidade de dreno de C-CO₂ atmosférico e mitigação do aquecimento global (AMADO et al., 2001; BAYER et al., 2006). Entre as medidas possíveis para reduzir as emissões de gases provenientes da queima de resíduos agrícolas no Brasil destacam-se: corte mecânico da cana-de-açúcar e aproveitamento energético da biomassa, com consequente diminuição de desperdícios de matéria vegetal e energia; a redução de queimadas de culturas e de seus resíduos; uso de

práticas agrícolas de conservação dos solos; aplicação e implantação de legislação relacionada com o controle de queimadas nas unidades de federação (LIMA, 2002).

Diversos autores têm trabalhado com o intuito de quantificar o carbono orgânico e o estoque de carbono nos solos em diferentes culturas, sistemas e manejos e verificaram que os teores desse atributo no solo variam com o tipo/textura do solo e o manejo empregado na área (RANGEL; SILVA, 2007, PAIVA; FARIA, 2007, PAULA; VALLE, 2007; COSTA et al., 2008, FRAZÃO et al., 2010, GATTO et al., 2010;)

2.3.2 Densidade do solo

A densidade do solo é considerada um atributo avaliador da qualidade estrutural do solo, sendo muito utilizada como indicadora de sua estrutura e dureza. Desta forma, alterações dos seus valores refletem em modificações da estrutura do solo, devido à relação que existe entre a densidade e a porosidade total (DORAN et al., 1994). O uso e o manejo alteram a densidade do solo e, conseqüentemente, a porosidade total e a de aeração. A porosidade de aeração é a razão entre o volume de ar, avaliado quando sua umidade estiver na capacidade de campo, e seu volume total. O ar ocupa o espaço poroso do solo não ocupado pela água. Para um solo seco, todo o espaço vazio (porosidade total) é ocupado pelo ar. A exigência das plantas para com a aeração do solo, isto é, a porosidade livre de água necessária para o seu pleno desenvolvimento, varia entre as espécies e os tipos de solos.

A compactação do solo é resultado do processo físico exercido pela ação das forças mecânicas. Tais forças aproximam as partículas unitárias do solo, expulsando o ar e a água do seu interior. Desta forma, ocorre a redução do seu volume total, por diminuir drasticamente a macroporosidade e aumentar levemente a microporosidade. Conseqüentemente há um aumento tanto da densidade global como da resistência à penetração, assim como uma diminuição da taxa de infiltração (KOCHHANN et al., 2000). Em relação aos níveis críticos da densidade do solo, Bowen (1981) considerou que valores em torno de $1,55 \text{ kg dm}^{-3}$ para solos franco-argilosos e argilosos, e de $1,85 \text{ kg dm}^{-3}$ para solos arenosos afetam o desenvolvimento de raízes.

2.3.3 Resistência à penetração e umidade do solo

A resistência à penetração, fisicamente estabelecida pela pressão, é a razão qualquer entre força necessária para a penetração de uma base metálica do penetrômetro, provida de

uma extremidade, cuja área basal é conhecida e constante. Comparações dos valores de resistência mecânica, quando efetuadas para distintos sistemas de preparo do solo, ficam dificultadas devido à variabilidade da umidade. Assim, tal umidade deve ser tomada concomitantemente à da resistência, sendo, portanto tida como variável de controle desse processo. Este procedimento permite que os valores da resistência, que normalmente apresentam elevada variabilidade, possam ser comparados entre distintos sistemas agrícolas. Por outro lado, para um determinado tipo de solo, a resistência mecânica à penetração depende intimamente da sua densidade, do grau de umidade, do teor de matéria orgânica e da estrutura, assim como, varia na razão inversa e direta respectivamente com a umidade e a densidade (BENGOUGH et al., 2001).

Sendo a resistência do solo à penetração fortemente influenciada pela umidade do solo no momento da amostragem, que segundo Souza et al. (2006), quanto maior a umidade no solo, maior o coeficiente de variação para o atributo resistência à penetração, dessa forma é aconselhável que a amostragem seja realizada com baixos teores de água no solo, dados que corroboram com a metodologia sugerida: dois terços da microporosidade preenchida com água.

A taxa de alongação radicular diminui com o aumento da resistência à penetração do penetrômetro, que contrariamente às raízes, segue um trajeto linear no solo, de forma insensível à presença dos bioporos, planos de clivagem e/ou fraqueza. Tais locais são de extrema avidez à alongação radicular, resultando na super estimativa desse fato da ordem de duas a oito vezes maiores do que o crescimento normal das raízes. Assim, valores críticos de resistência, avaliados com o penetrômetro em condições de campo, nos quais a alongação radicular é cessada, variaram entre 0,8-5,0 MPa, dependendo do solo e da cultura. Por outro lado, a máxima pressão axial que a raiz pode exercer varia de 0,24 a 1,45 MPa, dependendo da espécie. Dessa forma, a alongação radicular cessa no solo quando a resistência, avaliada pelo penetrômetro, for muito maior do que a máxima pressão que a raiz poderá exercer (BENGOUGH; MULLINS, 1990; BENGHOUGH et al., 2001).

A resistência mecânica à penetração tem boa correlação com o crescimento radicular e com a redução do teor de água do solo ocorre um aumento do seu valor. A redução do teor de água do solo proporciona aumento da resistência à penetração, decorrente da maior coesão entre as partículas sólidas (MERCANTE et al., 2003). Arshad et al. (1996) mencionaram que valores da ordem de 5 MPa proporcionaram restrições ao desenvolvimento radicular. Também, classificaram a resistência à penetração (RP, em MPa) nas seguintes classes: a) extremamente baixa: $RP < 0,01$; b) muito baixa: $0,01 \geq RP < 0,1$; c) baixa: $0,1 \geq RP < 1,0$; d)

moderada: $1,0 \geq RP < 2,0$; e) alta: $2,0 \geq RP < 4,0$; f) muito alta: $4,0 \geq RP < 8,0$ e g) extremamente alta: $RP > 8,0$. A partir disso, a grande maioria dos trabalhos científicos que utilizam esse atributo passou a empregá-la na discussão de seus resultados.

Um dos atributos físicos mais adotados como indicativo da compactação do solo tem sido a resistência do solo à penetração (STONE et al., 2002), por apresentar relações diretas com o crescimento das plantas (HOAD et al., 2001) e por ser mais eficiente na identificação de estados de compactação comparada à densidade do solo (STRECK et al., 2004). A resistência do solo à penetração é um atributo físico relativamente fácil de ser obtido e, de certa forma, de ser correlacionado com a densidade e a macroporosidade. Para um mesmo solo, quanto maior a densidade do solo, maior será a resistência à penetração e menor a macroporosidade. Esta última constitui-se no principal espaço para o crescimento das raízes.

No entanto, deve ser levado em conta, que a resistência à penetração do solo, podendo apresentar grande variabilidade espacial é fortemente influenciada pelo teor de água do solo e tem sido utilizada como indicador da compactação do solo em sistemas de manejo, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (MERCANTE et al., 2003). Pelo uso do penetrômetro, é possível identificar a profundidade da camada compactada e, a partir daí, optar pelo implemento mais adequado de descompactação.

Para Klein et al. (1998), a resistência mecânica do solo à penetração é influenciada por vários fatores, sendo a densidade e a umidade os principais. Os autores citam que, em uma pesquisa de resistência mecânica do solo à penetração, é fundamental que se faça o monitoramento dos dados de densidade e de umidade, uma vez que esses fatores influenciam diretamente os valores da resistência mecânica do solo à penetração.

Pedrotti et al. (2001) ressaltaram ainda que, a manutenção de valores mais elevados de água na camada superficial do solo, em função da presença contínua de cobertura vegetal em tratamentos com plantio direto, resulta na ocorrência de menores valores de resistência do solo à penetração. Valores mais elevados de resistência à penetração foram encontrados nos sistemas de cultivo onde o teor de água era menor.

Utset e Cid (2001) verificaram comportamentos distintos da variabilidade espacial da RP em condições de solo seco e de solo úmido. Na condição de solo seco, os autores obtiveram coeficiente de variação de 25% e ajustaram semivariograma do tipo esférico, enquanto que, quando úmido, o coeficiente de variação foi de 80 % e os dados apresentaram efeito pepita puro, mostrando o efeito da variabilidade temporal da umidade do solo na variabilidade espacial da resistência à penetração. A distribuição da compactação do solo em

áreas sob plantio direto ocorre de maneira sistemática, sendo maior nas laterais da lavoura e diminuindo para o centro da lavoura.

Freddi et al. (2006), com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial e a correlação da resistência mecânica do solo à penetração com a produtividade de grãos da cultura do milho, sob preparo convencional de um Latossolo Vermelho, puderam observar que a resistência do solo à penetração apresentou moderada dependência espacial, não havendo correlação espacial entre a resistência do solo à penetração e a produtividade de grãos do milho quando os valores de resistência mecânica à penetração variaram entre 0,9 e 2,0 MPa, não restringindo a produtividade da cultura do milho.

2.3.4 Porosidade do solo

Definida como sendo a porção do volume do solo não ocupada por partículas sólidas, isto é, o volume dado pelos componentes orgânicos e inorgânicos, sua porosidade depende principalmente da textura e estrutura, sendo considerada como ideal quando apresentar 50% do seu volume. Sua caracterização é importante para a adoção de medidas de manejo, pois está estreitamente ligada à dinâmica de armazenamento e movimento da água e dos solutos e da circulação do ar no solo. Assim, o espaço poroso do solo regula as relações entre a fase sólida, líquida e gasosa (KIEHL, 1979; EPSTEIN; BLOON, 2006).

A porosidade do solo é dividida em macroporosidade e microporosidade. A primeira, sendo responsável pela aeração e drenagem da água, é constituída de poros com diâmetro maior do que 0,05 mm. Já a segunda, responsável pelo armazenamento da água, possui poros menores do que o referido valor. Essa divisão é de grande interesse agrônômico, uma vez que a microporosidade e a macroporosidade exercem diferentes e essenciais funções ao desenvolvendo das plantas. Na prática, sabe-se que condições ideais de porosidade total, macroporosidade e microporosidade raramente são alcançadas, devidas principalmente às influências antrópicas, estabelecidas pelo manejo inadequado da mecanização agrícola. Assim, são considerados valores ideais para a macroporosidade e a microporosidade quando apresentarem respectivamente $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ do volume total do solo. Por outro lado, valores de macroporosidade menores do que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ podem afetar o desenvolvimento das raízes, a ponto de comprometer a produtividade vegetal (KIEHL, 1979).

A porosidade do solo vem sendo muito utilizada nos estudos de correlação com outros atributos pertencentes à relação massa/volume, como por exemplo, a densidade global e

resistência à penetração, apresentando considerável afinidade com eles (CARVALHO et al., 2002; SOUZA et al., 2004a; GREGO; VIEIRA, 2005; SECCO et al., 2005).

Na prática o espaço poroso tende a ser menor nos solos arenosos do que nos argilosos, indicando valores respectivamente entre $0,35-0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,40-0,60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Porém, dependendo da classe granulométrica, o solo pode apresentar uma porosidade total mínima de $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e máxima de $0,80 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (KIEHL, 1979; RESENDE et al., 2002; REICHARDT; TIMM, 2004).

2.4. Estudos sobre aspectos físicos, manejo do solo e o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar

Juntamente com o desenvolvimento das cultura, a determinação da compactação do solo pode ser avaliada pela densidade do solo, distribuição da porosidade no solo e resistência do solo à penetração segundo vários pesquisadores (OLIVEIRA et al., 1995; CEDDIA et al. 1999; CENTURION et al., 2001; FALLEIRO et al., 2003; SILVA, 2003; ABREU et al., 2004; SOUZA et al., 2004a; PAULINO et al., 2004; CAMIOTTI et al., 2005; BRITO et al., 2006; IAIA et al., 2006; BERNER et al., 2007; AZEVEDO, 2008).

Oliveira et al. (1995) estudaram as características físicas de um Latossolo Vermelho no município de Piracicaba (SP) sob mata nativa e cultivado continuamente com cana-de-açúcar por 16, 30 e 50 anos num perfil de 1 metro de profundidade do solo. Observaram variações significativas nas características físicas das camadas superficiais principalmente no cultivo de 16 anos de plantio em que encontrou-se uma camada compactada em detrimento do alto grau de mecanização com densidades chegando ate $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ nos primeiros 20 cm de profundidade acima de níveis considerados críticos para o solo estudado.

Iaia et al. (2006) avaliaram a resistência do solo a penetração, com um penetrógrafo eletrônico em dois tipos de solos, um Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa e um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, textura média, submetidos aos processos de mecanização e transporte, na cultura de cana-de-açúcar, em função de diferentes números de cortes e diferentes profundidades de trabalho. Os tratamentos estudados foram: solo textura argilosa, 2 cortes; solo textura argilosa, 4 cortes; solo textura média, 2 cortes e solo textura média 4 cortes. Concluíram que os tratamentos com maiores números de tráfegos levaram á compactação em profundidades maiores que 25 cm corroborando com estudos realizados por Oliveira et al. (1995).

A necessidade de tratamentos culturais que visem a longevidade do canavial, como a tríplice operação, ou seja, escarificação na entrelinha, adubação e gradagem é um tratamento cultural utilizado para descompactação do solo para melhoria das condições para o rebrote da soqueira. Contudo, estudo realizado com a intenção de avaliar os efeitos de duas profundidades de escarificação (0,15 e 0,30m), nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho, na distribuição das raízes da rebrota e produtividade da soqueira comparada com apenas a gradagem e sem manejo, Paulino et al. (2004), na terceira soca da variedade RB 72 454, verificaram, que o manejo pós-colheita das soqueiras alterou a densidade do solo e a porosidade do solo, ou seja, a escarificação diminuiu a densidade e aumentou a porosidade. Assim como, a escarificação a 0,15 m de profundidade proporcionou um maior comprimento de raízes na camada de 0,25 a 0,50 m. No entanto, não foi observada redução no comprimento de raízes e produtividade de colmos decorrentes da compactação do solo observada no tratamento apenas com gradagem onde a densidade do solo foi de $1,73 \text{ kg dm}^{-3}$.

Camilotti et al. (2005) em um trabalho conduzido em um Latossolo Vermelho distrófico típico, sob cultivo de cana crua, também avaliaram o efeito prolongado de sistemas de preparo do solo, com e sem cultivo da soqueira, e épocas de amostragem sobre algumas propriedades físicas do solo. Foram avaliadas a porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade do solo, além do perfilhamento e da produtividade da cultura. E observaram que houve sensível redução da macroporosidade com o aumento da microporosidade após quatro colheitas da cana-de-açúcar nas camadas solo abaixo de 10 cm, independentemente dos sistemas de preparo do solo e cultivo da soqueira. Após esse mesmo período, houve aumento pronunciado na densidade do solo para as camadas compreendidas entre 20 e 50 cm, independentemente do manejo do solo. Os sistemas de preparo do solo, cultivo da soqueira e épocas de amostragem não revelaram mudanças consistentes na densidade do solo. O cultivo da soqueira favoreceu o aumento da macroporosidade com subsequente decréscimo na microporosidade, sendo o efeito inverso observado após a colheita. No entanto, concordando com Paulino et al. (2004), os sistemas de preparo do solo e de cultivo da soqueira não afetaram o perfilhamento e tampouco a produtividade da cultura. Os estudos evidenciam a importância da avaliação da compactação em canaviais já instalados para garantir as produtividades desejadas e reduzir custos no preparo de solo e cultivo das soqueiras.

Já Azevedo (2008), teve como um dos objetivos do seu trabalho avaliar três sistemas de manejo em um Latossolo Vermelho eutrófico cultivado com cana-de-açúcar, comparando atributos biométricos da parte aérea, enraizamento e alguns atributos físicos do solo (densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade). Os sistemas de cultivo

foram o chamado preparo vertical (escarificação, duas gradagens no preparo de solo e escarificação e adubação incorporada nas soqueiras), cultivo mínimo (escarificação e uma gradagem no preparo de solo e adubação incorporada nas soqueiras) e plantio direto (sem preparo de solo e adubação sem incorporação). No estudo em questão observou-se que a produtividade, a densidade, a porosidade foram similares para os diferentes manejos, mas o preparo vertical proporcionou uma menor resistência à penetração nas camadas superficiais do solo. O que a inferir que os sistemas cultivo mínimo e plantio direto são alternativas para o preparo vertical, tendo em vista a análise econômica das mecanizações, ou seja, redução no número de operações e produtividades iguais.

No âmbito da comparação em tipos de colheita e a avaliação dos atributos físicos do solo, Ceddia et al. (1999), instalaram um experimento de longa duração (1989-1994) com a variedade RB 73 9735, com o objetivo de avaliar o efeito dos sistemas de colheita da cana-de-açúcar (cana crua e cana queimada) sobre algumas propriedades físicas de um solo. Após 6 anos de cultivo foram observadas alterações no sistema cana queimada, comprovada pela diminuição do diâmetro médio dos agregados do solo e também uma redução significativa na porosidade total na camada de 0 a 5 cm de profundidade do solo, que evidencia que o sistema de cana queimada degrada fisicamente do solo pela redução da matéria orgânica no perfil.

O preparo superficial excessivo e queima dos resíduos, modifica significativamente as propriedades físicas do solo. Segundo Souza et al. (2004b), que trabalharam com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial da densidade e porosidade de um Latossolo Vermelho eutrófico sob cultivo de cana-de-açúcar, houve a redução da porosidade total, microporosidade e, sobretudo, da macroporosidade, com concomitantes aumentos de densidade do solo, principalmente na profundidade de 0,2 - 0,4 m, indicando compactação nesta camada. Observaram também que pequenas variações nas formas do relevo condicionaram variabilidade diferenciada para os atributos físicos do solo.

A espécie de planta usada na área também influencia os atributos, confirmado pelo estudo realizado em um Latossolo Vermelho eutrófico típico muito argiloso, sob mata nativa (Floresta Latifoliada Tropical) e sob três culturas, milho, cana-de-açúcar e pastagem. Avaliou-se as seguintes propriedades físicas: resistência do solo à penetração, até 40 cm de profundidade e velocidade de infiltração de água, nos quatro sistemas de uso do solo. Todas as formas de uso e manejo empregadas induziram, em ordem crescente, milho, cana-de-açúcar e pastagem, à degradação das propriedades físicas do solo em relação ao solo natural. E esta degradação foi quantificada pelos maiores valores de resistência do solo à penetração que chegaram ao redor de 9 MPa na pastagem na camada de 0 -10 cm e menores valores de

velocidade de infiltração de água. Dessa forma deduz-se que nos solos estudados, as modificações acentuadas foram em função do manejo e apesar de não evidenciada na pesquisa, a degradação sob cana-de-açúcar também resultou em altos valores de resistência, principalmente na camada de 10-20 cm de profundidade do solo (CENTURION et al., 2001).

Com o objetivo de determinar as alterações das propriedades físicas e químicas de um Argissolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo em cana-de-açúcar (irrigado, não irrigado, aplicação de vinhaça e solo sob mata nativa), no momento da renovação do canavial foi realizado o mesmo preparo de solo com subsolagem e uma gradagem pesada, onde Silva (2003), constatou que o cultivo da cana-de-açúcar modificou a estrutura do solo e morfologia dos poros, reduzindo a porosidade total e a estabilidade dos agregados. O estudo em questão evidencia que o cultivo nos sistemas de manejo alteram as características físicas do solo.

Berner et al. (2007) tiveram como um dos objetivos de sua pesquisa avaliar as propriedades físicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar submetidos a dois tratamentos: cultivo contínuo com arado e grade e uma lavoura na quinta soca sem aplicação de nenhuma forma mecânica de mobilização. Concluíram que o tratamento com preparo do solo aumentou a variabilidade espacial do atributo porosidade, ou seja, alterou seus valores no espaço, demonstrando heterogeneidade do atributo. No entanto, constataram valores muito próximos de densidade do solo, macro e microporos comparando-se as camadas de cada tratamento.

A utilização intensiva de máquinas e implementos agrícolas tem contribuído para aumentar as áreas com problemas de compactação, provavelmente pela ausência de modelos capazes de estimar a capacidade de suporte do solo. Souza et al. (2004a), com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial da resistência à penetração do solo, umidade e densidade do solo de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar por trinta anos. Observaram altos valores para a resistência à penetração (acima de 4MPa) e densidade do solo ($1,4 \text{ kg m}^{-3}$), na profundidade de 0,2–0,4 m, indicando compactação nesta camada.

Carvalho et al. (2008), desenvolveram um projeto num talhão de cana, no sistema de colheita mecanizado, num Latossolo Vermelho argiloso e avaliaram os atributos físicos conteúdo de água a base de volume e resistência mecânica do solo a penetração e verificaram que os valores de resistência mecânica a penetração no solo estudado aumentaram em profundidade, variando de 1,22 a 11,36 MPa; 1,22 a 13,39 MPa e 2,57 a 15,41 MPa, nas três camadas estudadas (0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30m), demonstrando compactação limitante nas camadas subsuperficiais e não se correlacionando com a umidade no solo.

Silva et al. (2009) estudaram a variabilidade espacial da densidade, umidade do solo e da resistência mecânica à penetração, utilizando-se um penetrômetro de impacto, em um Latossolo Vermelho distrófico típico em sistema plantio direto e preparo convencional no cerrado. Concluíram que a variável resistência à penetração do solo apresentou variabilidade espacial com comportamento distinto conforme o cultivo e a profundidade, onde avaliaram valores de maior resistência para a primeira camada (0-20 cm) no sistema plantio direto e maiores resistências para a segunda camada (20-40 cm) no sistema convencional.

2.5 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 varias 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 de um sistema de gestão que considera a variabilidade espacial da lavoura em todos os aspectos desde a produtividade, aspectos 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 agronômicos. 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 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.

2.6. A geoestatística na pesquisa agronômica

Entre os fatores de produção responsáveis pela variabilidade espacial da produtividade das culturas, os atributos 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.

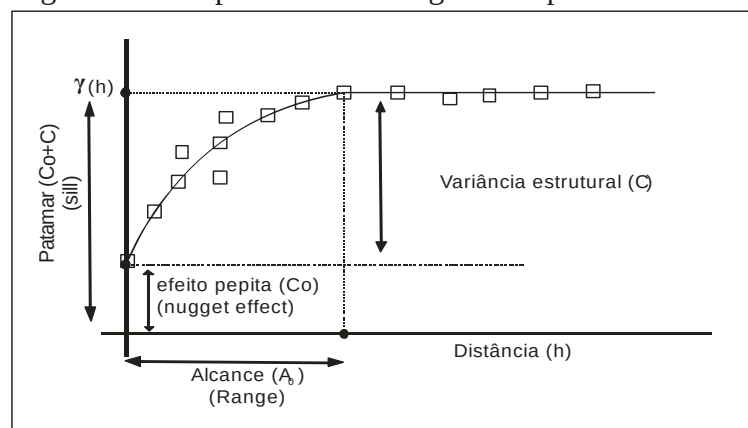
2.6.1. Semivariograma

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 (C_0), o patamar ($C_0 + C$) e o alcance (A_0). 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 $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados pelo vetor h , e Z representa os valores medidos para atributos do solo ou da cultura. O gráfico de $\gamma^*(h)$ 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 experimental.



GS⁺ (2004)

O efeito pepita (C_0) 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 ($C_0 + C$) 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 (A_0) 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 (C_0), o alcance (A_0) e o patamar (C_0+C). A classificação da dependência espacial (**ADE**) pode ser realizada mediante sugestões de Cambardella et al. (1994), modificadas pelo GS⁺ (2004), conforme a seguinte expressão:

$$\text{ADE} = [C/(C+C_0)].100.....(2)$$

onde: **ADE** é o avaliador da dependência espacial; **C** é a variância estrutural; e $C+C_0$ é o patamar.

A interpretação para o **ADE** é a seguinte: a) $\text{ADE} \leq 25\%$ indica variável espacial fracamente dependente; b) $25\% < \text{ADE} \leq 75\%$ moderadamente dependente, e c) $\text{ADE} > 75\%$ fortemente dependente. 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.

2.6.2. 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.

2.6.3. Semivariograma cruzado e co-krigagem

Em situações em que existe a correlação espacial entre duas propriedades, 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 Z_1 e Z_2 . 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 experimental onde foram coletados os dados está localizada na Fazenda Valença I, talhão 101, coordenadas 20°27'33" lat. S; 51°08'05" lon. W sob responsabilidade da Usina Vale do Paraná, situada no município de Suzanópolis, São Paulo, Brasil. O tipo climático da região é Aw, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e inverno seco, típico da região cerrado brasileiro. Segundo dados climáticos da Estação Agroclimatológica de Marinópolis (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA- UNESP, 2011), que representa a região estudada, durante o ano agrícola 2009/2010, apoiando-se nos meses de julho de 2008 a maio de 2010, a temperatura média foi 24,2°C, umidade relativa do ar média foi 69,6% e precipitação total do período foi 2445,8 mm.

O solo estudado foi um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abráptico textura média/argilosa, A moderado, hiperdistrófico, meso-epieutrófico, endoálico, endodêmico, epicompactado, muito profundo, fortemente ácido. No Quadro 1 estão apresentados dados da caracterização morfológica e analíticos do solo estudado, obtidos por ocasião do Levantamento Taxonômico Semidetalhado dos Solos da Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar (ALVES et al. 2009).

Para a implantação da cultura da cana-de-açúcar, variedade RB 85 5453, sob área de pastagem (braquiária) de 10 anos, dessecou-se a vegetação da área com glifosato utilizando-se a dose de 2,5 kg ha⁻¹ do produto comercial. Para o preparo do solo foi realizada uma gradagem pesada modelo SGAC 18 (Civemasa), duas passadas de grade média modelo SIC 28 (Civemasa). Em seguida distribuição a lanço 2,0 t ha⁻¹ de calcário dolomítico incorporado com um arado de aiveca (4 aivecas) seguido do com uma grade leve modelo GNP 40 (Civemasa).

O plantio do talhão foi realizado no dia 12/06/2006, utilizando-se para abertura do sulco de plantio um sulcador de duas linhas, no espaçamento de 1,50 m. No momento da sulcação utilizou-se 500 kg ha⁻¹ da fórmula 6-30-24 e para cobertura dos toletes no sulco de plantio, foi aplicado fipronil na dose de 250 g ha⁻¹ do produto comercial, visando o controle de pragas

Quadro 1- Descrição morfológica e dados analíticos do solo estudado

Horizonte	Profundidade	Descrição
Ap	0-33 cm	bruno-avermelhado escuro (2,5YR 3/4, úmida); média; moderada média blocos angulares; dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e abrupta.
BA	33-63 cm	vermelho escuro (2,5YR 3/6, úmida); média; moderada grande laminar; dura, friável, plástica e pegajosa; transição ondulada e abrupta.
Bt1	63-124 cm	vermelho (2,5YR 4/8, úmida); argilosa; moderada grande blocos angulares; ligeiramente dura, firme; plástica pegajosa; transição plana e gradual.
Bt2	124-164 cm	vermelho (2,5YR 4/8, úmida); argilosa; moderada grande blocos angulares; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
Bt3	164- 200 cm+	vermelho (2,5YR 4/8, úmida); argilosa; moderada média blocos angulares; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa.

Horizonte		Composição granulométrica da TFSA			Relação
Símbolo	Profundidade	areia	silte	Argila	silte/argila
	(cm)	g kg ⁻¹			
Ap	0-33	725	115	160	0,72
BA	33-63	537	120	343	0,35
Bt1	63-124	569	78	353	0,22
Bt2	124-164	557	74	369	0,20
Bt3	164- 200 +	541	74	385	0,19

Horizonte		Atributos físicos			
Símbolo	Profundidade	Densidade do solo	Densidade da partícula	Macroporosidade	Porosidade total
	(cm)	kg dm ⁻³		m ³ m ⁻³	
Ap	0-33	1,56	2,59	0,07	0,40
BA	33-63	1,58	2,55	0,06	0,35
Bt1	63-124	1,50	2,58	0,06	0,37
Bt2	124-164	1,44	2,62	0,09	0,43
Bt3	164- 200 +	1,49	2,59	0,08	0,41

Horizonte		Atributos químicos											
Símbolo	Profundidade	P	MO	pH	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺	Al ³⁺	SB	T	V%	m%
	(cm)	mg dm ⁻³	g.dm ⁻³	CaCl ₂	mmolc dm ⁻³								
Ap	0-33	5,0	17	4,5	2,6	17	10	21	3	30	54	56	10
BA	33-63	2,8	10	4,5	1,6	13	10	13	13	24	50	48	36
Bt1	63-124	1,4	5	4,2	1,2	6	6	15	18	13	46	29	57
Bt2	124-164	1,4	3	4,2	0,6	2	7	14	16	10	40	26	60
Bt3	164- 200 +	1,4	5	4,2	0,6	2	5	4	20	7	31	23	74

Alves et al. (2009)

de solo, principalmente cupins. O primeiro corte da cultura foi em setembro de 2007 (colheita mecanizada crua) posteriormente realizou-se aplicação de 1 t ha^{-1} de gesso e 500 kg ha^{-1} da fórmula 18-00-27 em cobertura sem incorporação. Após o segundo corte, ano de 2008, realizou-se adubação da soqueira com 400 kg ha^{-1} da fórmula 18-00-27 em cobertura, sem incorporação.

Para a coleta de dados, a cultura encontrava-se no terceiro corte, entretanto bisada no ano de 2009, ou seja, estava com 24 meses em campo. O manejo para o corte manual foi realizado, desempenhando a queima do talhão no dia 24/05/2010. Uma visão geral da área após a queima do talhão pode ser observada na Figura 2. Na Figura 3 estão apresentadas a curva de resistência à penetração (a) e a umidade gravimétrica do solo (b), avaliada num perfil de 60 cm de profundidade do solo obtida pela média de 15 pontos caracterizando a compactação no perfil do solo localizado na área experimental (29/05/2010). No Quadro 2, observa-se a análise química dos primeiros 40 cm de profundidade do local de origem dos dados, média obtida de 118 amostras simples. Para a obtenção dos dados de caracterização do local de origem dos dados utilizou-se um penetrômetro de impactos para a obtenção dos dados da resistência do solo à penetração e um trado de caneco para obtenção das amostras de umidade gravimétrica e fertilidade do solo (29/05/2010).

3.2 Implantação e caracterização da malha experimental

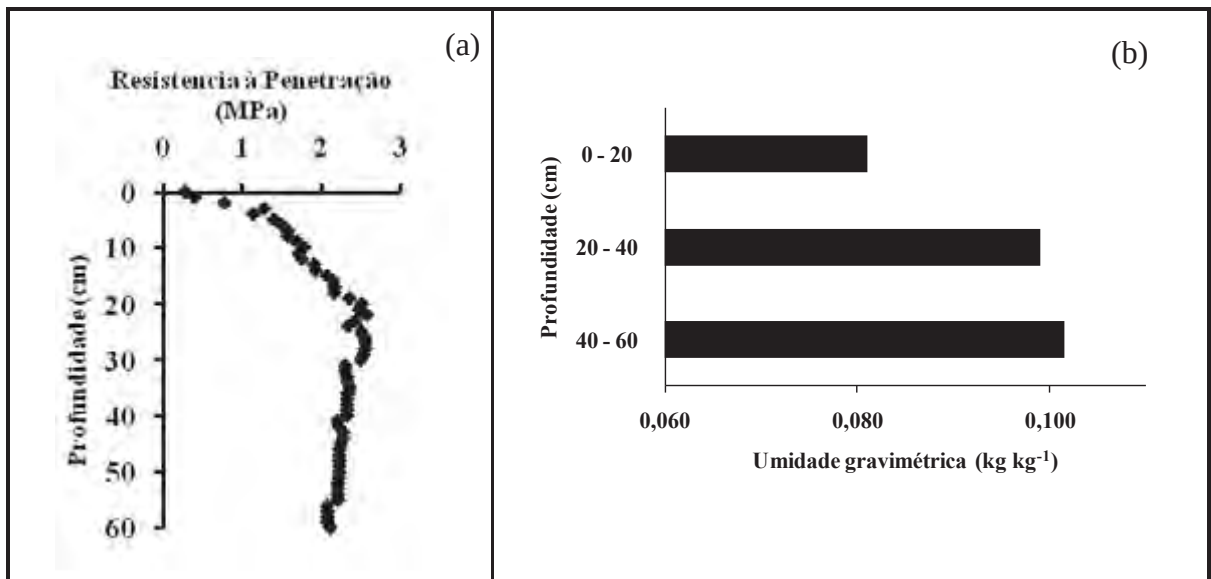
Na Figura 4 observa-se o croqui georreferenciado que foi confeccionado contendo 118 pontos distribuídos aleatoriamente de forma a cobrir a área do talhão escolhido para a amostragem (10,5 ha). Suas coordenadas originaram uma planilha de dados de latitude e longitude de cada ponto no espaço. Com o auxílio de um GPS de bolso alimentado por essa planilha de coordenadas os pontos foram materializados num talhão de cana-de-açúcar queimada com auxílio de estacas numeradas. Na malha de coleta, os pontos da grande malha tinham de aproximadamente, 34 m e na malha de refinamento, aproximadamente 17m, instalada com intuito de avaliar dependências espaciais menores que 34m.

Figura 2- Aspecto geral do local de coleta das amostras (talhão cultivado com cana-de-açúcar)



Gioia (2011)

Figura 3- Curva de resistência á penetração (a) e os valores de umidade gravimétrica (b) em um perfil de 60 cm de profundidade na área experimental



Gioia (2011)

Quadro 2- Análise química do solo da área de estudo

Profundidade	Atributos químicos											
	P	MO	pH	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺	Al ³⁺	SB	T	V%	m%
(cm)	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	mmolc dm ⁻³								
0 – 20	6,1	14,5	5,0	2,2	9,3	5,3	18,6	1,6	17,3	37,5	45,1	9,6
20 – 40	6,2	13,1	5,0	1,1	10,8	6,9	17,0	1,2	19,5	37,3	50,2	6,9

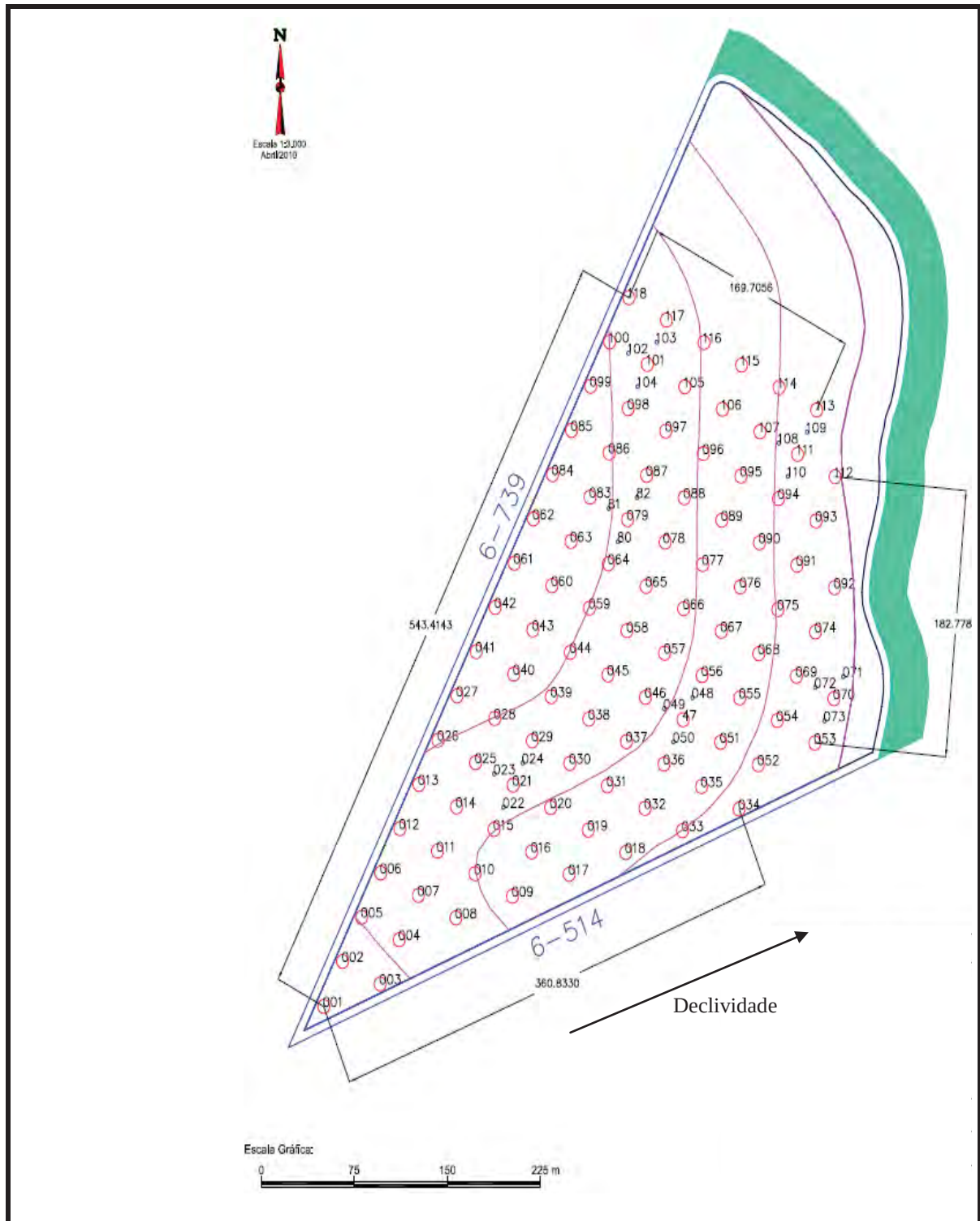
Gioia (2011)

3.3 Coleta e metodologia de determinação dos atributos pesquisados

Para a coleta dos atributos da planta definiu-se uma área útil, duas linhas de 3m de cultivo, totalizando uma área de 9 m² ao redor do ponto amostral (25/05/2011). Para a obtenção do atributo população de plantas (POP), expresso em pl m⁻², utilizou-se uma trena para marcar 3m lineares e assim executou-se a contagem do número de colmos industrialmente viáveis por ponto. Para o atributo tonelada de cana-de-açúcar por hectare (TCH), expresso em t ha⁻¹, utilizou-se uma balança eletrônica portátil com capacidade de 50 kg e precisão de 20g, para tanto, os colmos da área útil foram cortados simulando a colheita manual, 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 THC, em uma planilha do Excel realizou-se a extrapolação da área útil de 9m² para 1ha.

Para a obtenção dos dados tecnológicos da planta, foram retirados 10 colmos industrializáveis, retirados em seqüência na touceira, os feixes foram despontados, despalhados, numerados e encaminhados ao laboratório, segundo recomendação de Bidoia e Bidoia (2008), ao laboratório PCTS (Pagamento da Cana-de-açúcar pelo Teor de Sacarose) da Usina Vale do Paraná, unidade de Suzanápolis-SP, onde foram determinados: açúcares totais recuperáveis (ATR), expresso em kg t⁻¹; sólidos solúveis totais (BRI), sacarose no caldo (POL), pureza aparente (PUR) e fibra (FIB), expressos em %; seguindo a metodologia determinada por Consecana (2006). Dessa forma os atributos da planta foram: TCH, ATR, BRI, POL, PUR e FIB.

Figura 4- Croqui da malha experimental



Gioia (2011)

Para a obtenção dos atributos do solo, foram coletadas amostras individualmente no entorno do ponto e dentro da área útil e dessas foram determinadas: carbono orgânico (CO) (t ha^{-1}), estoque de carbono no solo (EC) (t ha^{-1}), densidade do solo (DS) (kg dm^{-3}), resistência à penetração do solo (RP) (MPa), umidade gravimétrica do solo (UG) (kg kg^{-1}), umidade volumétrica do solo (UV) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), macroporosidade do solo (MA) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), microporosidade do solo (MI) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e porosidade total do solo (PT) ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). 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 20 cm e, profundidade 2 ou 2ª profundidade, para a camada de 20 a 40 cm. 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.

Para determinação dos atributos carbono orgânico (CO) e estoque de carbono no solo (EC), foram retiradas amostras deformadas, com um trado de caneco, uma por ponto e por profundidade, ensacadas, numeradas e enviadas para o Laboratório de Fertilidade do Solo da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, onde foram submetidas à análise. O laboratório utiliza metodologia preconizada por Raij et al. (1987) para obtenção do carbono orgânico do solo (COS) (combustão úmida, via calorimétrica). Desta forma os dois atributos citados foram obtidos segundo as seguintes expressões:

$$\text{CO} = \text{COS} \cdot 2.10^6 / 10^6 \dots\dots\dots(4)$$

onde: CO é o carbono orgânico do solo (t ha^{-1}), COS é o carbono orgânico do solo (g dm^{-3}).

$$\text{EC} = \text{CO} \cdot \text{DS} \dots\dots\dots(5)$$

onde: EC é o estoque de carbono do solo (t ha^{-1}), CO é o carbono orgânico do solo (t ha^{-1}) e DS é a densidade do solo (kg dm^{-3}).

Os dados do atributo resistência à penetração do solo (RP) foram obtidos utilizando-se um penetrômetro de impactos, modelo IAA/Planalsucar/Stolf, em que os perfis de resistência à penetração foram avaliados para as duas profundidades já citadas e a expressão utilizada para o cálculo, determinada por Stolf (1991), foi a mesma utilizada por Montanari (2009):

$$\text{RP} = \{5,581 + 6,891 \cdot \{[N/(P-A)] \cdot 10\} \cdot 0,0981 \dots\dots\dots(6)$$

onde: RP é a resistência à penetração ao solo (MPa); N é o número de impactos efetuados com o peso do penetrômetro para obter a leitura; A e P são as leituras antes e depois dos impactos (cm).

Para a obtenção dos atributos densidade do solo (DS), microporosidade do solo (MI), macroporosidade do solo (MA) e porosidade total do solo (PT) foram coletadas amostras de solo em forma de monólitos indeformados. A determinação dos valores foi pelo Método do

Anel Volumétrico, expressa em kg dm^{-3} , para a densidade do solo (DS) que relaciona a massa seca do solo contida no volume conhecido do anel. E, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, para a determinação e caracterização do volume de poros, utilizando-se do Método da Mesa de Tensão, para os atributos microporosidade do solo (MI), macroporosidade do solo (MA) e porosidade total do solo (PT), metodologias constantes de Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA (1997).

As amostras deformadas para a obtenção da umidade gravimétrica do solo (UG) foram coletadas no momento da obtenção da resistência à penetração do solo, utilizando-se um trado de caneca, acondicionando-se pequenas porções em pequenos sacos bem fechados e numerados, expressa em kg kg^{-1} (EMBRAPA, 1997). Já a umidade volumétrica (UV), expressa em $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, foi determinada pelo do seguinte cálculo apresentado em Kiehl (1979):

$$UV = UG \cdot DS \dots\dots\dots(7)$$

onde: UV é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); UG é a umidade gravimétrica (kg kg^{-1}) e DS é a densidade do solo (kg dm^{-3}). Todas as determinações dos atributos físicos do solo foram realizadas no Laboratório de Análises Físicas do Solo da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP. As coletas das amostras de solo foram realizadas durante o período de 27/05/10 a 29/05/10 e os resultados, avaliados no período de 29/05/10 a 21/06/10. Em resumo, os 18 atributos do solo analisados foram: a) 1ª profundidade: CO1, EC1, DS1, RP1, UG1, UV1, MA1, MI1 e PT1; e b) 2ª profundidade: CO2, EC2, DS2, RP2, UG2, UV2, MA2, MI2 e PT2.

3.4 Análise estatística e geoestatística dos atributos pesquisados

Para cada atributo estudado foi efetuada a análise descritiva com o auxílio da estatística clássica, utilizando o Software SAS (SCHLOTZHAVER; LITTELL, 1997), sendo calculados a média, mediana, moda, valores mínimo e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e análise da distribuição de frequência. Seguidamente, foram identificados os *outliers*, conforme identificação do gráfico de ramos e folhas, efetuando-se a substituição deles pelo valor médio dos circunvizinhos. Assim, para testar a hipótese da normalidade, ou da lognormalidade dos atributos, foi utilizado o teste de Shapiro e Wilk (1965) a 1%. Nele, a estatística W testa a hipótese nula, a qual julga ser a amostra proveniente de uma população com distribuição normal.

Na sequência, com o auxílio da planilha de cálculos Excel, foi montada a matriz de correlação, para posteriormente modelar as regressões de interesse para as combinações, duas

a duas, entre os atributos estudados. Utilizando-se do pacote computacional SAS, foram efetuadas as regressões lineares múltiplas entre a TCH (variável dependente) em função dos atributos da planta da cana-de-açúcar e dos atributos físico-químicos pesquisados (variáveis independentes) nas duas camadas de solo estudadas, no intuito de selecionar os atributos que melhor estimassem a TCH, por intermédio do *stepwise*, a 10% de probabilidade para a inclusão e exclusão de variáveis no modelo. O desempenho da equação foi analisada pelo coeficiente de determinação (R^2).

Para cada atributo foi analisada a dependência espacial pelo cálculo do semivariograma, com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote computacional *Gamma Design Software 7.0* (GS⁺, 2004). Os ajustes dos semivariogramas (krigagem e co-krigagem), em função de seus modelos (linear, esférico, exponencial e gaussiano), foram efetuados pela seleção inicial de: 1) a menor soma dos quadrados dos desvios (RSS); 2) o maior coeficiente de determinação (r^2), e 3) o maior avaliador da dependência espacial (ADE). A decisão final do modelo representante do ajuste foi pela validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem e/ou co-krigagem. Para cada atributo foram relacionados o efeito pepita (C_0), o patamar (C_0+C) e o alcance (A_0). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi conforme sugestões de Cambardella et al. (1994), modificada por GS⁺ (2004) conforme a seguinte expressão:

$$ADE = [C/(C+C_0)].100.....(8)$$

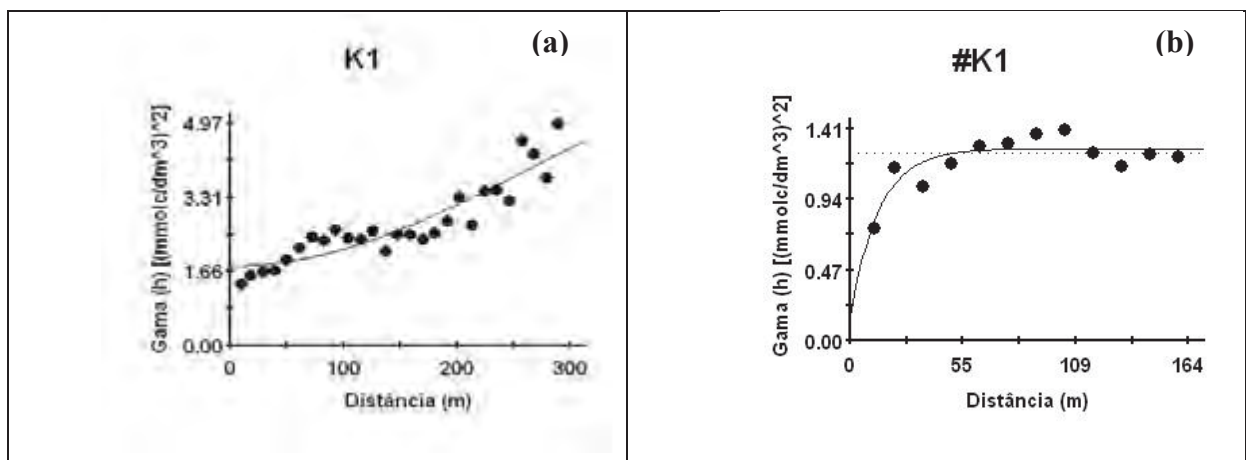
onde: ADE é o avaliador da dependência espacial; C é a variância estrutural; $C+C_0$ é o patamar. No entanto, a interpretação proposta para o ADE foi a seguinte: a) $ADE < 20\%$ = variável espacial de muito baixa dependência (MB); b) $20\% \leq ADE < 40\%$ = baixa dependência (BA); c) $40\% \leq ADE < 60\%$ = média dependência (ME); d) $60\% \leq ADE < 80\%$ = alta dependência (AL), e e) $80\% \leq ADE < 100\%$ = muito alta dependência (MA). Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação por krigagem, os mapas para a interpretação e o detalhamento da variabilidade espacial dos atributos pesquisados.

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. A Figura 5 ilustra tipicamente o semivariograma não-estacionário e o estacionário.

Figura 5- Exemplos de semivariogramas: (a) não-estacionário e (b) estacionário.



Dalchiavon (2010)

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

$$Z(s) = t(s) + R(s) \dots \dots \dots (9)$$

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:

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y \dots \dots \dots (10)$$

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy \dots \dots \dots (11)$$

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy + a_6.x^3 + a_7.y^3 + a_8.x^2y + a_9.y^2x \dots \dots \dots (12)$$

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:

$$R(x,y) = Z(x,y) - t(x,y) \dots \dots \dots (13)$$

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:

$$Z^*(x,y) = t^*(x,y) + R^*(x,y) \dots \dots \dots (14)$$

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.

Após a exclusão da tendência nos dados dos atributos, estes ficaram precedidos do símbolo # quando referidos na análise semivariográfica e na validação cruzada (#TCH). Já quando referidos no mapa de krigagem e/ou co-krigagem ficaram precedidos por £ (£TCH).

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 3 está apresentada a análise descritiva inicial dos atributos avaliados na cultura da cana-de-açúcar. Segundo Pimentel Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada de acordo 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 ($CV > 30\%$). Braga (2011) trabalhando com a cultura da cana soca em um Argissolo Vermelho eutrófico obteve CVs classificados como alto para a produtividade de colmos e médio para a população de plantas. Para as condições em que essa pesquisa foi realizada obteve-se, para os mesmos atributos, CVs classificados como alto para TCH e POP, 23,0 e 20,9%, respectivamente (Quadro 3). Também corroborando com pesquisa realizada pelo mesmo autor citado, para os atributos ATR, BRI e POL foram observados CVs médios, com valores de 11,9, 11,3 e 13,7%, respectivamente (Quadro 3). Para os atributos PUR e FIB, em que os CVs foram 3,7 e 9,7%, respectivamente, e classificados como baixos, também assemelham-se com dados obtidos pelo mesmo autor.

4.1.1.2 Atributos do solo

Nos Quadros 4 e 5 constam as análises descritivas iniciais dos atributos do solo na 1ª (0,0 – 0,20m) e na 2ª profundidades do solo (0,20 – 0,40m), respectivamente. A variabilidade dos atributos RP1 e MA1, segundo as classes de Pimentel Gomes e Garcia (2002) foram classificados como muito altos apresentando valores de 44,5 e 42,2%, respectivamente. Dados de CVs muito altos também foram obtidos por Souza et al. (2010a), que trabalhou no intuito de caracterizar a variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico nas profundidades de 0,0-0,2m e 0,2-0,4m, em áreas sob cultivo de cana soca e

Quadro 3- Análise descritiva de atributos da cultura da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente				
			Máximo	Mínimo		Variação (%)	Curtose	Assimetria		
									Pr<w	DF
TCH (t ha ⁻¹)	89,5	90,3	153,0	42,0	20,6	23,0	0,075	0,143	0,386	NO
POP (pl m ⁻²)	6,6	6,6	10,7	2,4	1,37	20,9	0,763	0,047	0,466	NO
ATR (kg t ⁻¹)	136,00	136,65	171,84	90,69	16,18	11,9	0,209	-0,467	0,070	NO
BRI (%)	19,58	19,38	26,22	14,00	2,20	11,3	0,166	0,169	0,875	NO
POL (%)	16,6	16,6	23,2	10,1	2,29	13,7	0,633	-0,395	0,092	NO
PUR (%)	85,5	85,7	92,6	77,2	3,22	3,7	-0,252	-0,444	0,034	TN
FIB (%)	13,6	13,4	18,1	11,1	1,32	9,7	-0,022	-0,482	0,021	TL

^(a) TCH, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB são respectivamente a tonelada de colmos por hectare, população de plantas por metro quadrado, açúcares totais recuperáveis, percentual de sólidos solúveis totais, percentual de sacarose, pureza e percentual de fibra; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, TN e TL respectivamente do tipo normal, tendendo à normal e tendendo à lognormal

Quadro 4- Análise descritiva de atributos físico-químicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente				
			Máximo	Mínimo		Variação (%)	Curtose	Assimetria		
									Pr<w	DF
CO1 (t ha ⁻¹)	16,1	16,2	20,8	12,8	1,88	11,2	-0,601	0,292	10 ⁻⁴	IN
EC1 (t ha ⁻¹)	26,1	25,9	35,6	15,0	3,23	12,9	0,687	-0,047	0,811	NO
DS1 (kg dm ⁻³)	1,564	1,575	1,763	1,305	0,09	5,9	-0,622	-0,239	0,040	TN
RP1 (MPa)	1,196	1,141	2,924	0,273	0,53	44,5	0,021	-0,179	0,503	LN
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,089	0,089	0,138	0,041	0,02	21,6	-0,354	0,056	0,906	NO
UV1 (m ³ m ⁻³)	0,139	0,136	0,214	0,054	0,03	23,2	-0,295	0,003	0,507	NO
MA1 (m ³ m ⁻³)	0,086	0,080	0,180	0,015	0,03	42,2	-0,247	0,501	0,011	IN
MI1 (m ³ m ⁻³)	0,270	0,271	0,315	0,206	0,01	7,3	0,340	-0,411	0,394	NO
PT1 (m ³ m ⁻³)	0,357	0,359	0,438	0,262	0,03	8,6	0,564	-0,258	0,262	NO

^(a) CO1, EC1, DS1, RP1, UG1, UV1, MA1, MI1 e PT1 são respectivamente o carbono orgânico, estoque de carbono, densidade do solo, resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo analisados na camada 0-0,20 m; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, LN, TN e IN respectivamente do tipo normal, lognormal, tendendo à normal e indeterminada

Quadro 5- Análise descritiva de atributos físico-químicos na profundidade de 0,20 – 0,40m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente				
			Máximo	Mínimo		Variação (%)	Curtose	Assimetria		
									Pr<w	DF
CO2 (t ha ⁻¹)	15,2	15,1	22,0	11,6	1,96	12,8	0,985	0,633	10 ⁻⁴	IN
EC2 (t ha ⁻¹)	24,9	24,5	34,9	17,0	3,49	14,0	0,449	0,518	0,510	NO
DS2 (kg dm ⁻³)	1,632	1,619	1,845	1,470	0,07	4,5	-0,277	0,246	0,185	NO
RP2 (MPa)	2,277	2,203	4,172	0,836	0,81	35,7	-0,329	-0,085	0,691	LN
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,088	0,086	0,138	0,030	0,02	23,8	0,039	0,215	0,145	NO
UV2 (m ³ m ⁻³)	0,144	0,140	0,229	0,052	0,03	23,7	0,074	0,243	0,156	NO
MA2 (m ³ m ⁻³)	0,059	0,057	0,119	0,011	0,02	34,9	-0,117	0,455	0,049	NO
MI2 (m ³ m ⁻³)	0,286	0,284	0,367	0,207	0,02	8,0	1,385	0,134	0,063	NO
PT2 (m ³ m ⁻³)	0,346	0,346	0,437	0,257	0,03	9,7	0,703	0,083	0,131	NO

^(a) CO2, EC2, DS2, RP2, UG2, UV2, MA2, MI2 e PT2 são respectivamente o carbono orgânico, estoque de carbono, densidade do solo, resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo analisados na camada 0,20-0,40 m; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, LN e IN respectivamente do tipo normal, lognormal e indeterminada

obtiveram CVs de 44,16% para a RP no primeiro nível e 35,33% para a MA no mesmo nível.

No segundo nível do solo, a RP2 e a MA2, os CVs também foram classificados como muito altos, 35,7 e 34,9%, respectivamente (Quadro 5). Segundo dados obtidos por Souza et al. (2010a) para esses mesmos atributos e na mesma profundidade foram obtidos CVs de 36,22% para a RP e 38,78% para a MA.

Para os CVs da UG1 e da UV1, os valores também foram altos de 21,6 e 23,2% de variabilidade (Quadro 4), respectivamente. E para a segunda camada do solo, UG2 e UV2, a classificação dos CVs foi também alta, com 23,8 e 23,7%, respectivamente (Quadro 5).

Para os atributos físico-químico do solo na primeira camada, CO1 e EC1, observou-se valores de CVs médios, 11,2 e 12,9%, respectivamente (Quadro 4). Para CO2 e EC2, a classe também foi média, 12,8 e 14,0%, respectivamente (Quadro 5). Chaves e Farias (2008) que trabalharam com o objetivo de estimar o estoque de carbono em um Argissolo sob cultivo da cana-de-açúcar obtiveram CVs maiores que 50% para três profundidades (0-30 cm, 30-63 cm, 63-100 cm).

Já para DS1, MI1 e PT1, observou-se valores de CVs baixos, 5,9, 7,3 e 8,6% respectivamente (Quadro 4). Para DS2, MI2 e PT2, a classificação também foi baixa, 4,5, 8,0 e 9,7%, respectivamente (Quadro 5). Para a DS na camada de 0-20 cm de profundidade, Souza et al. (2010a), verificaram também valores de baixo CV (9,22%) e para a camada de 20-40 cm de profundidade do solo CV de 9,76% que é classificado como baixo corroborando com a atual pesquisa.

4.1.2 Distribuição de frequência dos atributos

4.1.2.1 Atributos da planta

Quando uma variável estatística qualquer possuir distribuição de frequência do tipo normal, a medida de tendência central mais adequada para representá-la deve ser a média. Em equivalência, caso a distribuição seja lognormal a medida mais adequada será a mediana. Os atributos da planta estudados, a PUR e a FIB apresentaram distribuição de frequência tipo tendendo a normal e tendendo a lognormal, com valores do teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), de 0,034 a 0,021, respectivamente, a 5% de probabilidade e assim esses atributos foram representados pelo valor da sua mediana.

Já para os atributos TCH, POP, ATR, BRI e POL apresentaram uma distribuição normal logo na primeira análise descritiva (dados brutos, sem retirada dos outliers), com valores de

probabilidade variando de 0,070 a 0,875 para o teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965). Esse tipo de distribuição para atributos de origem biológica é comum, assim esses atributos podem ser representados por seus valores médios (quadro 3).

4.1.2.2 Atributos do solo

No Quadro 4 estão apresentados os atributos do solo na camada superficial (0,0 – 0,20m) onde pode ser observada que a distribuição de frequência foi indeterminada para o CO1 e a MA1, pois apresentaram baixíssimos valores de probabilidade ($p_w \leq 0,001$) no teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965). Para, a DS1 e a RP1, a distribuição de frequência foi tendendo a normal e lognormal, respectivamente, com valores de probabilidade de 0,040 e 0,503, para o teste de normalidade a 5%.

Para os atributos EC1, UG1, UV1, MI1 e PT1, esses apresentaram distribuição de frequência normal após a retirada de aproximadamente 4% dos outliers e substituição pela média obtida do valor dos seus circunvizinhos. Os valores de probabilidade para esses atributos variaram de 0,262 a 0,906 no teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), portanto esses atributos podem ser representados pela sua média.

No Quadro 5 estão contidos os atributos do solo da camada de 0,20 – 0,40m onde pode ser observada a distribuição de frequência indeterminada para o atributo CO2. Para o atributo RP2 a distribuição de frequência foi lognormal com valor da probabilidade de 0,691 no teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965) a 5%. E para todos os outros atributos (EC2, DS2, UG2, UV2, MA2, MI2 e PT2), a distribuição de frequência observada foi normal com valores de probabilidade pelo teste de normalidade a 5% variando de 0,049 a 0,510, podendo esses atributos serem representados pelo valor de suas médias.

4.1.3 Valores médios dos atributos estudados

4.1.3.1 Atributos da planta

No Quadro 3 pode-se observar que a média da produtividade da cultura (TCH) foi 89,5 t ha⁻¹ valor acima da média nacional (77,8 t ha⁻¹), compatível com a média da região sudeste (82,0 t ha⁻¹) e do estado de São Paulo (82,5 t ha⁻¹) (CONAB, 2011). Para Rapassi et al. (2009), que estimaram o custo de produção para a cana-de-açúcar na região oeste do estado de São Paulo consideraram como base para uma produtividade de 85 t ha⁻¹ para o 3º corte da cultura,

valor compatível também com o dado obtido na pesquisa, no entanto, tratando-se de uma cana que estava a 24 meses no campo, a produtividade obtida ($89,2 \text{ t ha}^{-1}$) foi a baixo da esperada como relatado por Braga (2011) provavelmente pelo mesmo motivo obtido na pesquisa atual, baixo valor de população de plantas influenciou negativamente na produtividade de colmos.

A população de plantas (POP) expressa em plantas por m^2 apresentou um média de 6,6 plantas por metro quadrado, ou seja, um estande de 9,9 plantas por metro, considerando o espaçamento de 1,5m, valor abaixo do obtido por Braga (2011) que em um Argissolo Vermelho eutrófico obteve uma população de 10,5 plantas por metro quadrado e considerou que o ideal, para uma máxima produtividade sob as condições que foi realizada a pesquisa, seria de 14 plantas por metro quadrado equivalente a 21,9 plantas por metro. Valores baixos de população de plantas permitem inferir que a baixa produtividade obtida na pesquisa atual foi em consequência do baixo valor de POP. Para Silva (2008) a recomendação para um bom estande de plantas de cana-de-açúcar é de 10 a 12 plantas por metro.

Para o atributo tecnológico, ATR observa-se um valor médio de $136,0 \text{ kg t}^{-1}$ valor considerado acima da referência ($121,97 \text{ t ha}^{-1}$) pelo Consecana (2006) e um pouco abaixo do padrão médio verificado por Rapassi et al. (2009) na região Oeste paulista no ano de 2007 ($144,56 \text{ t ha}^{-1}$). Para outros atributos tecnológicos da cana-de-açúcar observa-se que a média do BRI ficou em 19,58%, valor que encontra-se na faixa recomendada por Fernandes (2000) (18-25%) e semelhante ao obtido por Rapassi et al. (2009) que observaram uma média de 21,88% de brix.

A média da POL foi de 16,6%, 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%. Os valores obtidos na caracterização dos açúcares do caldo do cultivo em questão, se tratando de uma cana bisada, em que há a possibilidade de inversão e utilização dos açúcares em função da retomada de crescimento vegetativo na ocasião da disponibilidade de água, estão de acordo e acima dos dados citados na literatura provavelmente por se tratar de uma variedade rica em teores de açúcar.

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 85,7% para o atributo PUR. Convém comentar que o manuseio cuidadoso das amostras e o não uso de garras carregadeiras pode ter influenciado nos bons resultados desse atributo, valor acima do obtido por Rapassi et al. (2009) (81,4%).

Para FIB a mediana apresentou um valor de 13,6%, 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. Esse valor também foi semelhante ao obtido na pesquisa de Rapassi et al. (2009), que observaram uma média de 14,5% de fibras na cana-de-açúcar entre as usinas da região do Oeste paulista em 2007. Deve salientar também que os valores obtidos na presente pesquisa estão de acordo com padrões da UNICA (2009) para a produção de açúcar e álcool.

4.1.3.2 Atributos do solo

No Quadro 4 constam os valores para os atributos do solo na camada de 0,0 – 0,20m e no Quadro 5, os valores para a camada de 0,20 – 0,40m. A mediana do atributo CO1 foi de 16,1 t ha⁻¹ e para CO2 de 15,1 t ha⁻¹. Esses valores de carbono orgânico, que representam a matéria orgânica do solo, com valores de 14,5 g dm⁻³ e 13,1 g dm⁻³, respectivamente, conforme Raij et al. (1987) estão classificados como baixo, ou seja, os teores desse colóide do solo estão muito baixos provavelmente por se tratar de um solo arenoso em sistema de colheita de cana queimada.

Frazão et al. (2010) quantificaram estoques de carbono (EC) em um Neossolo Quartzarênico em diferentes usos agrícolas no cerrado brasileiro e observaram variações de 15,8 a 28,1 t ha⁻¹ na profundidade de 0 a 30 cm do solo. Esses autores citam que são valores encontrados na literatura para solos arenosos em diferentes coberturas vegetais e comentam que houve incremento no EC com a retirada da mata nativa (cerrado) e incorporação do carbono com o uso do arado, para uma densidade do solo (DS) de 1,3 g dm⁻³.

Já Paula e Vale (2007) que realizaram um estudo quantitativo do EC em diferentes solos constataram que Argissolos franco argilo-arenosos com DS variando entre 1,08 a 1,23 g cm⁻³ o EC variou entre 11,8 a 37,85 t ha⁻¹ e concluíram que dentre os solos estudados (Argissolos, Latossolos e Espodossolos) foi o que continha os maiores teores de carbono. Chaves e Farias (2008) que estudaram o estoque de carbono em um Argissolo Acinzentado distrófico, cultivado ao longo dos anos com cana-de-açúcar, em sistema convencional obtiveram uma média de 33,82 t ha⁻¹ de estoque de carbono para uma profundidade de 0-30 cm do solo e comentaram ser um valor médio para as condições de cana queimada sob solo arenoso. Urquiaga et al. (2010) comentaram sobre um valor de referência para esse atributo quando em solo sob vegetação nativa, de cerca de 90 t ha⁻¹ de estoque de carbono aproximadamente.

Diante do exposto, no atual trabalho o EC1 com uma média de 26,1 t ha⁻¹ (Quadro 4) e o EC2 com uma média de 24,9 t ha⁻¹ (Quadro 5), considerando que EC é diretamente proporcional ao teor de CO e a DS. A DS obtida foi maior que a verificada por Frazão et al.

(2010), (Quadros 4 e 5), pois comparando-se com os autores citados. Portanto, infere-se que o EC é fortemente influenciado pela textura do solo e pelo manejo agrícola utilizado, assim de acordo com valores constatados por Frazão et al. (2010) para solos arenosos, o EC no solo de estudo está baixo e abaixo do valor padrão proposto por Urquiaga et al. (2010).

Mais uma explicação, além da textura arenosa no solo de estudo, seria o manejo do canavial para o momento da colheita, em que a queima contínua do material vegetal (palhada) reduz bruscamente o CO e aliado ao tráfego de máquinas no local há uma tendência em aumentar os valores de DS. Ressaltando que a mediana da DS do solo na camada superficial foi $1,575 \text{ kg dm}^{-3}$ (Quadro 4) e a DS2 com uma média de $1,632 \text{ kg dm}^{-3}$ (Quadro 5), pode-se inferir os valores ficaram abaixo dos valores limitantes ao desenvolvimento das plantas, para solos arenosos (BOWEN, 1981).

Para os valores de UG e UV observa-se que a média da UG1 foi de $0,089 \text{ kg kg}^{-1}$, e a UV1 apresentou uma média de $0,139 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Considerando a média da MI1 de $0,270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ pode-se inferir que no momento da coleta de dados da resistência do solo à penetração a umidade volumétrica estava em 51,4% dos microporos. Para a segunda camada do solo (0,0 – 0,20m), a média da UG2 que ficou em $0,088 \text{ kg kg}^{-1}$, e a UV2 de $0,144 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ considerando que a média da MI2 foi de $0,286 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ pode-se inferir que no momento da coleta de dados da resistência do solo à penetração, a umidade volumétrica estava em 50,3% do microporos preenchida de água. Assim, para os dois níveis do solo estudados, o valor da microporosidade preenchida de água estava abaixo da recomendada para a coleta da resistência do solo à penetração (66,6% da microporosidade do solo), no entanto, não muito distante do ideal para as coletas (SOUZA et al. 2006).

Segundo classificação da resistência do solo à penetração de Arshad et al. (1996), os valores encontrados na pesquisa atual, mediana da RP1 de 1,141 MPa (Quadro 4), pode ser considerada moderada e a mediana da RP2 de 2,203 MPa, considerada alta, ou seja, de alguma forma houve algum impedimento no desenvolvimento pleno da cultura. Apesar de segundo Freddi et al. (2006), que trabalhou num Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa no cerrado brasileiro avaliando a RP e 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, a umidade abaixo da ideal para a coleta dos dados e os valores de RP de moderado a alto, com incremento natural em profundidade, esses podem ser considerados não restritivos ao desenvolvimento da cultura da cana soca em solo arenoso.

No âmbito da porosidade na camada superficial do solo, observa-se uma média de 35,7% de PT1, sendo 8,6% de MA1 e 27% de MI1 (Quadro 4). E para a camada superficial valores de porosidade com média de 34,6% de PT2, sendo 5,9% de MA2 e 28,6% de MI2 (Quadro 5). Portanto, para a porosidade total os valores estão adequados para solos arenosos quando comparados com padrões relatados por Reichardt e Timm (2004). Já quando compara-se as proporções guardadas nos diferentes tipos de poros (MA e MI) notar-se que há uma alteração nos valores ideais, que pode ser prejudicial para o desenvolvimento da cultura por falta de aeração, em vista dos valores recomendados de macroporosidade em torno de 10%, valor mínimo recomendado por Kiehl (1979), indicando que há alguma compactação na área de estudo.

Roque et al. (2008), avaliando o efeito do controle de tráfego agrícola na compactação do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar no sistema de colheita mecanizada e de cana crua, em um Latossolo Vermelho distrófico, obtiveram valores de MA para 3 profundidades (0-10,10-20,20-30 cm) compatíveis com a obtida nesse trabalho.

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 6, 7 e 8 estão apresentadas as matrizes de correlação linear de Pearson entre os atributos estudados da cultura da cana-de-açúcar (TCH, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB) e os atributos físico-químicos do solo estudado (CO, EC, DS, RP, UG, UV, MA, MI e PT), nas camadas respectivas de 0,0 – 0,20 e 0,20 – 0,40m.

4.2.1.1.1 Atributos da planta versus atributos da planta

No Quadro 6 constata-se a correlação entre a TCH e a POP com um coeficiente de correlação de 0,388**, altamente significativo e positivo, levando a inferir que o manejo adequado da população de plantas contribui para o aumento da produtividade da cultura de cana-de-açúcar, fato corroborado por pesquisa realizada por Braga (2011) que obteve um coeficiente de correlação linear de Pearson de 0,43** para a correlação entre os mesmos atributos.

Quadro 6- Matriz de correlação dos atributos da cultura da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)					
	TCH	POP	ATR	BRI	POL	PUR
POP	0,388**					
ATR	-0,028	-0,178				
BRI	-0,069	-0,143	0,904**			
POL	-0,055	-0,184*	0,984**	0,918**		
PUR	-0,028	-0,153	0,456**	0,238**	0,458**	
FIB	-0,169	-0,079	0,217*	0,468**	0,374**	0,029

^(a) Vide Quadro 3; ^(b) ** significativo a 1%, * significativo a 5%.

Quadro 7- Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

Atri- bu- tos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)														
	TCH	POP	ATR	BRI	POL	PUR	FIB	CO1	EC1	DS1	RP1	UG1	UV1	MA1	MI1
CO1	0,295**	0,173	0,049	0,003	0,049	0,106	0,000								
EC1	0,295**	0,161	-0,038	-0,057	-0,046	-0,035	-0,057	0,828**							
DS1	0,111	0,055	-0,137	-0,101	-0,161	-0,242**	-0,135	-0,177	0,301**						
RP1	-0,023	0,090	0,027	0,041	0,003	-0,131	-0,124	0,036	0,081	0,035					
UG1	-0,106	0,002	-0,219*	-0,241**	-0,217*	-0,014	-0,062	-0,273**	-0,178	0,058	-0,101				
UV1	-0,086	0,001	-0,234*	-0,249**	-0,237**	-0,073	-0,088	-0,290**	-0,041	0,305**	-0,067	0,957**			
MA1	-0,016	-0,057	0,021	-0,042	0,036	0,201*	0,018	0,095	-0,227*	-0,745**	-0,004	-0,012	-0,185*		
MI1	-0,083	-0,033	0,125	0,137	0,136	0,042	0,105	-0,002	0,079	0,160	0,039	0,078	0,112	-0,492**	
PT1	-0,039	-0,114	0,045	-0,028	0,051	0,186*	-0,024	0,184*	-0,203*	-0,739**	-0,029	-0,127	-0,324**	0,763**	-0,138

^(a) Vide Quadros 3 e 4; ^(b) ** significativo a 1%; * significativo a 5%.

Quadro 8- Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos na profundidade de 0,20 – 0,40m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

Atri- bu- tos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)														
	TCH	POP	ATR	BRI	POL	PUR	FIB	CO2	EC2	DS2	RP2	UG2	UV2	MA2	MI2
CO2	0,221*	0,039	0,008	0,044	0,003	-0,072	0,012								
EC2	0,221*	0,039	-0,036	0,038	-0,045	-0,133	0,004	0,946**							
DS2	0,057	0,014	-0,127	0,002	-0,144	-0,218*	-0,022	0,095	0,410**						
RP2	-0,035	0,054	0,132	0,134	0,116	0,016	-0,030	0,074	0,071	0,017					
UG2	-0,170	0,002	-0,137	-0,163	-0,125	0,048	-0,003	-0,332*	-0,357**	-0,162	-0,203*				
UV2	-0,156	0,010	-0,159	-0,160	-0,151	0,011	-0,009	-0,320*	-0,289**	0,019	-0,192*	0,982**			
MA2	0,039	-0,043	-0,024	-0,102	0,002	0,081	0,044	-0,104	-0,249**	-0,490**	-0,059	0,010	-0,085		
MI2	-0,140	0,049	-0,004	-0,071	0,004	0,086	-0,001	-0,231*	-0,372**	-0,498**	-0,053	0,401**	0,319*	0,036	
PT2	-0,083	0,017	-0,106	-0,120	-0,060	-0,049	0,165	-0,282**	-0,440**	-0,561**	-0,030	0,343**	0,244*	0,511**	0,518**

^(a) Vide Quadros 3 e 5; ^(b) ** significativo a 1%; * significativo a 5%.

Para a correlação POP x POL ($r = -0,184^*$) (Quadro 6) houve significância à 5% de probabilidade, com uma relação negativa. Para outras correlações significativas entre os atributos tecnológicos houve significâncias positivas, no entanto, essas se deveram a interrelação direta entre as variáveis nos cálculos para suas obtenções.

4.2.1.1.2 Atributos da planta versus atributos do solo na profundidade de 0,0 – 0,20m

No Quadro 7 constam as correlações entre a TCH, com CO1 e EC1, com mesmo coeficiente de correlação ($r = 0,295^{**}$), altamente significativos e positivos.

Os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar (ATR, BRI e POL) firmaram correlações significativas inversas com a UG1 e a UV1, sendo: ATR x UG1 ($r = -0,219^*$), ATR x UV1 ($r = -0,234^*$), BRI x UG1 ($r = -0,241^{**}$), BRI x UV1 ($r = -0,249^{**}$), POL x UG1 ($r = -0,217^*$) e POL x UV1 ($r = -0,237^{**}$) (Quadro 7). Os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar firmaram correlações negativas com a umidade do solo por tanto como a planta em questão estava bisada houve uma retomada do crescimento vegetativo no momento em que estava madura. Com a disponibilidade de água no solo, responsável pela concentração e transporte de nutrientes do solo para a raiz caracterizando o efeito negativo da presença da água nos atributos, ou seja, água presente no solo acarretou no efeito diluição e inversão da sacarose prejudicando a maturação da cana soca.

O atributo PUR firmou correlação altamente significativa e inversa com a DS1 ($r = -0,242^{**}$) e correlação significativa e direta com o atributo MA1 ($r = 0,201^*$) e com PT1 ($r = 0,186^*$) (Quadro 7).

4.2.1.1.3 Atributos da planta versus atributos do solo na profundidade de 0,20 – 0,40m

No Quadro 8 verifica-se novamente a correlação positiva e significativa entre TCH com o CO2 e o EC2, apresentando um coeficiente de correlação de $0,221^*$. Já para os atributos tecnológicos somente a PUR se correlacionou significativa e inversamente com a DS2 ($r = -0,218^*$).

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 para as relações entre TCH x POP ($r = 0,393^{**}$) (Figura 6a) e POL x POP ($r = -0,194^*$) (Figura 6b).

No âmbito das regressões entre os atributos da planta *versus* atributos do solo na camada superficial do solo foram verificadas relações: potencial para TCH x CO1($r = 0,304^{**}$) (Figura 7a), exponencial para TCH x EC1($r = 0,298^{**}$) (Figura 7b) e quadráticas para ATR x UG1 ($r^2 = 0,124^{**}$) (Figura 7c), BRI x UG1 ($r^2 = 0,146^{**}$) (figura 8a), BRI x UV1 ($r^2 = 0,123^{**}$) (Figura 8b), POL x UG1 ($r^2 = 0,137^{**}$) (Figura 8c), POL x UV1 ($r^2 = 0,128^{**}$) (Figura 8d); linear para PUR x DS1($r = -0,283^{**}$) (Figura 9a), potencial para PUR x MA1 ($r = 0,208^*$) (figura 9b) e exponencial para PUR x PT1 ($r = 0,280^{**}$) (Figura 9b).

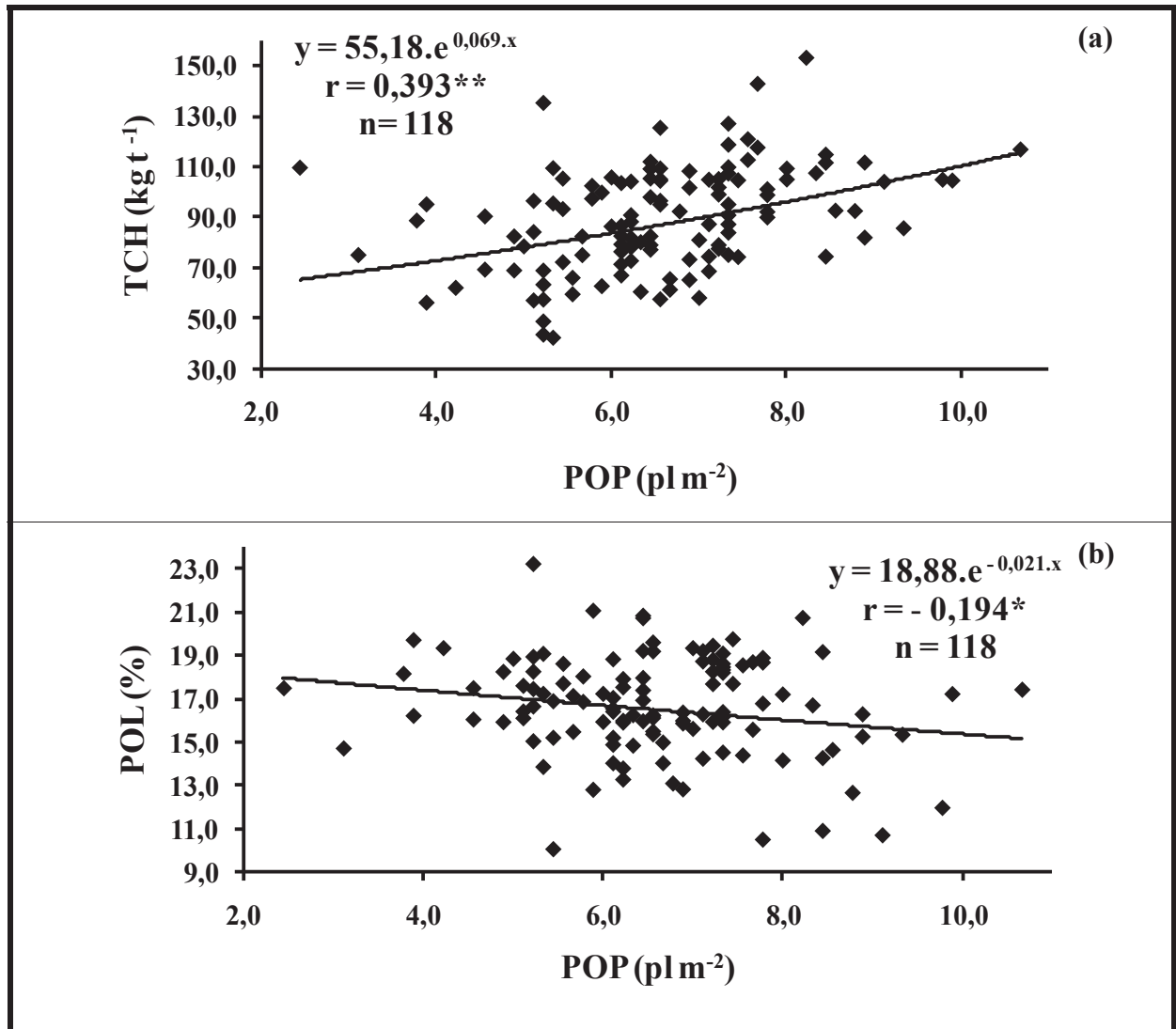
No âmbito das regressões entre os atributos da planta *versus* atributos do solo na camada de solo de 0,20 – 0,40m de profundidade foram verificadas relações: lineares para TCH x CO2 ($r = 0,221^*$) (Figura 10a), TCH x EC2 ($r = 0,287^{**}$) (Figura 10b) e PUR x DS2 ($r = -0,218^*$) (Figura 10c).

Para as regressões entre os atributos do solo na camada superficial foram constatadas relações: lineares e decrescentes para MA1 x DS1 ($r = -0,744^{**}$) (Figura 11a) e PT1 x DS1 ($r = -0,792^{**}$) (Figura 11b). Já na camada de 0,20 – 0,40m de profundidade constatou-se: quadrática para MA2 x DS2 ($r^2 = 0,272^{**}$) (figura 12a), exponencial para MI2 x DS2 ($r = -0,449^{**}$) (Figura 12b) e PT2 x DS2 ($r = -0,575^{**}$) (Figura 12c).

Dentre as regressões modeladas, destacam-se as principais, sendo a da produtividade de colmos de cana-de-açúcar (TCH) em função da população de plantas (POP) (Figura 6a). A da produtividade de colmos de cana-de-açúcar (TCH) em função do carbono orgânico camada superficial do solo (CO1) (Figura 7a) e na camada de 0,20 – 0,40m de profundidade do solo, (CO2) (Figura 10a), a da produtividade de colmos de cana-de-açúcar (TCH) em função do estoque do carbono na camada superficial do solo (EC1) (Figura 7b) e também em superfície, (EC2) (Figura 10b) por sua importância agrônômica. Solos arenosos tem menores teores de matérias orgânica e quando manejados sob cana-de-açúcar queimada seus teores decrescem com o manejo.

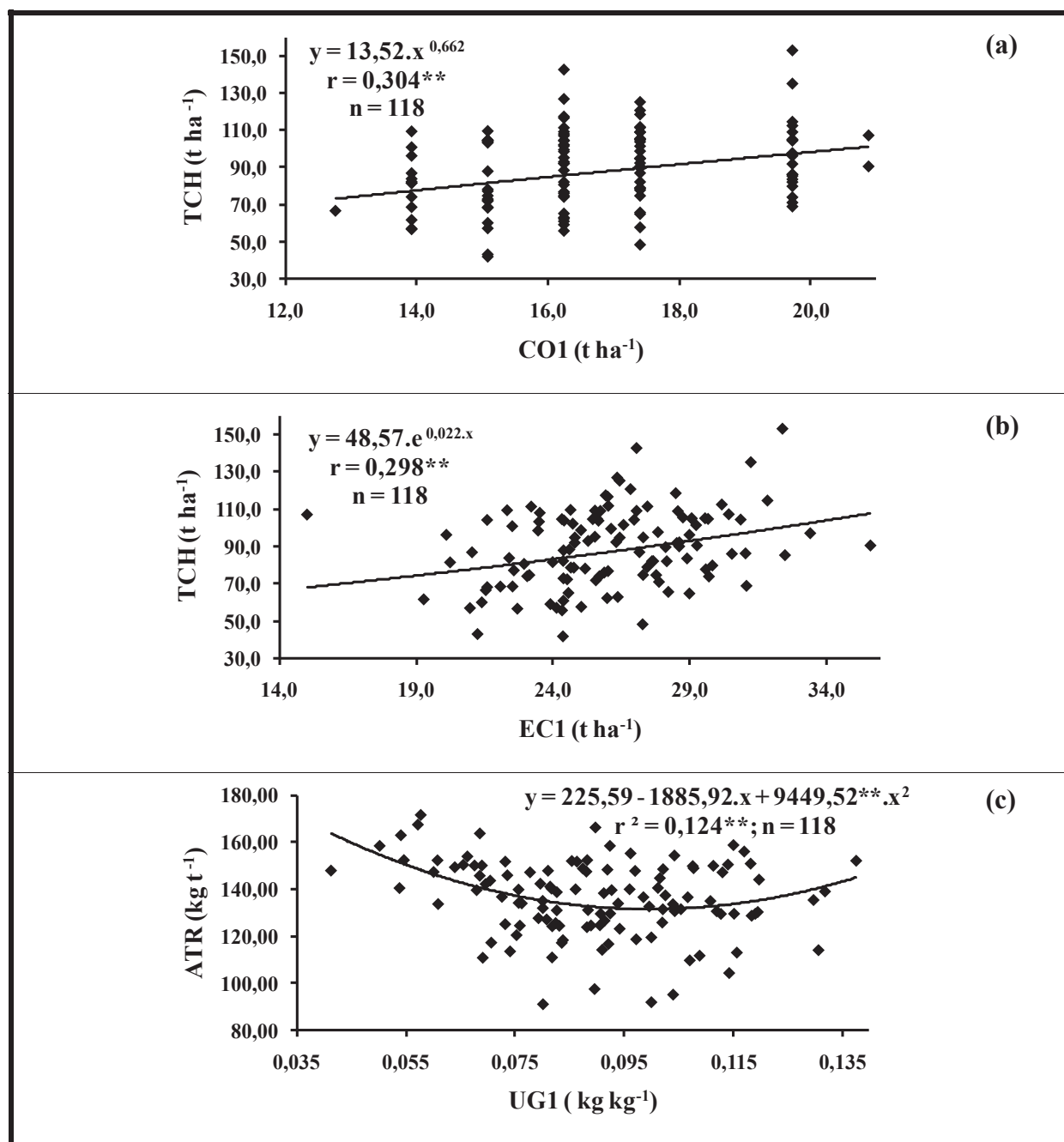
Dessa forma, a relação exponencial entre TCH x POP (Figura 6a), com o modelo matemático: $y = 55,18.e^{0,069.x}$ ($r = 0,393^{**}$), indicou que quando a POP variou entre 2,4 e 10,7 plantas por metro quadrado, e a TCH ficou entre 65,12 e 115,46 t ha⁻¹. Para esse intervalo de

Figura 6- Equações de regressão entre atributos da cultura da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



Gioia (2011)

Figura 7- Equações de regressão entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



Gioia (2011)

Figura 8- Equações de regressão entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

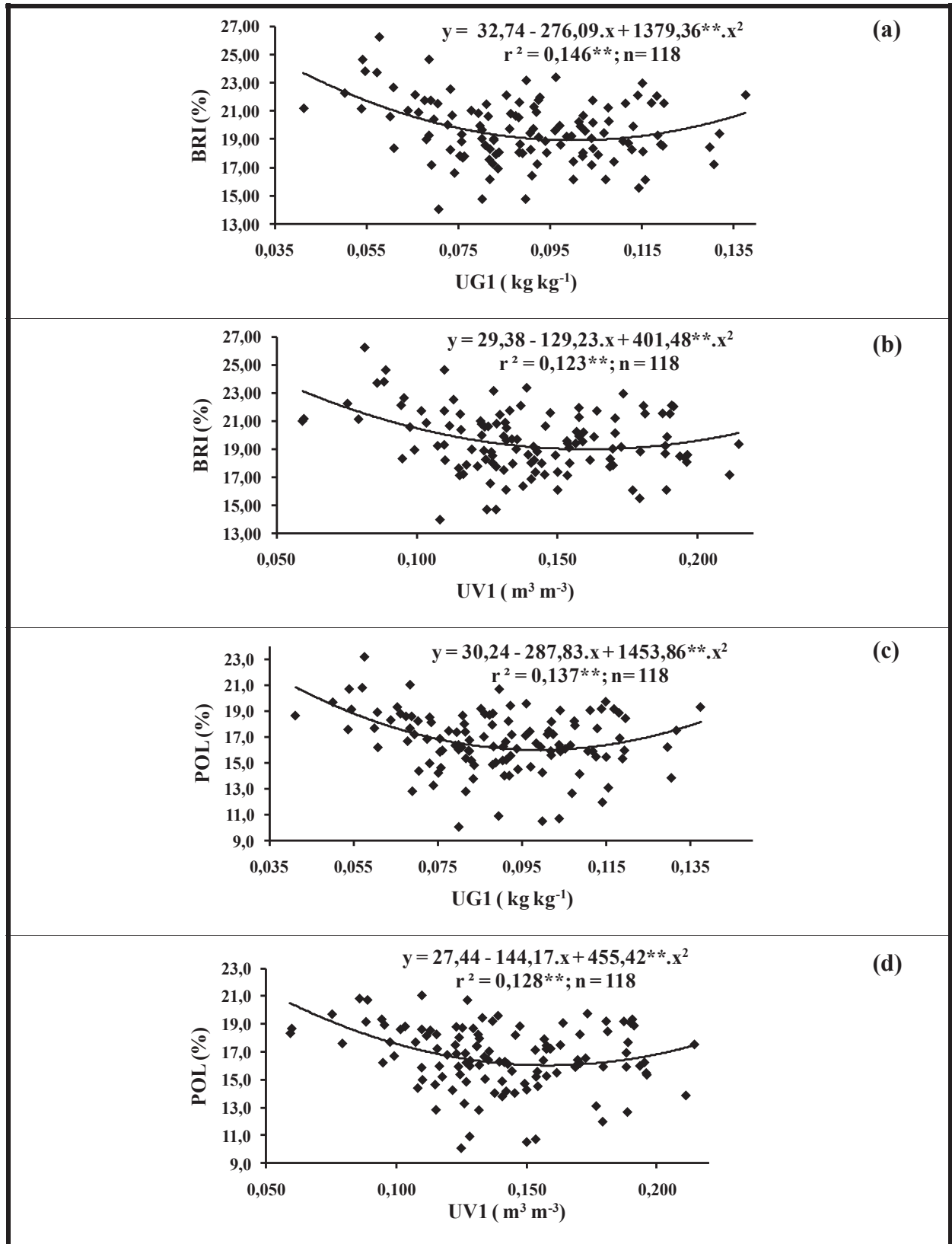
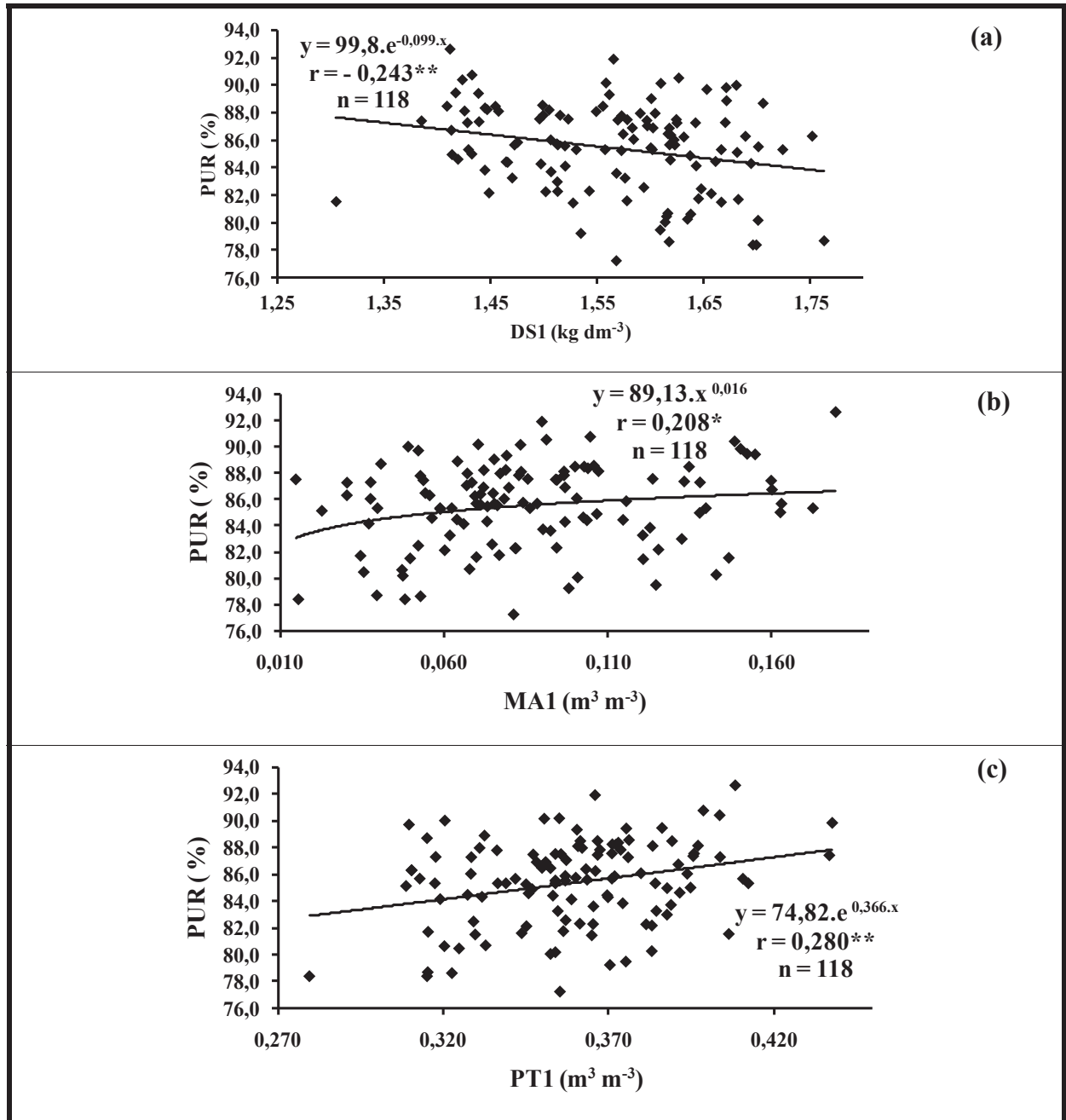
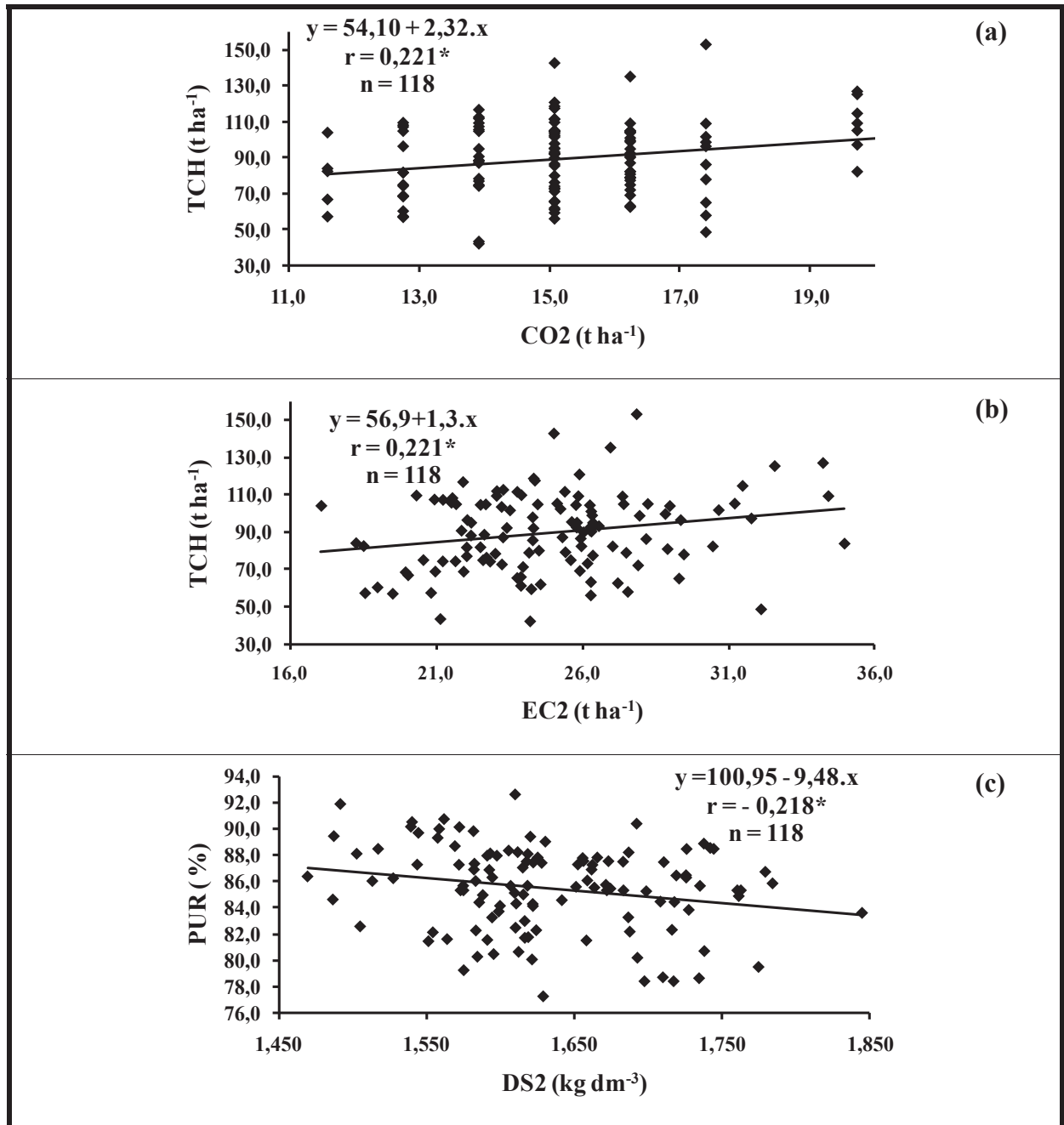


Figura 9- Equações de regressão entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



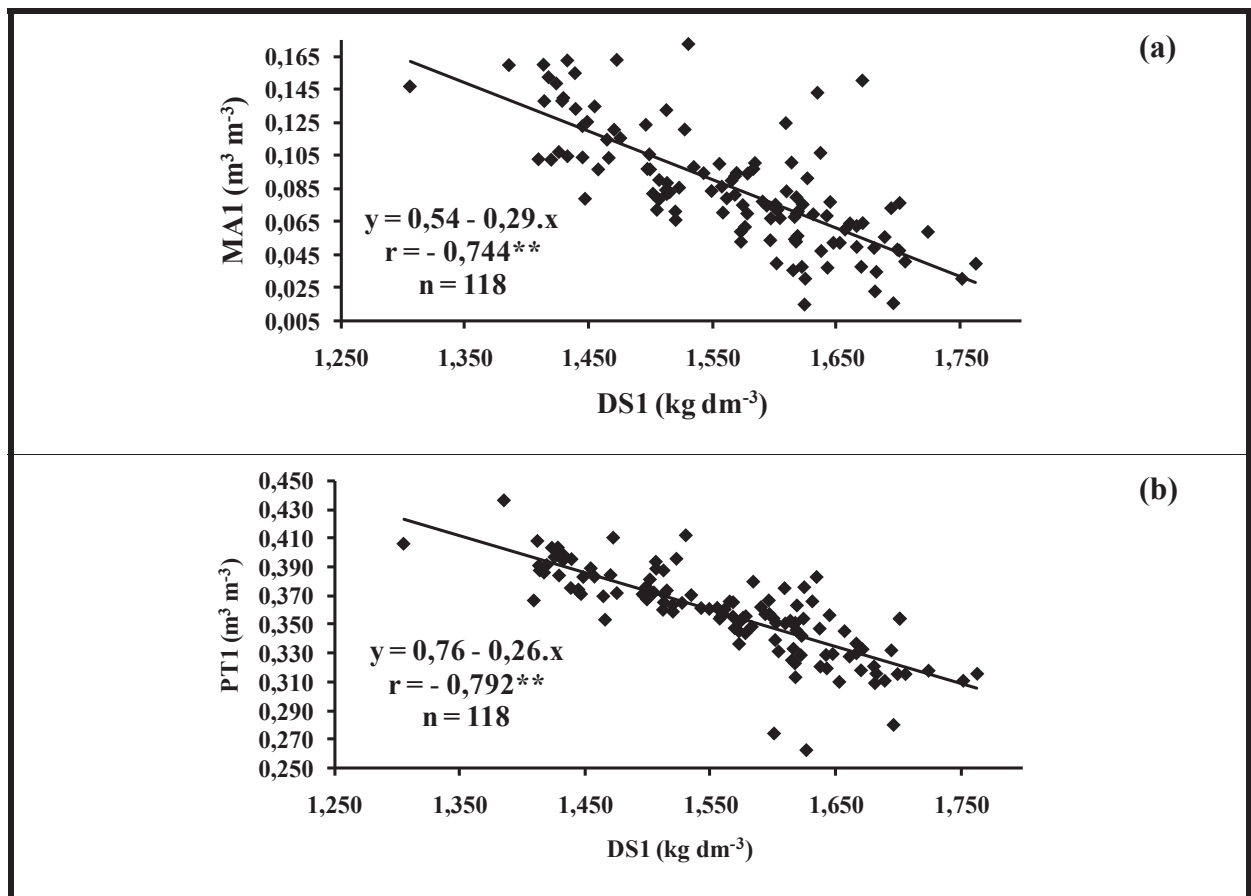
Gioia (2011)

Figura 10- Equações de regressão entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos na profundidade de 0,20 – 0,40m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



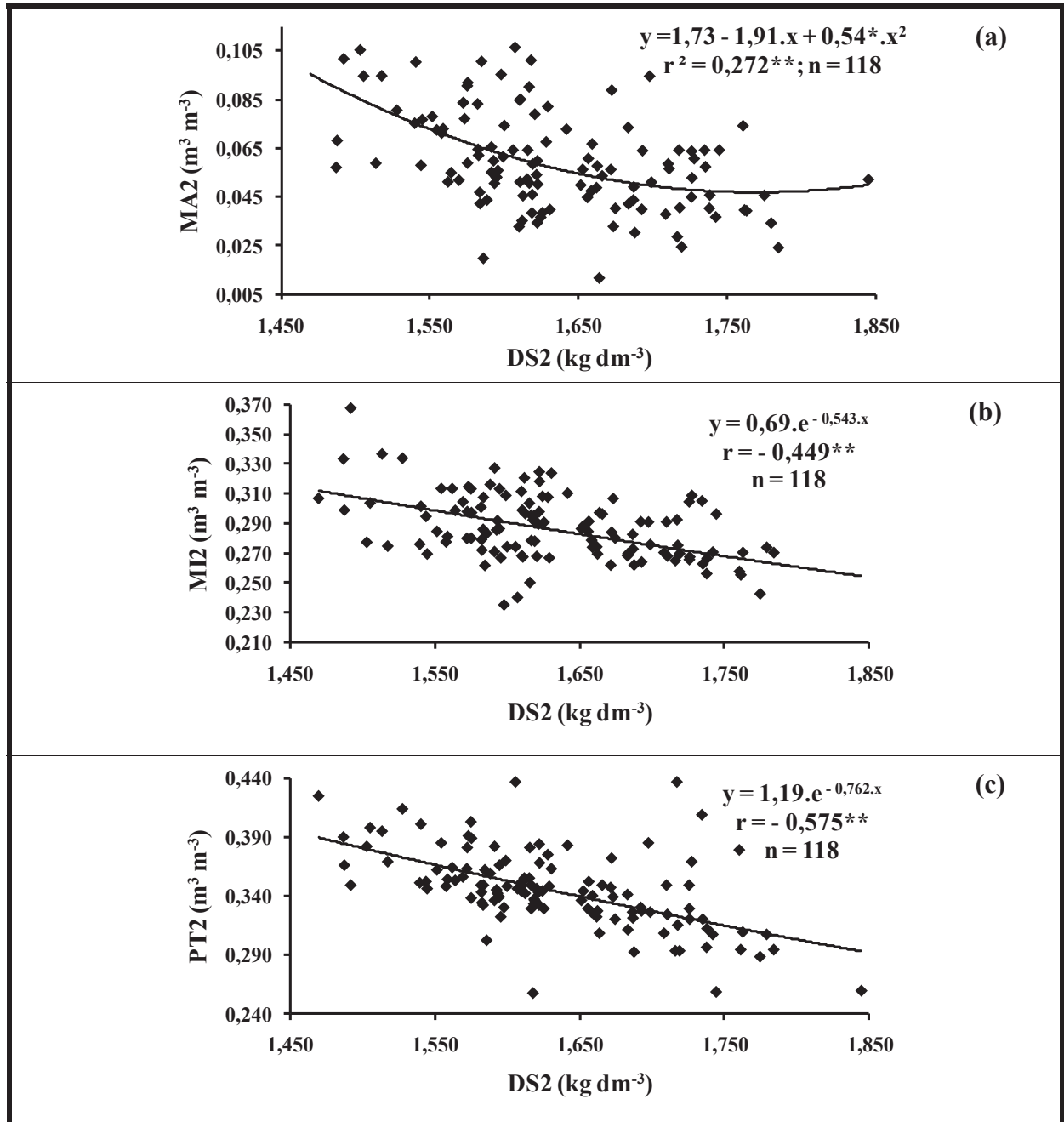
Gioia (2011)

Figura 11- Equações de regressão entre atributos físicos na profundidade de 0,0 – 0,20m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



Gioia (2011)

Figura 12- Equações de regressão entre atributos físicos na profundidade de 0,20 – 0,40m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



Gioia (2011)

dados infere-se que a população ideal, para uma produtividade máxima, nas mesmas condições de solo, espaçamento e planta seria de 10,7 plantas por metro quadrado o que equivale a aproximadamente 16 plantas por metro.

A regressão da TCH em função do CO1 apresentou uma relação potencial com o modelo matemático: $y = 13,52.x^{0,662}$ ($r = 0,304^{**}$) (Figura 7a), indicando que uma variação dos teores de CO1 entre 12,8 e 20,8 t ha⁻¹ haveria um incremento na produtividade de colmos variando entre 73,11 e 100,81 t ha⁻¹. Dessa forma, para esse intervalo de dados, o aumento de CO1 em 8 t ha⁻¹ proporcionaria incremento na produtividade de colmos de 27,7 t ha⁻¹. Para a camada de 0,20 – 0,40m de profundidade do solo pôde-se observar uma relação linear para TCH em função do CO2, com o modelo matemático: $y = 54,10 + 2,32.x$ ($r = 0,221^{*}$) (Figura 10a) indicando que uma variação dos teores de CO2 entre 11,6 e 22,0 t ha⁻¹ implicará em uma variação da TCH entre 81,01 e 105,14 t ha⁻¹, um incremento de 24,13 t ha⁻¹ na produtividade de colmos. Essas relações do carbono orgânico com a produtividade de colmos permite inferir que manejos que visem a aumento desse atributo principalmente em profundidade no solo conduziria ao aumento da produtividade agrícola como já observado por Braga (2011) e Vitti et al. (2008), quando estudaram a influência da matéria orgânica, diretamente relacionada com o carbono orgânico do solo, no incremento na produtividade da cultura da cana-de-açúcar.

A regressão entre TCH em função do EC1 apresentou uma relação exponencial com modelo matemático: $y = 48,57.e^{0,022.x}$ ($r = 0,298^{**}$) (Figura 7b), indicando que uma variação do atributo EC1 entre 15,0 e 35,6 t ha⁻¹ acarretaria em um variação da TCH entre 67,55 e 106,29 t ha⁻¹, que corresponde a uma diferença de 38,74 t ha⁻¹. Já para a regressão entre TCH em função do EC2, apresentou uma relação linear, com um modelo matemático: $y = 46,58 + 1,73.x$ ($r = 0,287^{**}$) (Figura 10b), evidenciando que uma variação do EC2 entre 17,0 e 34,9 t ha⁻¹ implicaria em uma variação da TCH entre 75,99 e 107,00 t ha⁻¹, um incremento de 30,96 t ha⁻¹ de colmos.

4.2.2 Regressão múltipla entre os atributos estudados (*stepwise*)

Na análise da regressão linear múltipla da TCH (variável dependente) em função dos demais atributos de planta e solo estudados (variáveis independentes), revelou que o modelo testado (Equação 15) explicou aproximadamente 23% da variação tonelagem de cana-de-açúcar por hectare (TCH), com um coeficiente de determinação de 0,229***. Os coeficientes das variáveis independentes POP e EC1 foram significativos a 1% (***) e MI2 foi a significativo a 10% (*) conforme análise de variância expressa no Quadro 9:

$$\text{TCH} = 54,856^{**} + 5,372^{***} \cdot \text{POP} + 1,496^{***} \cdot \text{EC1} - 138,750^{*} \cdot \text{MI2} \dots\dots\dots(15)$$

onde: **TCH** = tonelada de colmos de cana-de-açúcar (t ha^{-1}), **POP** = população de plantas por metro quadrado (PL m^2), **EC1** = estoque de carbono na profundidade 1 (t ha^{-1}), e **MI2** = microporosidade do solo na profundidade 2 ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); *** = significativo a 1%, ** = significativo a 5% e * = significativo a 10 %;

As demais influências na TCH ficaram por conta de outros fatores que não entraram no modelo por não serem significativos a 10% de probabilidade. Assim, esta explicação proposta com base na análise de regressão linear múltipla demonstrou a implicação de cada atributo pesquisado na produtividade de colmos de cana-de-açúcar.

Quadro 9- Análise da variância dos resíduos da regressão linear múltipla da TCH em função dos atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

Causa de variação	GL	SQ	QM	F _{calc}	Pr>F
Regressão	3	11 434	3 811,24	11,34	< 0,0001
Resíduo	114	38 304	335,99	-	-
Total	117	49 738	-	-	-

4.3 Análise geoestatística dos atributos estudados

4.3.1 Análise semivariográfica simples

4.3.1.1 Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos

Apesar de a 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 (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). No Quadro 10 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas ajustados para os 25 atributos pesquisados.

Os atributos POP, PUR, RP1, MA1, MI1, PT1, DS2, MA2 e MI2 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) BRI (0,982); 2) EC2 (0,963); 3) ATR (0,904); 4) #TCH (0,882); 5) POL (0,875); 6) UG1 (0,862); 7) RP2 (0,854); 8) FIB (0,830); 9) PT2 (0,790); 10) CO2 (0,777); 11) UG2 (0,769); 12) EC1 (0,750); 13) UVI (0,727); 14) CO1 (0,717); 15) UV2 (0,650) e 16) DS1 (0,304).

Assim, em relação aos primeiros, que tiveram os mais elevados coeficientes de determinação espacial (Quadro 10) observou-se o seguinte: BRI, seu r^2 (0,982) indicou ser o melhor ajuste semivariográfico, apresentando um ADE alto (66,2%), com alcance de 267,7 metros e modelo esférico; EC2, seu r^2 (0,963) foi o segundo melhor ajuste semivariográfico, apresentando um ADE muito alto (96,3%), com alcance de 219,0 metros e modelo exponencial; ATR, seu r^2 (0,904) foi o terceiro melhor ajuste semivariográfico, apresentando um ADE médio (55,6%), com alcance de 243,4 metros e modelo esférico; #TCH, seu r^2 (0,882) foi o quarto melhor ajuste semivariográfico, apresentando um ADE médio (50,0%), com alcance de 274,8 metros e modelo esférico.

Braga (2011) obteve para o atributo BRI também um ajuste semivariográfico ($r^2=0,916$), com ADE médio (50,0%), alcance de 288,3 e modelo exponencial; para o atributo #ATR ($r^2=0,933$), ADE médio (54,4%), alcance de 69,0 metros e modelo gaussiano; para o atributo PRO (que equivale ao TCH) ($r^2=0,854$), ADE médio (59,4%), alcance de 72,0 metros e modelo gaussiano. Convém ressaltar que a malha geoestatística trabalhada por Braga (2011) continha 120 pontos num espaçamento de 42x43 m, bem semelhante a malha da atual pesquisa. 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.

Chaves e Farias (2008) modelaram semivariograma para o atributo estoque de carbono e encontraram para a profundidade de 0-30 cm um modelo esférico, com $r^2 = 0,86$, ADE moderado (50%) segundo classificação de Cambardella et al. (1994). Já para a profundidade de 30-63 cm modelaram um semivariograma do tipo exponencial, com $r^2 = 0,89$, ADE forte

Quadro 10- Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos nas profundidades de 0,0 – 0,20 e 20,0 – 40,0m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP)

Atributos ^(a)	Parâmetros							ADE ^(d)	Classe ^(e)	
	Modelo ^(b)	Efeito Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)				
							%			
<i>γ(h) simples dos atributos da planta</i>										
#TCH (t ha ⁻¹)	exp.	1,74.10 ²	3,48.10 ²	274,8	0,882	1,85.10 ³	50,0	ME		
POP (pl m ⁻²)	e.p.p.	1,95	1,95	-	-	-	-	-		
ATR (kg ha ⁻¹)	esf.	9,38.10	2,11.10 ²	243,4	0,904	1,16.10 ³	55,6	ME		
BRI (%)	esf.	1,76	5,20	267,7	0,982	1,73.10 ⁻¹	66,2	AL		
POL (%)	esf.	2,67	5,42	235,1	0,875	8,42.10	50,8	ME		
PUR (%)	e.p.p.	1,06.10	1,06.10	-	-	-	-	-		
FIB (%)	gau.	1,01	1,37	130,9	0,830	1,58.10 ⁻²	26,3	BA		
<i>γ(h) simples dos atributos da 1ª profundidade</i>										
CO1 (t ha ⁻¹)	esf.	1,59	3,17	312,3	0,717	7,68.10 ⁻¹	50,0	ME		
EC1 (t ha ⁻¹)	esf.	3,69	8,44	357,3	0,750	6,89	56,3	ME		
DS1 (kg dm ⁻³)	esf.	6,35.10 ⁻²	8,90.10 ⁻³	100,0	0,304	2,16.10 ⁻⁶	28,6	BA		
RP1 (MPa)	e.p.p.	2,79.10 ⁻¹	2,79.10 ⁻¹	-	-	-	-	-		
UG1 (kg kg ⁻¹)	gau.	2,41.10 ⁻⁴	3,80.10 ⁻⁴	260,0	0,862	3,51.10 ⁻⁹	36,6	BA		
UV1 (m ³ m ⁻³)	esf.	5,80.10 ⁻⁴	9,04.10 ⁻⁴	160,0	0,727	2,67.10 ⁻⁸	36,1	BA		
MA1 (m ³ m ⁻³)	e.p.p.	1,38.10 ⁻³	1,38.10 ⁻³	-	-	-	-	-		
MI1 (m ³ m ⁻³)	e.p.p.	3,92.10 ⁻⁴	3,92.10 ⁻⁴	-	-	-	-	-		
PT1 (m ³ m ⁻³)	e.p.p.	9,55.10 ⁻⁴	9,55.10 ⁻⁴	-	-	-	-	-		
<i>γ(h) simples dos atributos da 2ª profundidade</i>										
CO2 (t ha ⁻¹)	gau.	2,22	3,60	300,0	0,777	7,78.10 ⁻¹	38,4	BA		
EC2 (t ha ⁻¹)	exp.	4,59	1,12.10	219,0	0,963	8,09.10 ⁻¹	96,3	MA		
DS2 (kg dm ⁻³)	e.p.p.	5,25.10 ⁻³	5,25.10 ⁻³	-	-	-	-	-		
RP2 (MPa)	exp.	9,00.10 ⁻²	6,98.10 ⁻¹	73,2	0,854	1,33.10 ⁻¹	87,1	MA		
UG2 (kg kg ⁻¹)	esf.	2,99.10 ⁻⁴	4,80.10 ⁻⁴	360,0	0,769	9,75.10 ⁻⁹	37,7	BA		
UV2 (m ³ m ⁻³)	esf.	8,00.10 ⁻⁴	1,20.10 ⁻³	270,0	0,650	9,47.10 ⁻⁸	33,3	BA		
MA2 (m ³ m ⁻³)	e.p.p.	4,44.10 ⁻⁴	4,44.10 ⁻⁴	-	-	-	-	-		
MI2 (m ³ m ⁻³)	e.p.p.	5,06.10 ⁻⁴	5,06.10 ⁻⁴	-	-	-	-	-		
PT2 (m ³ m ⁻³)	esf.	7,00. 10 ⁻⁴	1,10.10 ⁻³	293,0	0,790	4,35.10 ⁻⁸	36,5	BA		

^(a) Vide quadro 3,4 e 5 ^(b) gau= gaussiano, exp = exponencial, esf = esférico e e.p.p. = efeito pepita puro; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial; ^(e) MB= muito baixo, BA=baixo, ME= médio, AL= alto e MA= muito alto.

(79%) (CAMBARDELLA et al., 1994), ou seja, da mesma forma que no presente trabalho, uma maior dependência espacial do atributo estoque de carbono em profundidade no solo .

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 10 do presente trabalho. Os autores alegam que não era previsto esse maior alcance na camada subsuperficial que esta menos sujeita ao efeito do preparo do solo e dessa forma é mais homogeneia que a camada superficial. No entanto, declaram que o manejo do solo do local deve ter contribuído para a homogeneização da camada superficial.

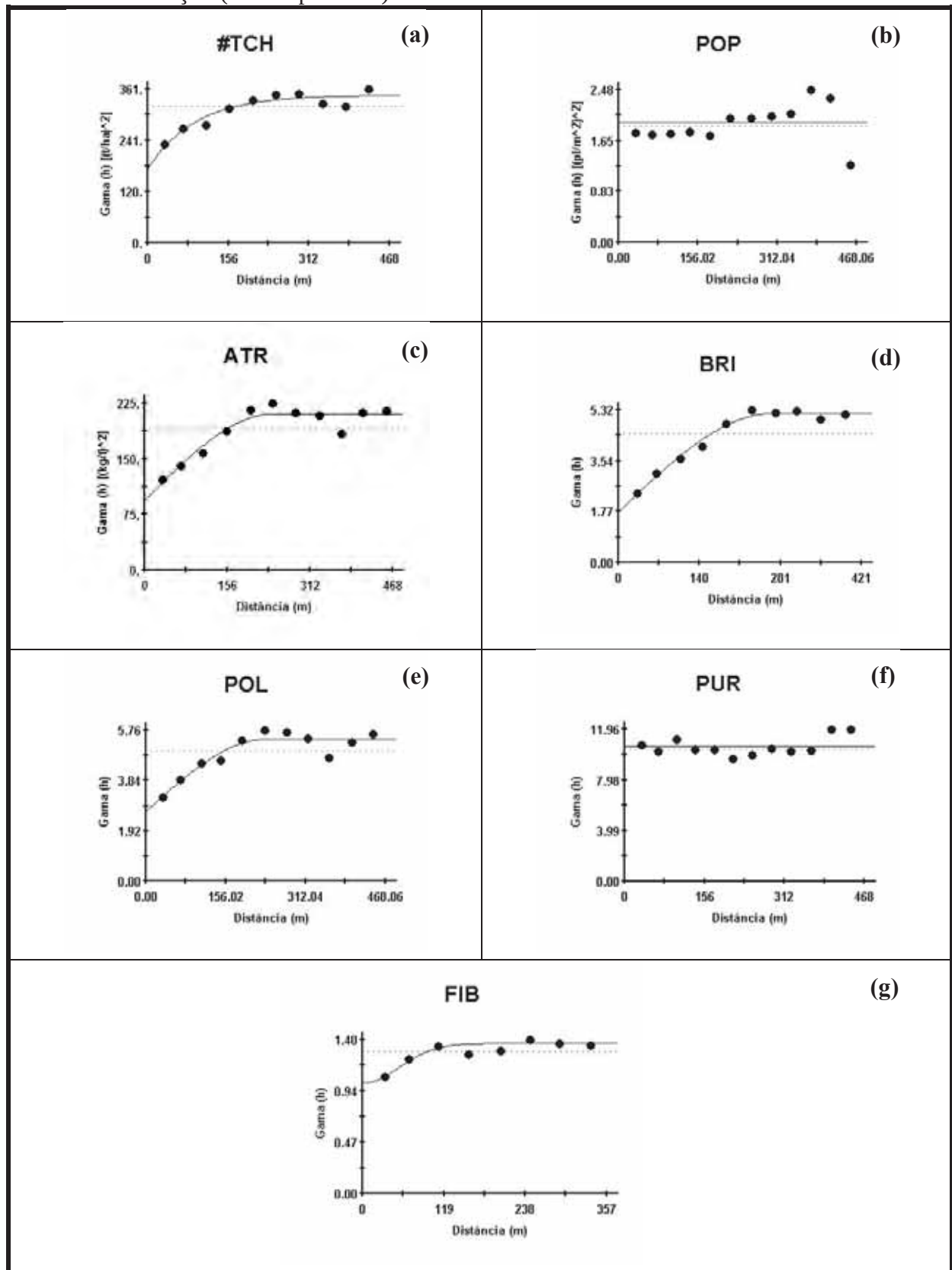
Na Figura 13 podem ser observados os semivariogramas simples dos atributos da cultura da cana-de-açúcar, e nas Figuras 14 e 15 estão apresentados os semivariogramas simples dos atributos estudados do solo. Ainda no Quadro 10, constata-se os valores dos alcances (m) obtidos nos ajustes para os atributos estudados em ordem decrescente: 1) UG2 (360,0); 2) EC1 (357,3); 3) CO1 (312,3); 4) CO2 (300,0); 5) PT2 (293,0); 6) #TCH (274,8); 7) UV2 (270,0); 8) BRI (267,7); 9) UG1 (260,0); 10) ATR (243,4); 11) POL (235,1); 12) EC2 (219,0); 13) UVI (160,0); 14) FIB (130,9); 15) DS1 (100,0) e 16) RP2 (73,2).

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 73,2 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

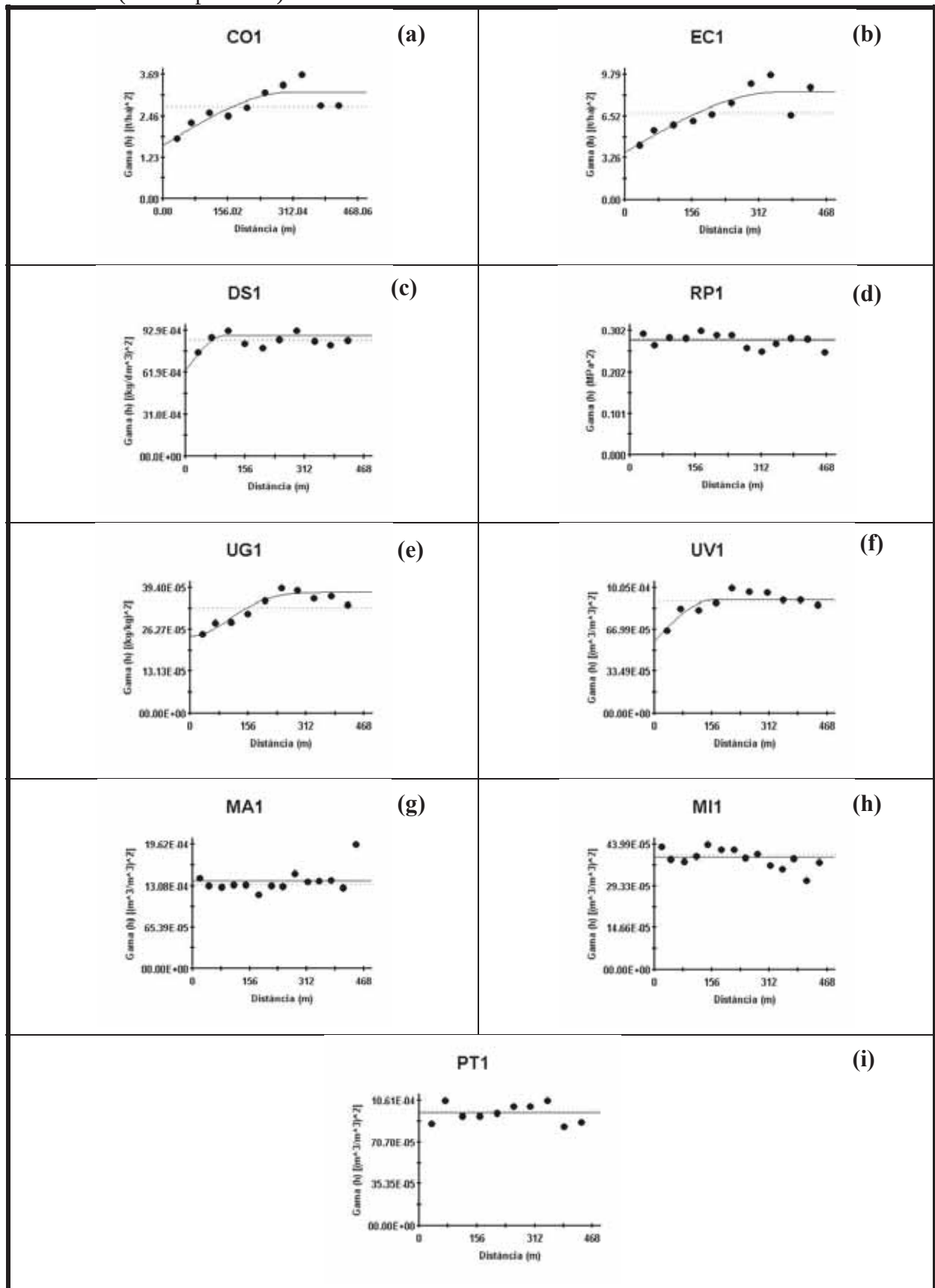
No Quadro 11 estão apresentados os parâmetros da validação cruzada referentes às krigagens para os atributos pesquisados e que apresentaram dependência espacial. Para os ajustes obtidos o coeficiente de correlação (r) decresceu na ordem a seguir: 1) BRI (0,614); 2) ATR (0,546); 3) POL (0,519); 4) CO2 (0,448); 5) EC1 (0,437); 6) UG1 (0,427); 7) CO1

Figura 13- Semivariograma simples dos atributos da cultura da cana-de-açúcar (TCH, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB) em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



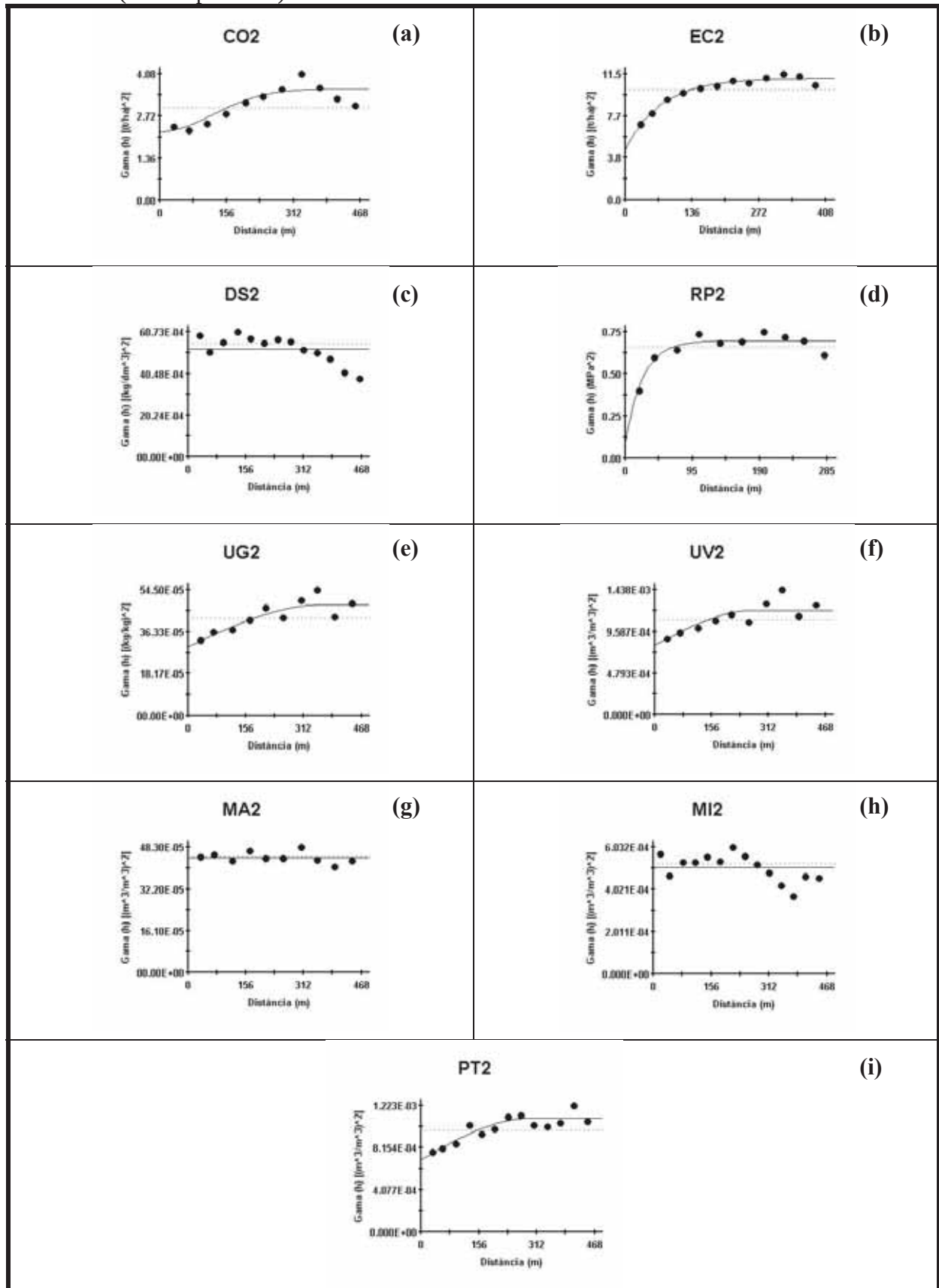
Gioia (2011)

Figura 14- Semivariograma simples dos atributos físico-químicos (CO1, EC1, DS1, RP1, UG1, UV1, MA1, MI1 e PT1) de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



Gioia (2011)

Figura 15- Semivariograma simples dos atributos físico-químicos (CO₂, EC₂, DS₂, RP₂, UG₂, UV₂, MA₂, MI₂ e PT₂) de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



Quadro 11- Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens para os atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos nas profundidades de 0,0 – 0,20 e 20,0 – 40,0m de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

Atributo ^(a)	Coeficiente de correlação (r)	VO = a +b . VE ^(b)	
		a	b
<i>$\gamma(h)$ simples dos atributos da planta</i>			
TCH (t ha ⁻¹)	0,288	-3,78	0,746
ATR (kg ha ⁻¹)	0,546	7,41	0,946
BRI (%)	0,614	3,90.10 ⁻¹	0,980
POL (%)	0,519	4,00.10 ⁻¹	0,976
FIB (%)	0,338	8,60.10 ⁻¹	0,936
<i>$\gamma(h)$ simples dos atributos da 1ª profundidade</i>			
CO1 (t ha ⁻¹)	0,405	1,85	0,891
EC1 (t ha ⁻¹)	0,437	2,87	0,891
DS1 (kg dm ⁻³)	0,130	7,80.10 ⁻¹	0,504
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,427	0,00	0,963
UV1 (m ³ m ⁻³)	0,348	1,00.10 ⁻¹	0,891
<i>$\gamma(h)$ simples dos atributos da 2ª profundidade</i>			
CO2 (t ha ⁻¹)	0,448	1,40	0,908
EC2 (t ha ⁻¹)	0,390	6,34	0,744
RP2 (MPa)	0,313	5,30.10 ⁻¹	0,771
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,378	0,00	0,976
UV2 (m ³ m ⁻³)	0,344	1,00.10 ⁻¹	0,958
PT2 (m ³ m ⁻³)	0,375	3,00.10 ⁻²	0,889

^(a) Vide quadro 3,4 e 5; ^(b) VO = valor observado e VE = valor estimado.

(0,405); 8) EC2 (0,390); 9) UG2 (0,378); 10) PT2 (0,375); 11) UVI (0,348); 12) UV2 (0,344); 13) FIB (0,338); 14) RP2 (0,313); 15) #TCH (0,288) e 16) DS1 (0,130).

Dessa forma, pôde-se constatar que as seis melhores validações cruzadas foram, em ordem decrescente: BRI, POL, UG2, UG1, UV2 e ATR, com coeficiente angular (b) das retas das validações variando entre 0,980 (BRI) e 0,504 (DS1) (Quadro 11). Assim, para o atributo BRI 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.

4.3.1.3 Mapas de krigagem dos atributos

Na Figura 16 podem ser observados os mapas de krigagem para os atributos da cultura da cana-de-açúcar em terceiro ciclo (bisada), variedade RB 85-5453. Em relação ao mapa de krigagem da #TCH (Figura 16a) constatou-se que nos dois terços verticais à direita, a produtividade variou de 93,1 a 59,1 t ha⁻¹. Já no extremo sudoeste houveram valores de maiores produtividades que variaram entre 106,4 a 93,1 t ha⁻¹.

Para os mapas de krigagem dos atributos ATR, BRI e POL 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 maiores valores desses atributos, em que o ATR variou entre 156,2 e 151,5 kg t⁻¹ (Figura 16b), o BRI variou entre 23,1 e 22,3% (Figura 16c) e a POL variou entre 19,6 e 18,9% (Figura 16d). Esses atributos se correlacionam, pois fazem alusão ao açúcar contido nos colmos da cana, por isso a semelhança direta dos mapas. No mapa de krigagem do atributo FIB (Figura 16e) ocorreu uma zona no terço central horizontal onde foram verificados as maiores porcentagens de fibras, parcialmente se correlacionando com os mapas dos atributos ATR, BRI e POL.

Nas Figuras 17 e 18 estão apresentados os mapas de krigagem para os atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico. Nos mapas de krigagem dos atributos CO1 e EC1, houve uma semelhança no primeiro terço horizontal das figuras, em que o CO1 variou entre 18,2 e 17,3 t ha⁻¹ (Figura 17a) e o EC1 variou entre 28,7 e 27,2 t ha⁻¹. O EC1 é em função dos atributos carbono orgânico e densidade do solo, no entanto, não ocorre semelhança na distribuição espacial do EC1 e da DS1, onde não houve consonâncias dos mapas de krigagem (Figura 17c).

Figura 16- Mapas de krigagem dos atributos da cultura da cana-de-açúcar (ETCH, ATR, BRI, POL e FIB) em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

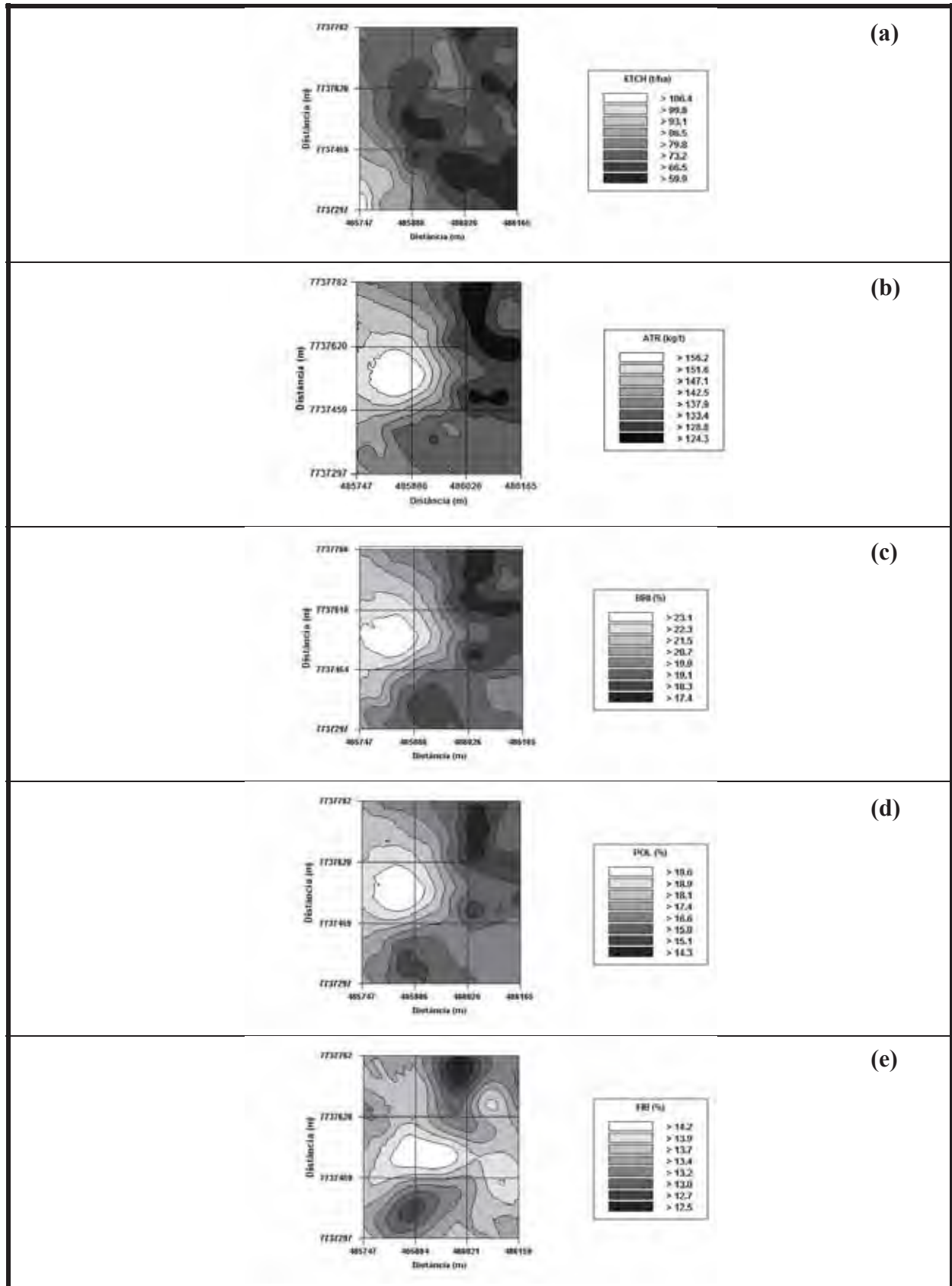


Figura 17- Mapas de krigagem dos atributos físico-químicos (CO1, EC1, DS1, UG1 e UV1) de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP)

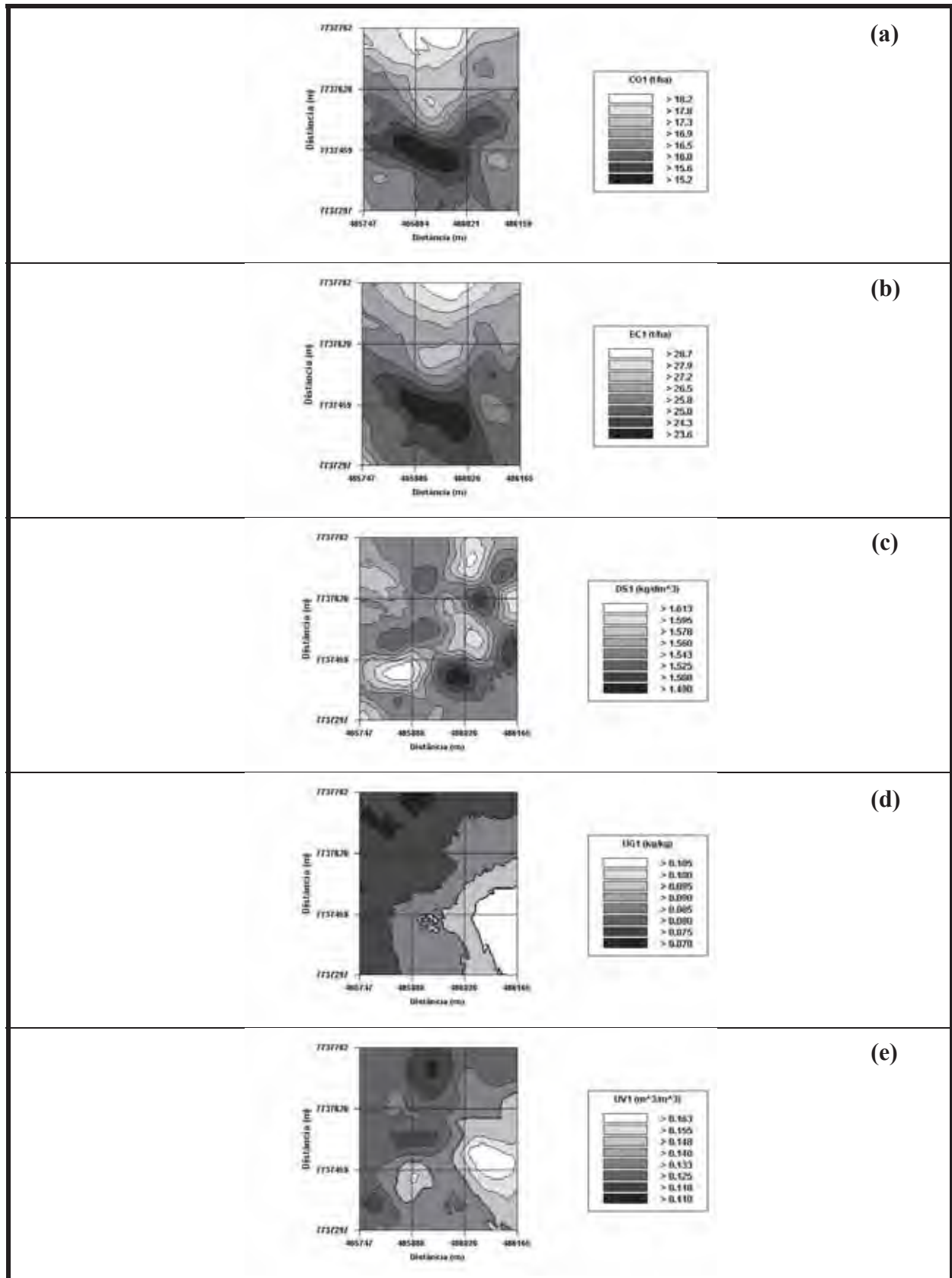
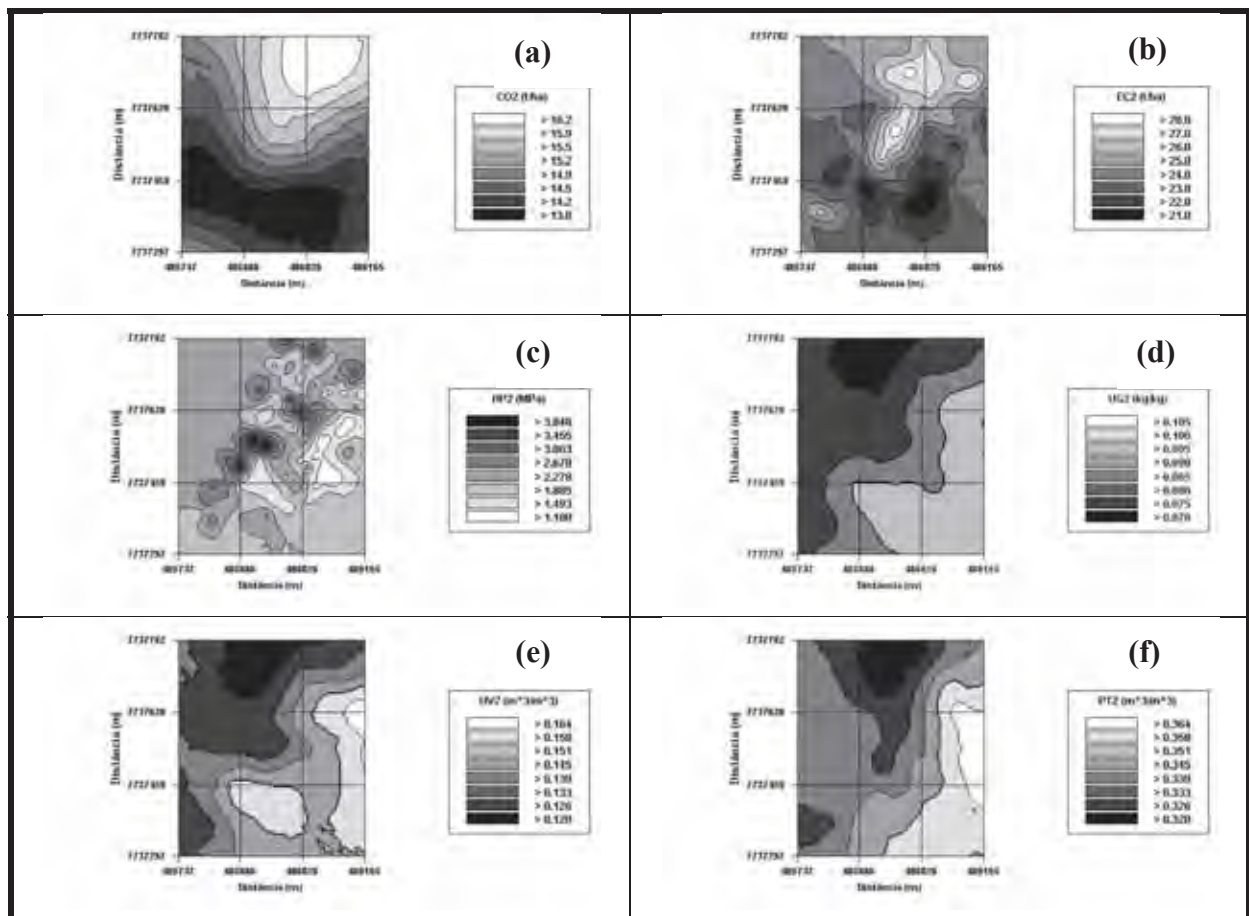


Figura 18- Mapas de krigagem dos atributos físico-químicos (CO₂, EC₂, RP₂, UG₂, UV₂ e PT₂) de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



Gioia (2011)

Para os mapas da UG1 (Figuras 17d) e UV1 (Figuras 17e) há também semelhanças na distribuição espacial dos atributos. Nos mapas pode-se observar as isolinhas que sugerem maiores umidades localizadas no extremo sudeste de ambos os mapas. Inverso do que aconteceu com os mapas de krigagem do ATR, BRI e POL indicando efeito diluição nos teores de açúcar do caldo na presença de água no solo que pode ser observado nas Figuras 16 b, c e d, respectivamente.

Nos mapas dos atributos na profundidade de 0,20 – 0,40m solo pode-se observar que nos mapas do CO2 (Figura 18a) e do EC2 (Figura 18b) há semelhança, pois no nordeste do mapa pôde-se constatar os maiores teores de carbono orgânico (15,5 a 16,2 t ha⁻¹) e provavelmente influenciado pela densidade do solo, o EC2 variou entre 29 e 26 t ha⁻¹, maiores valores obtidos para esse atributo.

Nos mapas da UG2, UV2 e PT2 observa-se uma semelhança espacial, pois no noroeste dos mapas encontram-se os maiores valores de UG2 de 0,100 kg kg⁻¹ (Figura 18d), UV2 variando nos seus maiores valores (0,164 a 0,151 m³.m⁻³) provavelmente influenciado pela densidade do solo inerente ao seu cálculo (Figura 18e), e em correspondência com o mapa da PT2 em que seus valores variam entre 36,4 e 34,5% (figura 18f). Essa correspondência pode indicar a presença dominante da microporosidade onde a água é retida, daí a semelhança entre os mapas.

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 nos Quadros 12 e 13 os parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados entre atributos da planta de cana-de-açúcar e atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP). Assim, ficou comprovado que as co-krigagens: $\text{ETCH} = f(\text{ATR})$; $\text{ETCH} = f(\text{BRI})$; $\text{ETCH} = f(\text{POL})$; $\text{ETCH} = f(\text{FIB})$ e $\text{ATR} = f(\text{FIB})$ 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: $\text{ETCH} = f(\text{CO1})$; $\text{ETCH} = f(\text{EC1})$; $\text{ATR} = f(\text{DS1})$; $\text{ATR} = f(\text{UG1})$; $\text{ATR} = f(\text{UV1})$; $\text{ETCH} = f(\text{CO2})$; $\text{ETCH} = f(\text{EC2})$; $\text{ATR} = f(\text{RP2})$ e $\text{ATR} = f(\text{UG2})$.

A relação decrescente dos coeficientes de determinação espacial (r^2) dos semivariogramas cruzados, que podem ser observados nos Quadros 12 e 13, foi a seguinte: 1) $\text{ETCH} = f(\text{BRI})$ (0,976); 2) $\text{ETCH} = f(\text{POL})$ (0,962); 3) $\text{ATR} = f(\text{UV1})$ (0,781); 4) $\text{ETCH} = f(\text{ATR})$ (0,795); 5) $\text{ETCH} = f(\text{EC1})$ (0,718); 6) $\text{ATR} = f(\text{DS1})$ (0,713) e 7) $\text{ATR} = f(\text{UG1})$ (0,660).

Os melhores alcances foram obtidos em ordem decrescente para as co-krigagens a seguir: 1) $\text{ETCH} = f(\text{EC1})$ (328,5m); 2) $\text{ETCH} = f(\text{CO2})$ (298,9m); 3) $\text{ETCH} = f(\text{POL})$ (288,2m); 4) $\text{ETCH} = f(\text{EC2})$ (285,0m) e 5) $\text{ETCH} = f(\text{CO1})$ (258,9m). 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 12) para as co-krigagens entre atributos de planta: 1) $\text{ATR} = f(\text{FIB})$ (0,420); 2) $\text{ETCH} = f(\text{ATR})$ (0,322) e 3) $\text{ETCH} = f(\text{POL})$ (0,302). Já para as co-krigagens entre atributos de planta *versus* atributos do solo passa a ser: 1) $\text{ATR} = f(\text{UV1})$ (0,491); 2) $\text{ATR} = f(\text{DS1})$ (0,480); 3) $\text{ATR} = f(\text{RP2})$ (0,479) e 4) $\text{ATR} = f(\text{UG2})$ (0,473).

Nas Figuras 19 a 32, 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): $\text{ETCH} = f(\text{ATR})$ (Quadro 12, Figura 19) que evidenciou que 79,5% da variabilidade espacial da ETCH foram explicadas pela variabilidade do ATR para essa co-krigagem, o modelo ajustado foi gaussiano indireto, com alcance de 248,2 metros e um ADE muito alto (99,8%); $\text{ETCH} = f(\text{BRI})$ (Figura 20); $\text{ETCH} = f(\text{POL})$ (Figura 21) e $\text{ETCH} = f(\text{FIB})$ (Figura 22), em que foram modelados semivariogramas cruzados do tipo gaussiano indireto, com o BRI explicando 97,6% da TCH, com alcance de 277,0 metros, ADE muito alto (80,1%) (Quadro 12, Figura 20); a POL explicando 96,2% da TCH com alcance de 288,2 metros, ADE muito alto (81,4%) (Quadro 12, Figura 21) e FIB explicando 64,3% da TCH com alcance de 164,7 metros, ADE alto (69,8%) (Quadro 12, Figura 22). Já para a co-krigagem entre o $\text{ATR} = f(\text{FIB})$ obteve-se um semivariograma cruzado direto do tipo esférico, com alcance de 233,7 metros, ADE muito alto (97,5%), em que a FIB explica 91,4% do ATR (Quadro 12, Figura 23).

Para essas co-krigagens pode-se definir duas zonas específicas de manejo em que,

Quadro 12- Parâmetros dos semivariogramas cruzados referentes as co-krigagens entre os atributos da cultura da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanópolis-SP)

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 ^(e)	a	b	r
<i>γ(h) cruzado planta x planta</i>											
£TCH = f(ATR) (t ha ⁻¹)	gau.	-1,00.10 ⁻¹	-5,97.10	248,2	0,795	1,25.10 ³	99,8	MA	-8,02	0,500	0,322
£TCH = f(BRI) (t ha ⁻¹)	gau.	-2,76	-1,39.10	277,0	0,976	2,61	80,1	MA	-8,24	0,469	0,297
£TCH = f(POL) (t ha ⁻¹)	gau.	-2,70	-1,45.10	288,2	0,962	4,69	81,4	MA	-8,19	0,477	0,302
£TCH = f(FIB) (t ha ⁻¹)	esf.	-1,52	-5,04	164,7	0,643	3,26	69,8	AL	-8,35	0,456	0,286
ATR = f(FIB) (kg t ⁻¹)	esf.	9,00.10 ⁻²	3,67	233,7	0,914	9,09.10 ⁻¹	97,5	MA	6,19.10	0,55	0,420

^(a)Vide quadro 3,4 e 5; ^(b) esf = esférico, gau = gaussiano; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial; ^(e) MB= muito baixo, BA=baixo, ME= médio, AL= alto e MA= muito alto

Quadro 13- Parâmetros dos semivariogramas cruzados referentes as co-krigagens entre os atributos da cultura da cana-de-açúcar em função dos atributos do solo nas profundidades de 0,0 – 0,20 e 0,20 – 0,40m de um Argissolo distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

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 ^(e)	a	b	r
<i>γ(h) cruzado planta x 1ª profundidade</i>											
£TCH = f(CO1) (t ha ⁻¹)	esf.	3,10	1,00.10	258,9	0,581	2,80.10	69,0	AL	-6,83	0,549	0,345
£TCH = f(EC1) (t ha ⁻¹)	esf.	7,52	2,13	328,5	0,718	7,04.10	64,6	AL	-6,63	0,573	0,373
ATR = f(DS1) (kg t ⁻¹)	esf.	-6,01.10 ⁻²	-3,23.10 ⁻¹	107,3	0,713	8,24.10 ⁻³	81,4	MA	5,11.10	0,629	0480
ATR = f(UG1) (kg t ⁻¹)	gau.	-1,00.10 ⁻⁴	-5,29.10 ⁻²	120,0	0,660	1,20.10 ⁻³	99,8	MA	5,36.10	0,610	0,466
ATR = f(UV1) (kg t ⁻¹)	esf.	-1,00.10 ⁻⁴	-13,22.10 ⁻²	135,7	0,781	2,45.10 ⁻³	99,9	MA	5,00.10	0,636	0,491
<i>γ(h) cruzado planta x 2ª profundidade</i>											
£TCH = f(CO2) (t ha ⁻¹)	esf.	4,23	9,71	298,9	0,225	9,06.10	56,4	ME	-8,55	0,467	0,297
£TCH = f(EC2) (t ha ⁻¹)	esf.	5,02	2,12.10	285,0	0,528	2,17.10 ²	76,3	AL	-8,25	0,479	0,302
ATR = f(RP2) (kg t ⁻¹)	gau.	2,00.10 ⁻²	3,13	156,6	0,653	4,68	99,4	MA	5,13.10	0,328	0,479
ATR = f(UG2) (kg t ⁻¹)	esf.	-1,00.10 ⁻⁴	6,48.10 ⁻²	134,2	0,650	1,15.10 ⁻¹	99,8	MA	5,23.10	0,621	0,473

^(a)Vide quadro 3,4 e 5; ^(b) esf = esférico, gau = gaussiano; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial; ^(e) MB= muito baixo, BA=baixo, ME= médio, AL= alto e MA= muito alto

quando o ATR (Figura 19), o BRI (Figura 20), a POL (Figura 21) e FIB (Figura 22), atributos da planta da cana-de-açúcar, estiverem variando entre 156,2 a 142,5 kg t⁻¹, 23,1 a 20,7 %, 19,5 a 17,4 % e 14,2 a 13,4%, respectivamente, em seus maiores valores, a £ TCH apresentará uma variação entre 123 a 87 t ha⁻¹ seus menores valores. E quando os mesmos atributos variarem entre, respectivamente, 137,9 a 124,3 kg t⁻¹, 19,9 a 17,4%, 16,6 a 14,3% e 13,2 a 12,5%, seus menores valores, a £ TCH apresentará uma variação entre 74,5 a 37,4 t ha⁻¹ por apresentarem uma relação indireta.

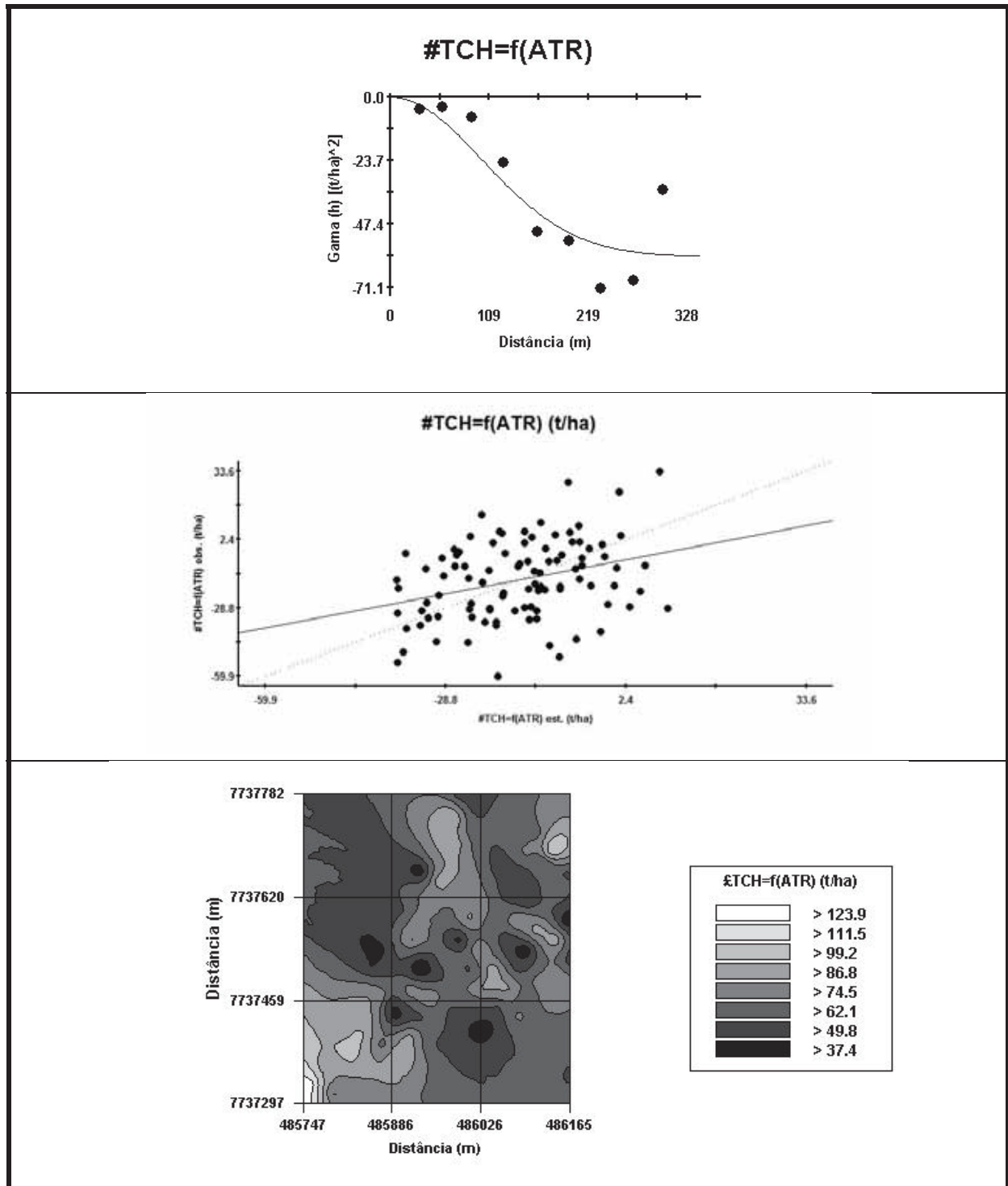
Já para a correlação espacial direta entre ATR = f(FIB) (Figura 23) pode-se distinguir duas zonas de manejo, pois quando a FIB variar entre 14,2 a 13,4% o ATR apresentará uma variação entre seus maiores valores, 159,7 a 138,7 kg t⁻¹, já quando a FIB variar entre 13,2 a 12,5% o ATR apresentará valores de 131,7 a 110,6 kg t⁻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 as relações: £TCH = f(CO1) (Figura 24); £TCH = f(EC1) (Figura 25); £TCH = f(CO2) (Figura 29); £TCH = f(EC2) (Figura 30) e ATR = f(RP2) (Figura 31). Para as modelagens da TCH em função do CO e EC nas duas camadas analisadas modelou-se semivariogramas cruzados do tipo esféricos, com alcances variando de 328,5 a 258,9 metros, ADEs variando de médio (56,4%) a alto (76,3%)

(Quadro 13). Pode-se observar que o EC1 explicou 71,8% da TCH (Quadro 13, Figura 25) e o EC2, 52,8% da TCH (Quadro 13, Figura 30).

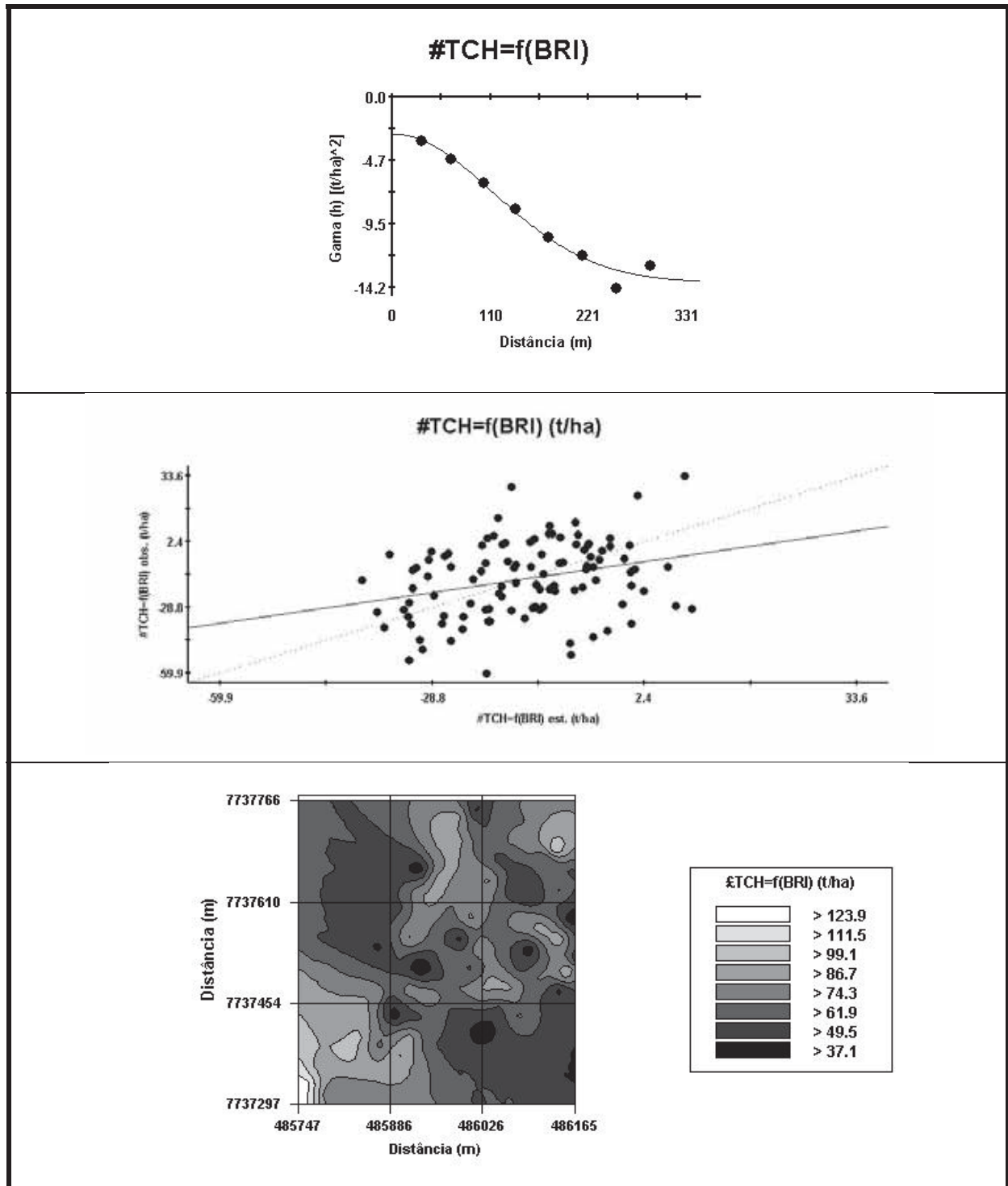
Nas Figuras 16a, 17b e 18b estão apresentados os mapas de krigagem para os atributos #TCH, EC1 e EC2 de um Argissolo Vermelho distrófico no noroeste paulista, município de Suzanápolis-SP. Em relação ao mapa de krigagem da #TCH constata-se no norte do mapa produtividades variando entre 93,1 e 59,1 t ha⁻¹ e no sudoeste do mapa as maiores produtividade alcançadas (106,4 t ha⁻¹). Em relação os mapas de krigagem do EC1 e EC2 pode-se observar no norte das Figuras, que o EC1 variou entre 28,7 e 26,5 t ha⁻¹ e EC2 variou entre 29,0 e 25,0 t ha⁻¹, ou seja, os maiores valores de EC observados na área. Nos mapas de co-krigagem (Figuras 25 e 30), quando a TCH variou entre aproximadamente 107 e 86 t ha⁻¹, o EC1 variou de 28,7 e 26,5 t ha⁻¹ e o EC2 variou entre 29,0 e 25,0 t ha⁻¹, já quando a TCH variou entre aproximadamente 80 e 60 t ha⁻¹, o EC1 variou de 25,8 e 23,6 t ha⁻¹ e o EC2 variou entre 24,0 e 21,0 t ha⁻¹, definindo duas zonas específicas de manejo do solo.

Figura 19- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ΣTCH em função do ATR em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



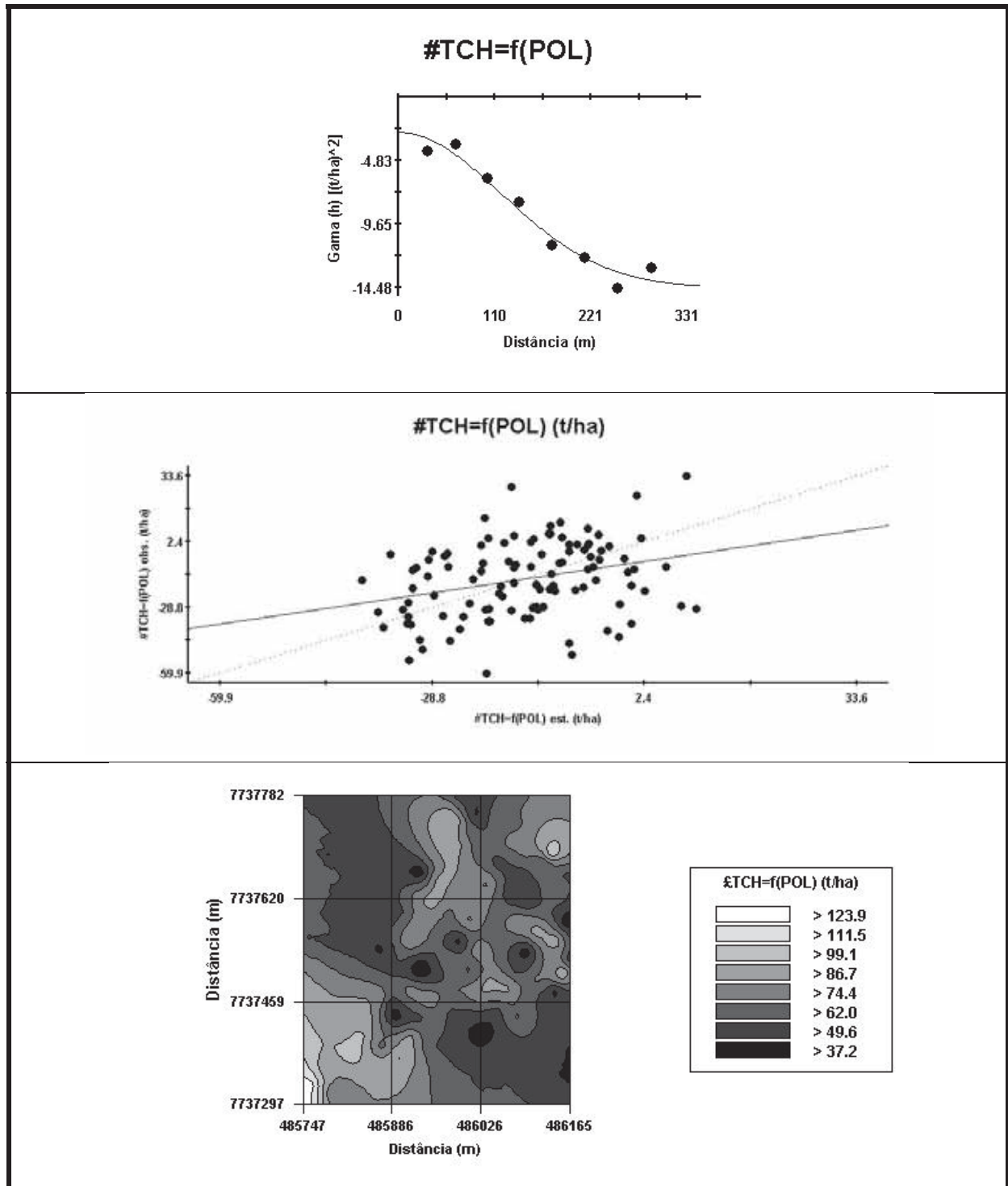
Gioia (2011)

Figura 20- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ΣTCH em função do BRI em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



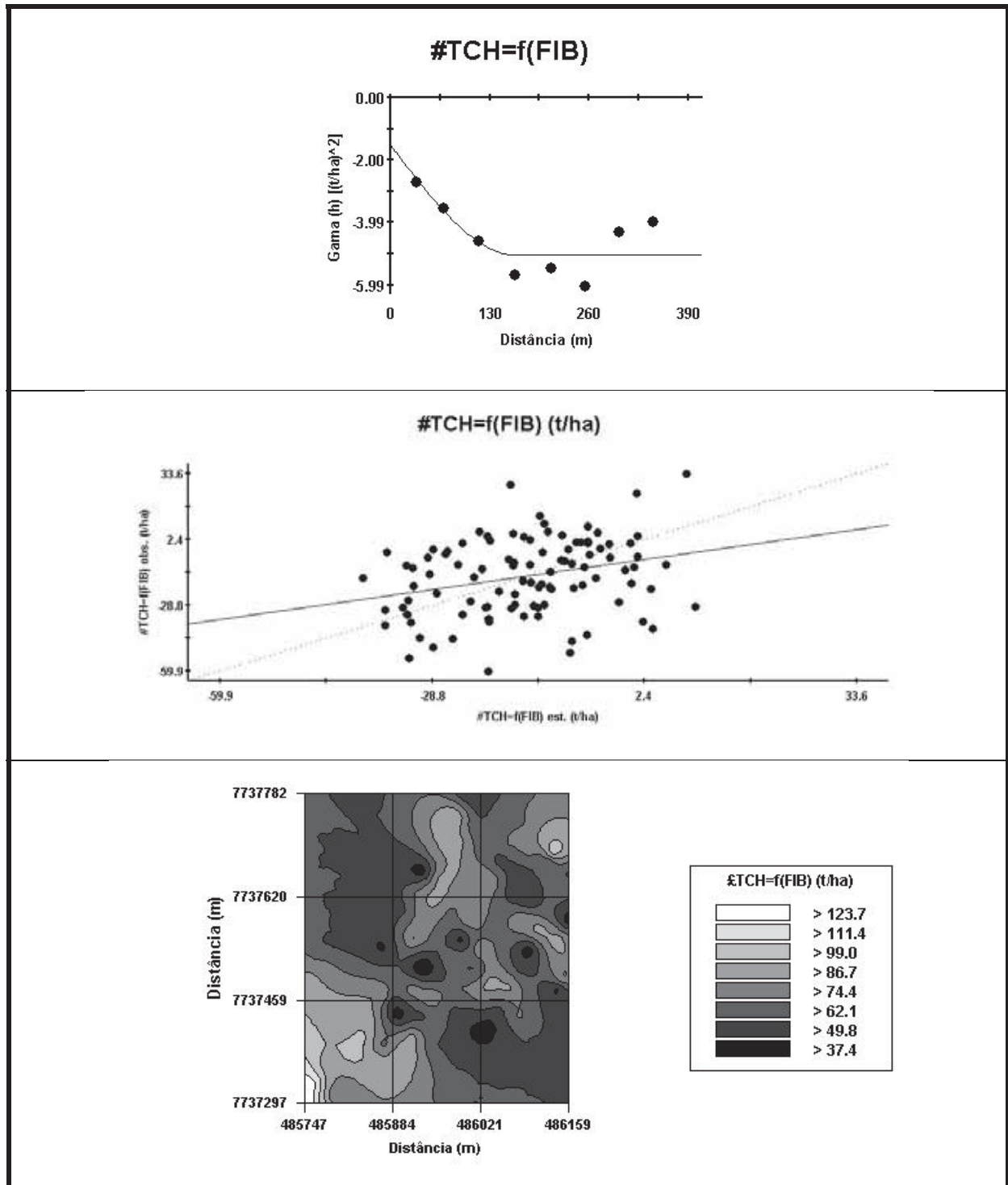
Gioia (2011)

Figura 21- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ΣTCH em função do POL em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



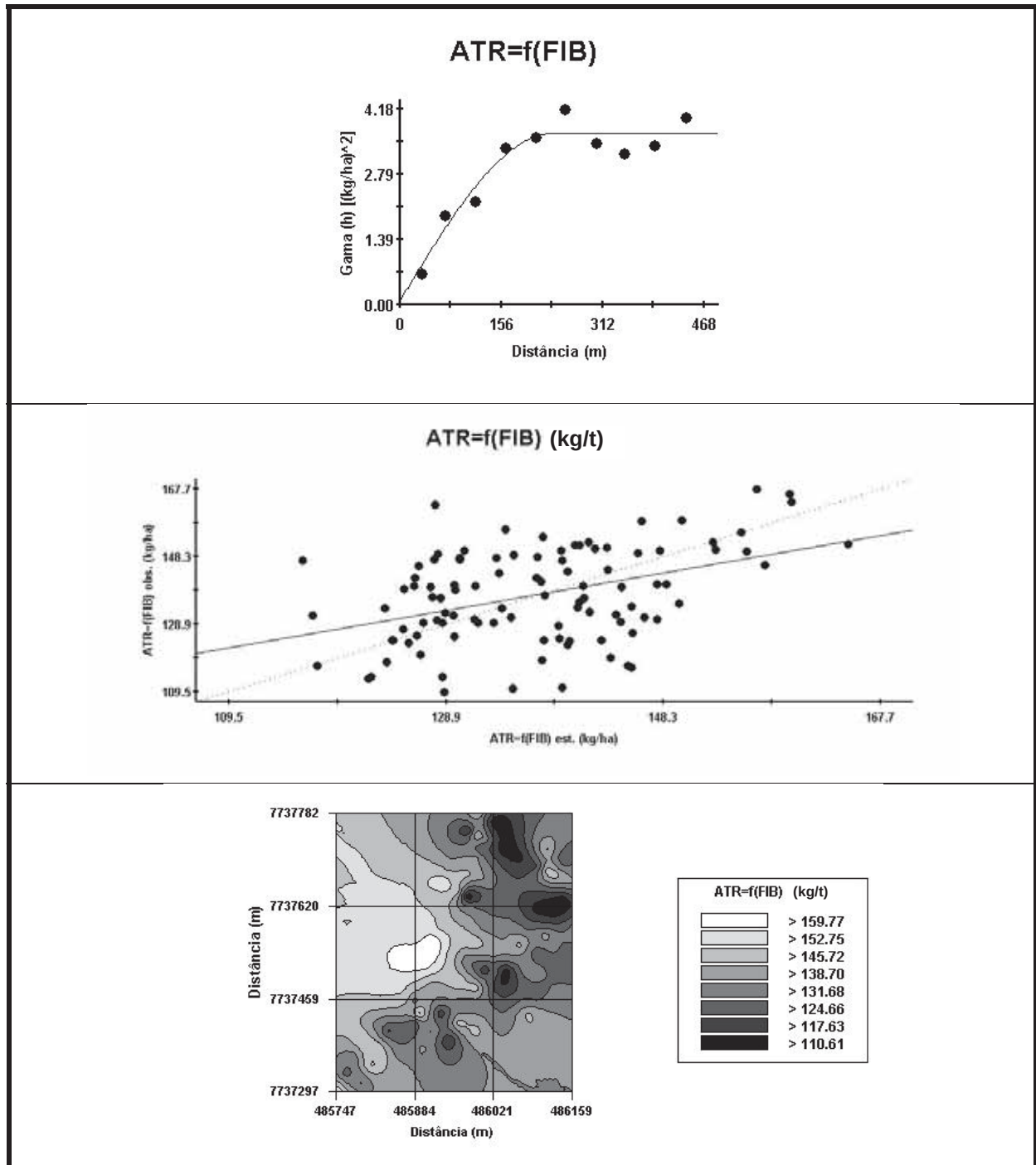
Gioia (2011)

Figura 22- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ΣTCH em função da FIB em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



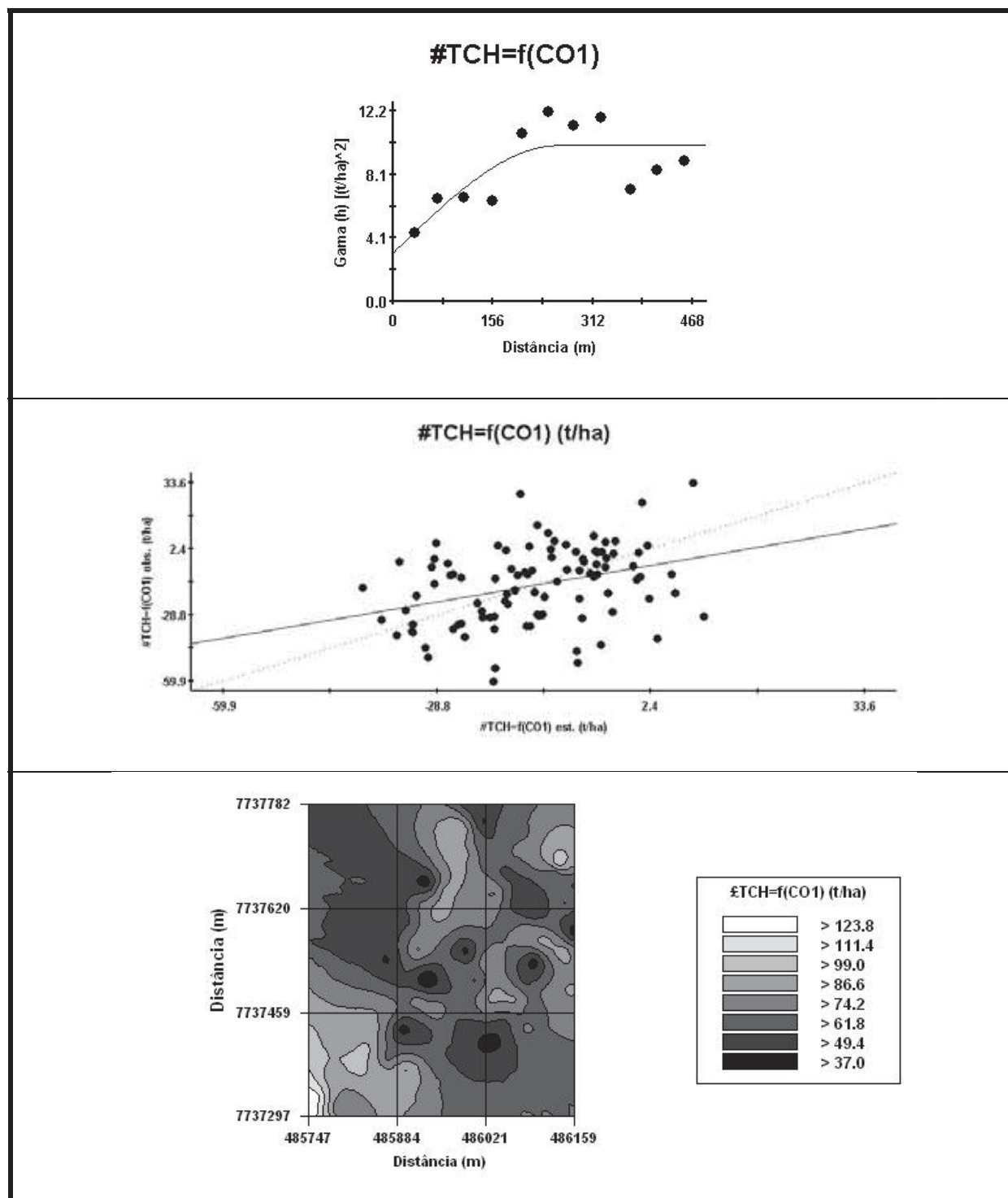
Gioia (2011)

Figura 23- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função da FIB em um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



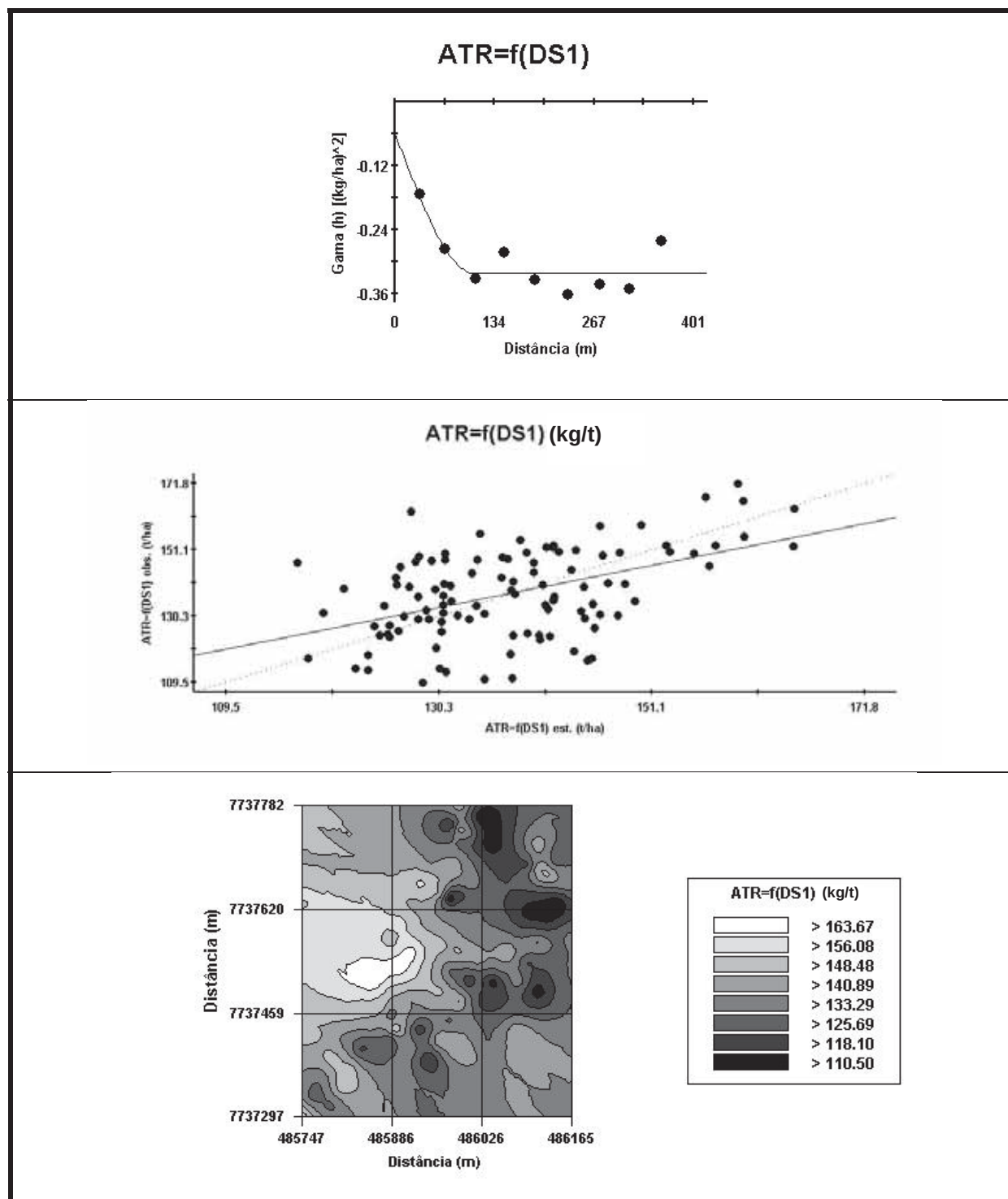
Gioia (2011)

Figura 24- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ΣTCH em função do CO1 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



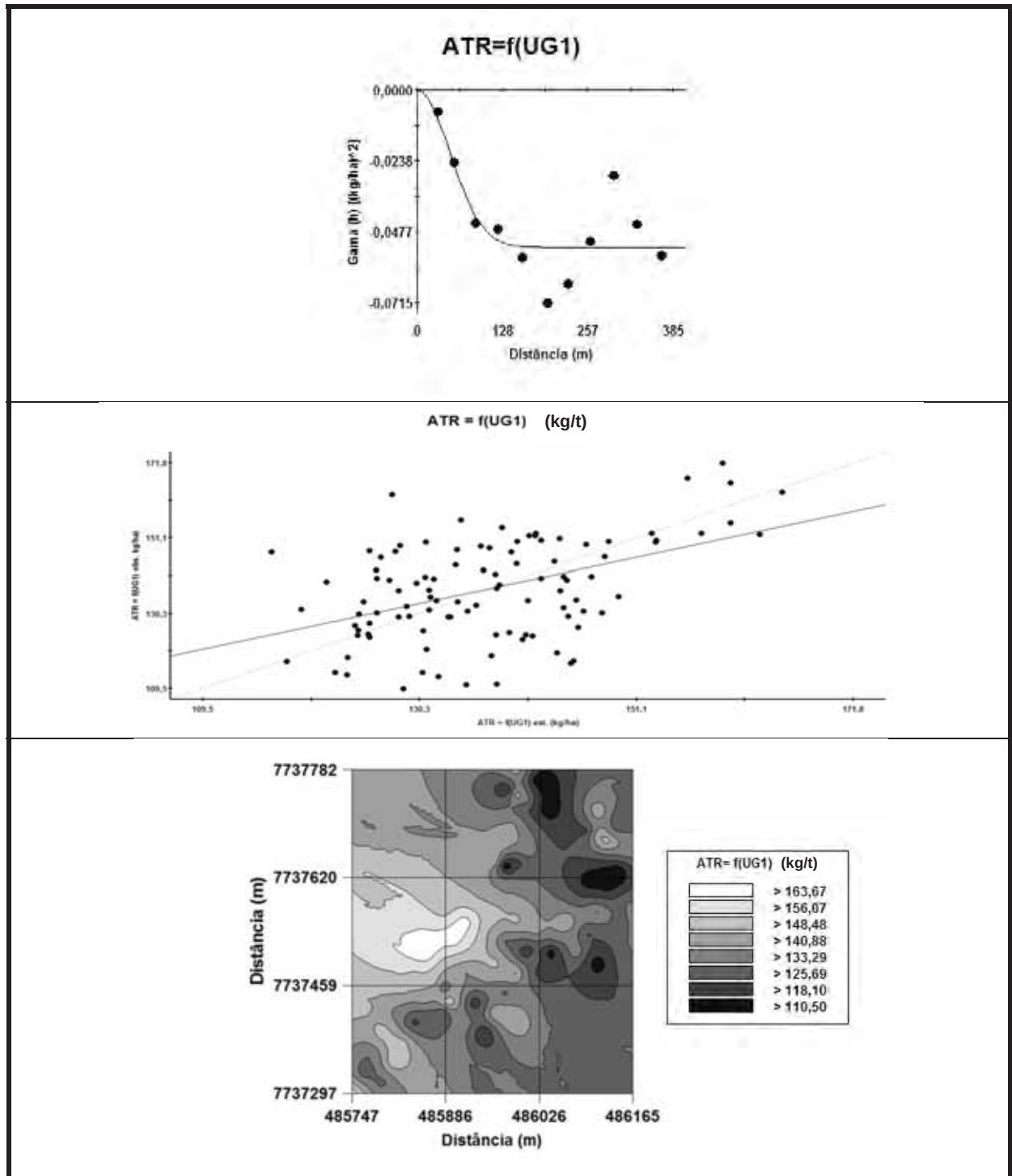
Gioia (2011)

Figura 26- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função da DS1 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



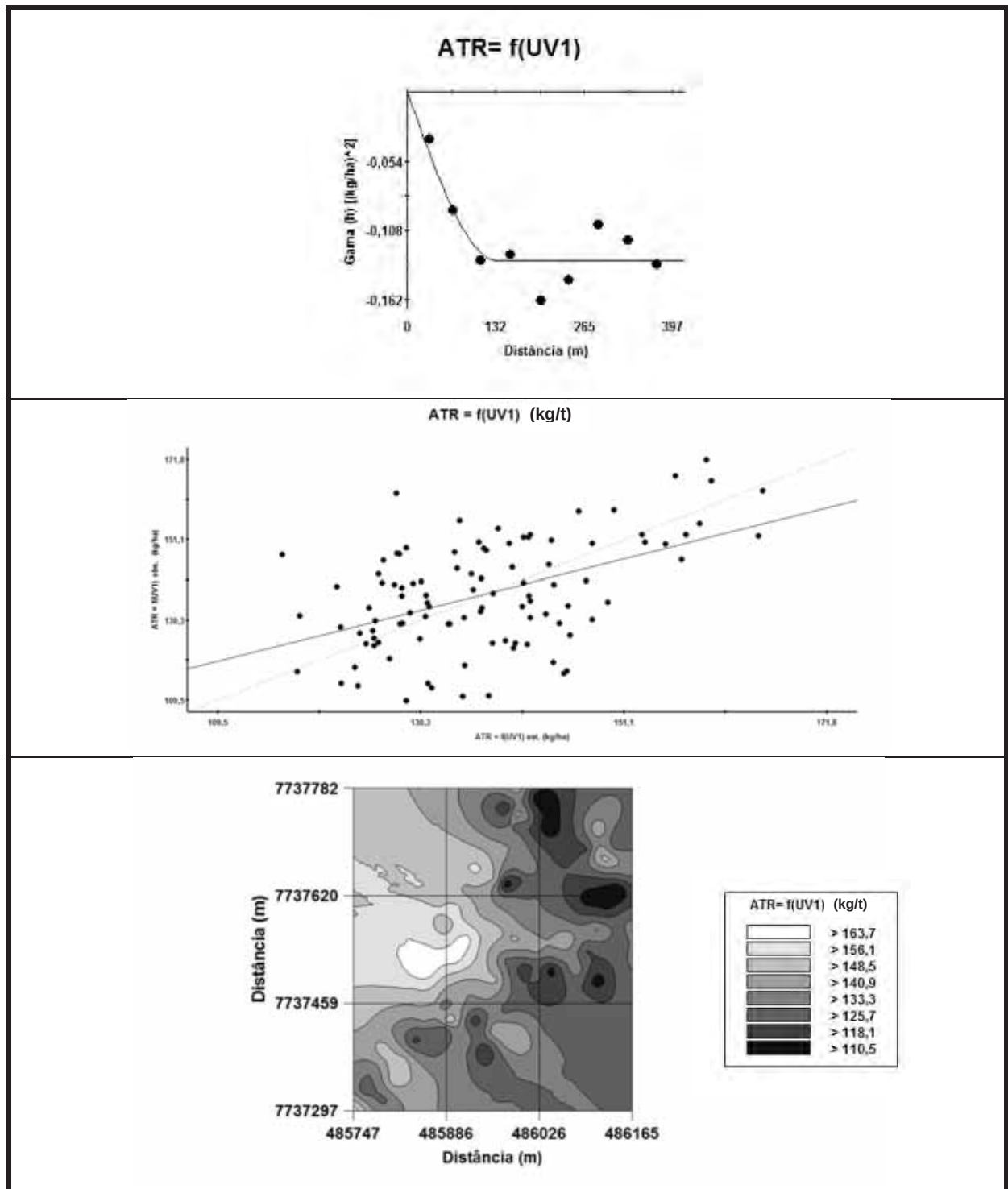
Gioia (2011)

Figura 27- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função da UG1 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



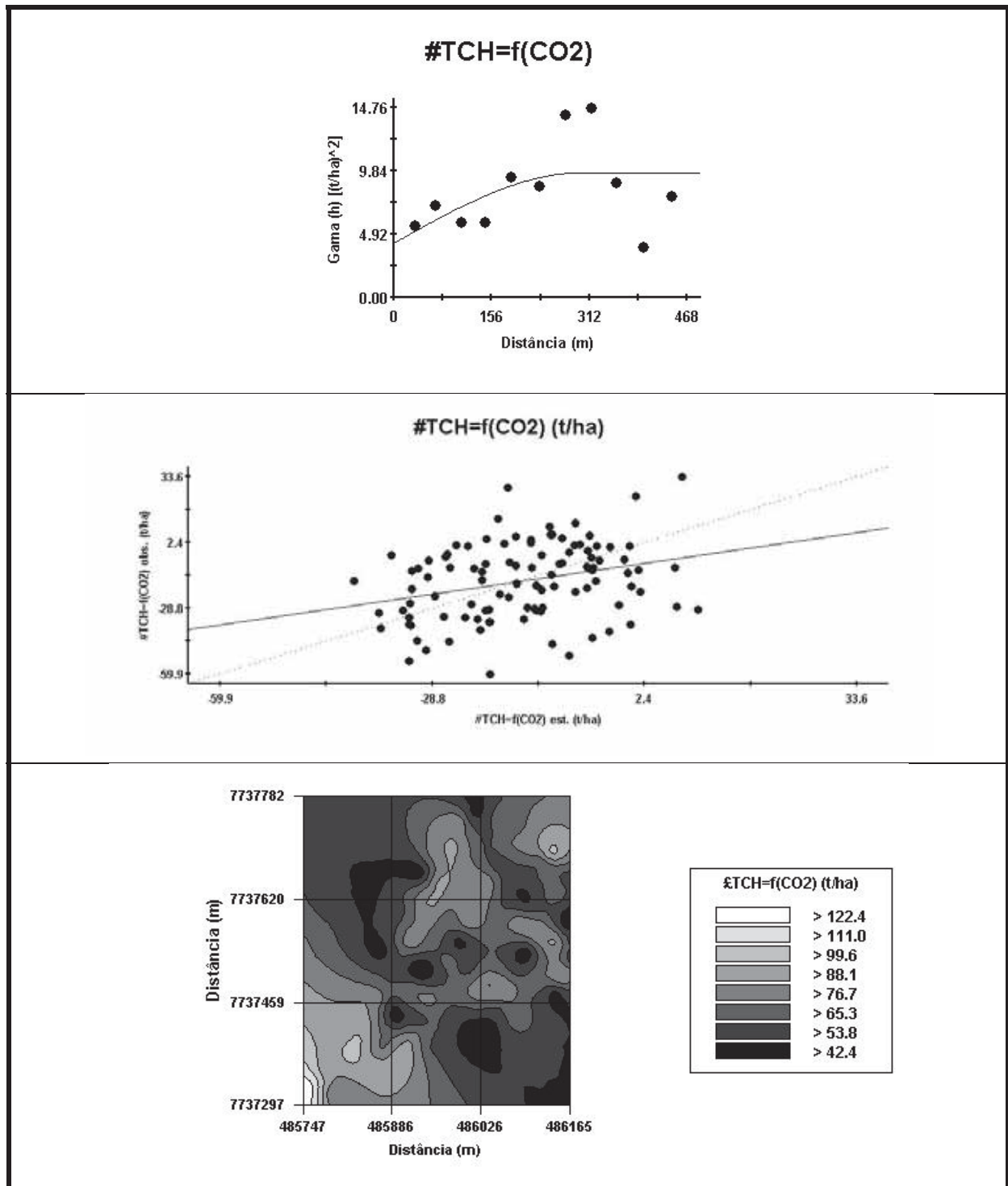
Gioia (2011)

Figura 28- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função do UV1 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



Gioia (2011)

Figura 29- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ϵTCH em função do CO_2 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



Gioia (2011)

Figura 30- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ξTCH em função do EC2 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

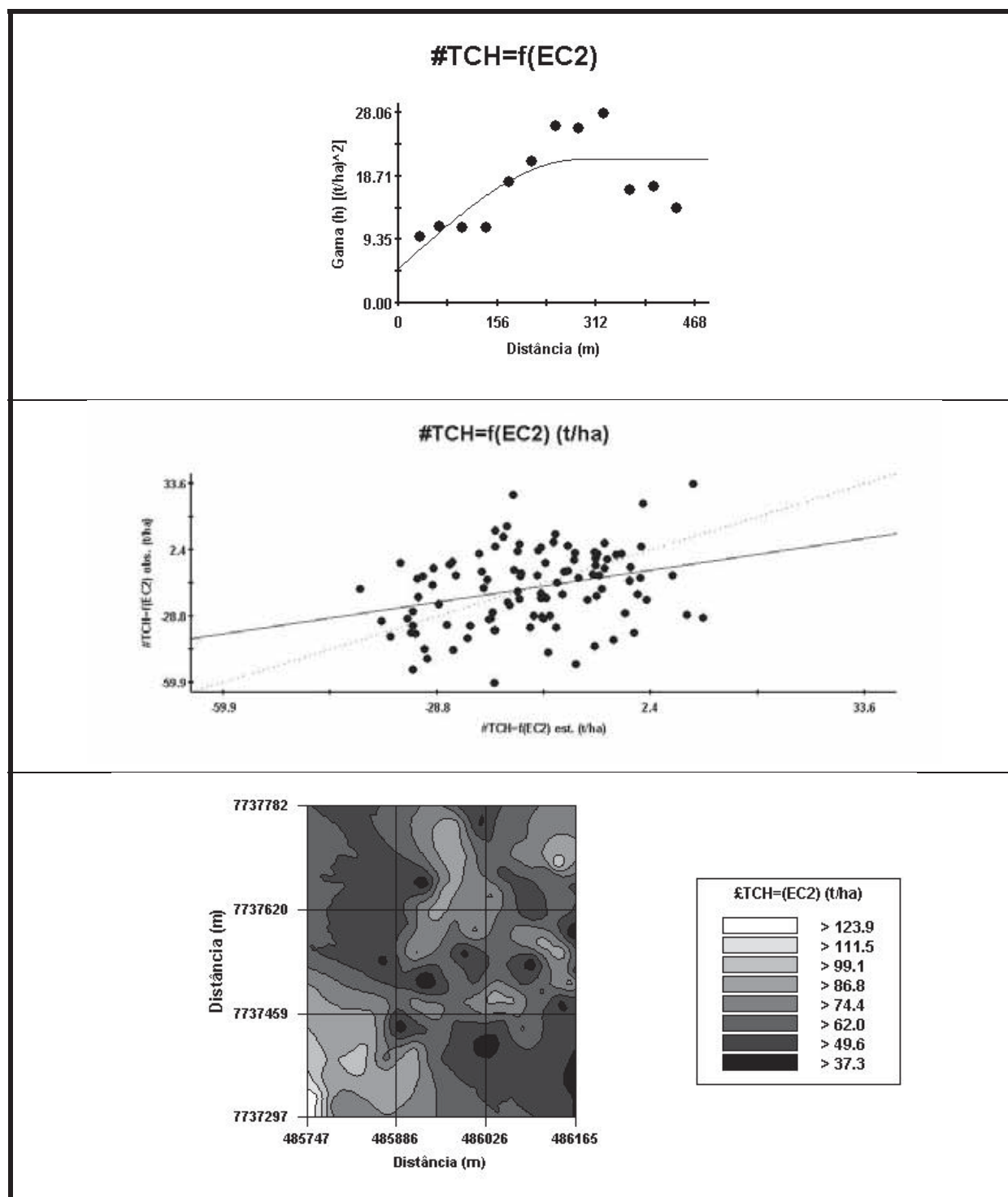


Figura 31- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função da RP2 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)

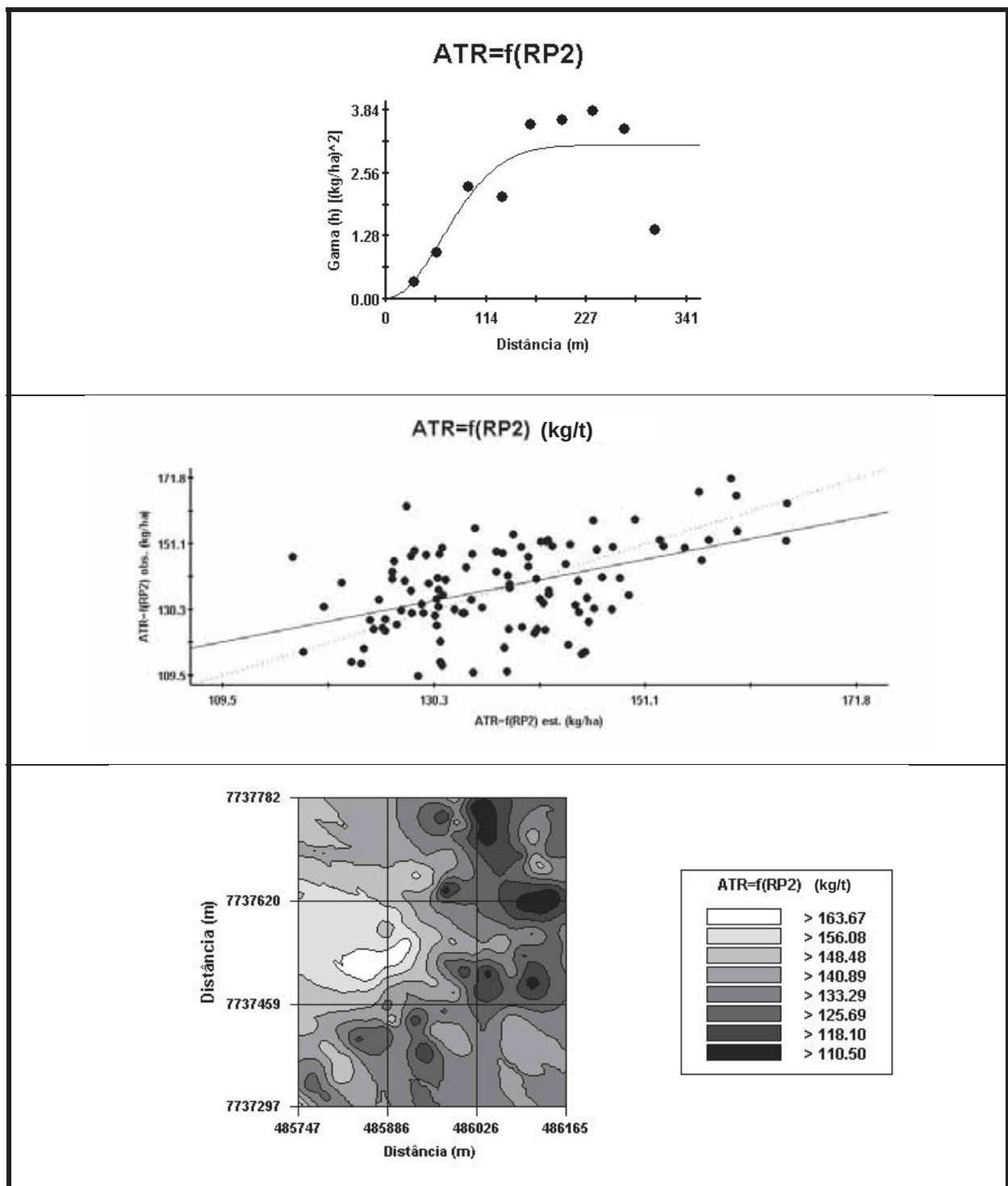
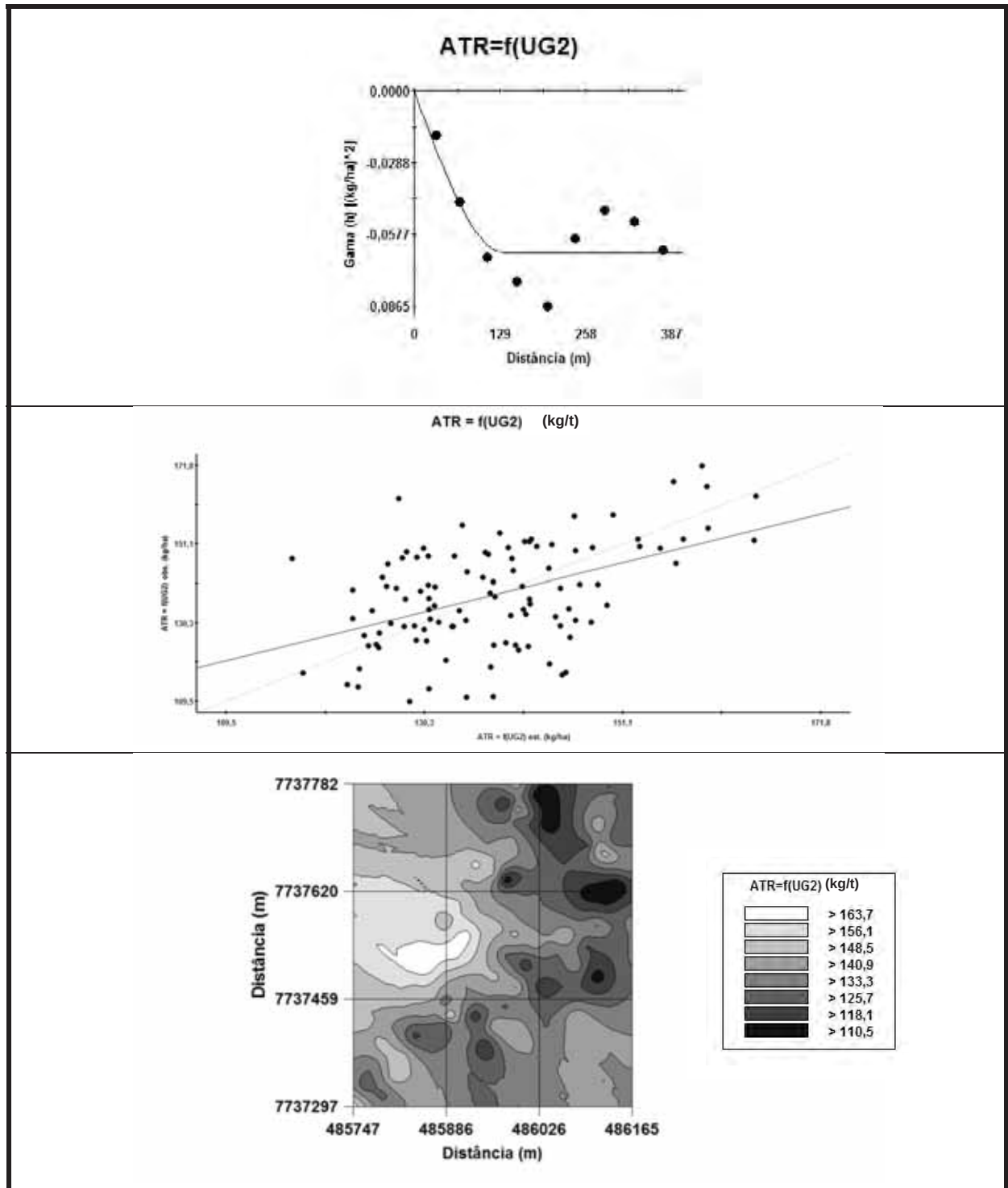


Figura 32- Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de co-krigagem da ATR em função da UG2 de um Argissolo Vermelho distrófico da Fazenda Valença I (Suzanápolis-SP)



Gioia (2011)

A co-krigagem entre $ATR = f(RP2)$ em que houve também a modelagem de um semivariograma cruzado direto do tipo esférico, em que obteve-se um alcance de 156,6 metros, ADE muito alto (99,4%), constatou-se que a RP2 explicou o ATR em 65,0% definindo duas zonas específicas de manejo em que quando a RP2 variar entre 3,85 a 2,67 MPa e 2,3 a 1,10 MPa o ATR apresentará uma variação, respectivamente, de 163,7 a 140,89 e 133,29 a 110,5 kg t^{-1} (Figura 31).

Ainda para os semivariogramas cruzados entre os atributos de planta *versus* atributos do solo (Quadro 13) em que foi modelada uma relação inversa pode-se observar as seguintes co-krigagens: $ATR = f(DS1)$ (Figura 26); $ATR = f(UG1)$ (Figura 27); $ATR = f(UV1)$ (Figura 28) e $ATR = f(UG2)$ (Figura 32). Para essas co-krigagens o modelo ajustado foi do tipo esférico para $ATR = f(DS1)$, $ATR = f(UV1)$, $ATR = f(UG2)$ e gaussiano para $ATR = f(UG1)$ com alcances variando entre 107,3 e 135,7 metros, ADEs muito altos (81,4 a 99,8%) e coeficientes de explicação variando entre 52,8 e 78,1%. Podendo-se definir zonas específicas de manejo dos atributos do solo em função do ATR de forma indireta. Assim quando os atributos DS1, UG1, UV1 e UG2 variarem entre 1,61 a 1,56 kg dm^{-3} , 0,10 a 0,09 kg kg^{-1} , 0,16 a 0,14 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e 0,10 a 0,90 kg kg^{-1} , respectivamente, os valores de ATR apresentarão valores variando de 133,29 a 110,05 t kg^{-1} . De forma indireta quando os atributos citados apresentarem valores variando entre 1,54 a 1,49 kg dm^{-3} , 0,08 a 0,07 kg kg^{-1} , 0,13 a 0,11 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e 0,08 a 0,07 kg kg^{-1} , os valores de ATR apresentarão seus maiores valores (163,7 a 140,9 t kg^{-1}).

5 CONCLUSÕES

1. Entre os atributos de planta estudados, a população de plantas apresentou uma correlação de Pearson direta com a produtividade da cana soca de terceiro ciclo (bisada) indicando que, para a variedade RB 85 5453, a máxima produtividade de $115,46 \text{ t ha}^{-1}$ somente poderá ser obtida com 16 plantas por metro.
2. No solo, o carbono orgânico proporcionou boas correlações diretas de Pearson com a produtividade de cana soca, indicando que um aumento de aproximadamente 10 t ha^{-1} desse atributo do solo incrementa tal produtividade em aproximadamente 25 t ha^{-1} de colmos. Assim, práticas de manejo que visem ao aumento do teor de carbono orgânico no solo melhoram suas condições físico-químicas e, por conseguinte, a produtividade agrícola.
3. O teor de carbono orgânico e o seu estoque, por terem apresentado correlações espaciais de forma direta com a produtividade da cana soca, revelaram-se como atributos potencialmente aptos para a definição de duas zonas específicas de manejo do solo. Nelas, a produtividade de cana-de-açúcar variou entre $107\text{-}86 \text{ t ha}^{-1}$ e $80\text{-}60 \text{ t ha}^{-1}$ quando respectivamente o estoque de carbono o foi de $29\text{-}25 \text{ t ha}^{-1}$ e $24\text{-}21 \text{ t ha}^{-1}$.
4. O ATR, o Brix, o Pol e as Fibras correlacionaram-se indireta e espacialmente com a produtividade de cana soca, de forma a definir duas zonas específicas de manejo. Nelas, a produtividade variou entre $124\text{-}89 \text{ t ha}^{-1}$ e $75\text{-}37 \text{ t ha}^{-1}$.
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 73 e 360 metros.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REICHERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2 p. 519-531, 2004.
- ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTANELLI, 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**, Viçosa, v. 19, n. 1 p. 115-119, 1995.
- ALVES, M. C.; CARVALHO, M. P.; LIMA, R. C.; VANZELA, S. L. **Levantamento taxonômico semidetalhado dos solos da Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar**. – Suzanápolis: Estudo Agrotécnico da Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar, 2009. 324 p.
- AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p.189-197, 2001.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N.; JUCKSCH, I. A cobertura vegetal de inverno e a adubação orgânica e, ou, mineral influenciando a sucessão feijão/milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 867-874, 2000.
- ARMESTO, M. V. **Variabilidade espacial e temporal da erosión en solos de cultivo**. 1999. 118 f. Tese (Doutorado)– Faculdade de Ciências, Universidade de La Coruña, Coruña, 1999.
- ARSHAD, M. A.; LOWER, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). *Methods for assessing soil quality*. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, p.123-141, 1996. (Special Publication, 49).
- ASSOCIAÇÃO DOS FORNECEDORES DE CANA DE GUARIBA- SOCICANA– **Variedades de cana. características agronômicas das variedades RB**. [S.l.: s.n., 2010?] Disponível em: <<http://www.coplana.com>>. Acesso em: 25 jan. 2011.

AZEVEDO, M. C. B. **Efeito de três sistemas de manejo físico do solo no enraizamento e produção de cana-de-açúcar.** 2008. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia)- Faculdade de Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, n. 1, p. 237-245, 2006.

BAYER, C.; MIELNICZUCK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais.** 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. Cap. 2, p. 1-636.

BENGHOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, n. 1, p. 341-358, 1990.

BENGHOUGH, A. G.; CAMPBELL, D. J.; O' SULLIVAN, M. F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C. E. (Ed.). **Soil and environmental analysis: physical methods.** 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2001. p. 377-403.

BERNER, P. G. M.; VIEIRA, S. R.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 837-844, 2007.

BERTOLANI, F. C.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo-Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 987-995, 2001.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G. Relação entre alguns atributos físicos e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em Latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 365-371, 2004.

BIDOIA, M. A. P.; BIDOIA, M. A. P. Instalação, condução e colheita de experimentos. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-Açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundação- IAC, 2008. cap. 38, p. 821-838.

BOWEN, H. D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G .F.; TAYLOR, H. M. (Comp.) **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981. p. 21-57.

BRAGA, J. A. **Inter-relações da produtividade de cana-de-açúcar com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico do noroeste paulista**. 2011. 85 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

BRITO, L. F.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAZETTA, D. A.; CALZAVARA, S. A.; OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1749-1755, 2006.

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

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMILOTTI, F. C.; ANDRIOLI, I.; DIAS, F. L. F.; CASAGRANDE, A. A., SILVA, A. L. R.; MUTTON, M. I. A.; CENTURION, J. F. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 189-198, 2005.

CARVALHO, G. D. Agricultura e aquecimento global: efeitos e mitigação. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 5, n. 8, p. 1-18, 2009. Suplemento Especial.

CARVALHO, L. A.; NETO, V. J. M.; SILVA, L. F.; PEREIRA, J. G.; NUNES, W. A. G. A.; CHAVES, C. H. C. Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante-MS. **Agrarian**, Dourados, v. 1, n. 2, p. 7-22, 2008.

CARVALHO, M. P.; SORATTO, R. P.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional em Selvíria, estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p.1353-1361, 2002.

CASAGRANDE, A. A.; VASCONCELOS A. C. M.; Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-Açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundação- IAC, 2008. Cap.3, p. 57 - 78.

CEDDIA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L. A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo podzólico amarelo no estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 8, p. 1467-1473, 1999.

CENTURION, L. F.; CARDOSO, J. P.; NATALE, W. Efeitos de forma de manejo em algumas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho em diferentes agroecossistemas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 254-258, 2001.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 1, p. 20-25, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**, terceiro levantamento, janeiro/2011. Brasília: CONAB, 2011. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br> >. Acesso em: 25jan. 2011.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA DE AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO- CONSECANA. **Manual de instruções**. 5. ed. Piracicaba: São Paulo, 2006. 111 p.

- CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa- MG, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.
- 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. de S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 323-332. 2008.
- DALCHIAVON, F. C. **Aspectos da produtividade do arroz de terras altas irrigado com atributos químicos do solo sob plantio direto**. 2010. 113f. Dissertação (Mestrado)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.
- DAVIS, J. C. **Statistics and analysis in geology**. 2. ed. New York: John Wiley, 1986. 646 p.
- DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 55-95.
- DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1994. 244 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/solos, 1997. 212 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Embrapa-Cerrado, 2004. 209 p.
- EPSTEIN, E.; BLOON, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.

FALLEIRO, R. M.; SOUZA, C. S. W.; SEDIYAMA, C. S.; SILVA, A. A.; FAGNDES, J. L. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades físicas e químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1097-1104, 2003.

FALLOON, P.; JONES, C. D.; CERRI, C. E.; AL-ADAMAT, R.; KAMONI, P.; BHATTACHARYYA, T.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; COLEMAN, K.; MILNE, E. Climate change and its impact on soil and vegetation carbon storage in Kenya, Jordan, India and Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 122, n. 1, p. 114-124, 2007.

FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1007-1013, 2006.

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

FIGUEIREDO, P. Breve historia da cana-de-açúcar e do papel do instituto agrônômico no seu estabelecimento In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-Açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundação- IAC, 2008. Cap.1, p. 31 - 44.

FRAZÃO, L. A.; SANTANA, I. K. S.; CAMPOS, D. V. B.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 10, p. 1198-1204, 2010.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; CARVALHO, G. J.; VERONESE JUNIOR, V. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 113-121, 2006.

GAMERO, C. A. **Efeito dos tipos de preparo sobre características do solo e da cultura do milho (*Zea mays* – L)**. 1985. 102 f. Tese (Doutorado)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

GATTO A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA I. R.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P.; VILLANI, E. M. A. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1069-1079, 2010.

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

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

HOAD, S. P.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 11-18, 2001.

IAIA, A. M.; MAIA, J. C. S.; KIM, M. E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 523–530, 2006.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA - IEA. Índice de mecanização na colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e nas regiões produtoras paulistas, Junho de 2007. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, [S.l.], v. 3, n. 3, 2008.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2001: the scientific basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881 p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geoestatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JORNAL cana. **Dados e estatísticas**. [S.l.: s.n., 2010?]. <Disponível em:<<http://www.jornalcana.com.br>>. Acesso em: 25 jan. 2011.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-água**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

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

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; BERTON, A. L. **Compactação e descompactação de solos**. Passo Fundo: EMBRAPA TRIGO, 2000. 20 p.

LA SCALA JUNIOR, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Short term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no till sugar cane area in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 9, n.1, p. 244-248, 2006.

LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 220, n. 1 , p. 242-258, 2005.

LANDELL, M. G. A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A. C. M.; PERECIN, D.; ROSSETTO, R.; BIDOIA, M. A. P.; SILVA, M. A.; XAVIER, M. A. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 741-745, 2003.

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. de A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico e Fundação: IAC, 2008. Cap.32, p. 697 - 722.

LIMA, M. A. de. Agropecuária brasileira e as mudanças climáticas globais: caracterização do problema, oportunidades e desafios. **Caderno de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 451-472. 2002.

MACHADO, P. L. O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 329-334. 2005.

MATHERON, G. **Traite de geostatistique appliquee**. Technip: Memories du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres, 1962. v. 2, 333 p.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p.1149-1159, 2003.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA- MCT. **Comunicação nacional inicial do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília: Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima, 2004. 74p. Comunicação Nacional.

MISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA- MME. **Resenha energética brasileira, exercício de 2008, (preliminar), Abril de 2009**. Brasília: MME, 2009. 21 p.

MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão**: boletim técnico/Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 32 p.

MONTANARI, R. **Aspectos da produtividade do feijoeiro correlacionados com atributos do solo sob sistemas de manejo de elevado nível tecnológico**. 2009. 172 f. Tese (Doutorado em Sistemas de Produção)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

OLIVEIRA, J. C. M.; VAZ, C. M. P.; REICHARDT, K. Efeito do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades físicas de um Latossolo Vermelho escuro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n.1, p. 50-55, 1995.

PAIVA, A. O.; FARIA, G. E. Estoque de carbono do solo sob cerrado sensu stricto no Distrito Federal, Brasil. **Revista Tropica**, Ciências Agrárias e Biológicas, v. 1, n. 1, p. 59, 2007.

PAULA, T. A.; VALLE, C. M. Quantificação do estoque de carbono no solo e a mitigação da mudança climática. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA- CONNEPI, 2., 2007, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2007. p. 1-8. Disponível em:

<http://www.redenet.edu.br/publicacoes/arquivos/20080220_101451_MEIO-144.pdf>.

Acesso em: 20 jul. 2011.

PAULINO, A. F.; MEDINA, C. C.; AZEVEDO, M. C. B.; SILVEIRA, K. R. P.; TREVISAN, A. A.; MURATA, I. M. Escarificação de um Latossolo Vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 911-917, 2004.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M. M.; DIAS, M. S. GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 521-529, 2001.

PIMENTEL-GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

PRADO, H.; PADUA JUNIOR, A. L. GARCIA, J. C.; MORAIS, J. F. L.; CARVALHO, J. P.; DONZELLES, P. L. Solos e ambientes de produção. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundação- IAC, 2008. p. 179-204.

RAIJ, B. V; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1609-1623, 2007.

RAPASSI, R. M. A.; TARSITANO, M. A. A.; BOLONHEZI, A. C. Avaliação técnica e econômica de sistemas de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) na região oeste do estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 39, n. 10, p. 11-21, 2009.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S. B.; CORRÊA, G. B. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4. ed. Viçosa: Neput, 2002. 338 p.

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

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, n. 5, p. 1827-1835, 2008.

ROSCOE, R. Rediscutindo o papel dos ecossistemas terrestres no seqüestro de carbono. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v. 20, n. 2, p. 209-223, 2003.

SCAPARI, M. S.; BEUCLAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação- IAC, 2008. Cap. 2, p. 47 - 56.

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. 470-479, 2001.

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

SECCO, D.; DA ROS, C. O.; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 407-414, 2005.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fonológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, M. H.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2006. Cap. 2, p. 19-36.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

SILVA, J. M.; PASSOS, A. L. R.; BELTRÃO, F. A. S. Análise espacial da densidade, umidade e resistência mecânica do solo à penetração sob sistemas de cultivo. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 3, p. 103-118, 2009.

SILVA, M. A. Interação genótipo x ambiente e estabilidade fenotípica de cana-de-açúcar em ciclo de cana de ano. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 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**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 431-436, 2001.

SILVA; A. J. N. **Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar**. 2003. 120 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SMITH, P. Land use change and soil organic carbon dynamics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 81, p. 169-178, 2008.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CALVACANTE, I. H. L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 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. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 840-847, 2010b.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 1, 2010a.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n. 6, p. 937-944, 2004b.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 51-58, 2004a.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistências do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 229-235, 1991.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro - 1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-12, 2002.

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. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-60, 2004.

STUPIELLO, J. P. Pontas de cana: problema industrial? **Revista STAB**, Piracicaba, v. 18, n. 4, p. 12, 2000.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, n. 1, p. 45-94,

1985.

UNGER, W. P.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, n. 1, p. 759-766, 1994.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR- ÚNICA. **Produção de cana-de-açúcar no Brasil: dados e cotações- Safra, 2008/09.** [S.l.: s.n., 2010?] Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 25 jan. 2011.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA- UNESP. **Dados agrometeorológicos.** Ilha Solteira: UNESP/Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, 2009- 2010. Disponível em:<<http://www.agr.feis.unesp.br/marinodados.php>> Acesso em: 18 jan. 2011.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M. Variações nos estoques de carbono e emissões de gases efeito estufa em solos das regiões tropicais e subtropicais do Brasil: uma análise critica. **Informações Agronômicas**, São Paulo,v. 1, n. 130, p. 12-21 2010.

UTSET, A.; CID, G. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3-4, p.193-202, 2001.

VASCONCELOS A. C. M.; CASAGRANDE, A. A. Fisiologia do sistema radicular In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-açúcar.** Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação- IAC. 2008. Cap. 4, p. 79-98.

VASCONCELOS, A. C. M; GARCIA, J. C. Cana-de-açúcar: ambientes de produção. **Informações Agronômicas**, São Paulo,v. 1, n. 110, p. 1-5, 2005.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VAUCHAUD, G.; NIELSEN, D. R.; The use of cokriging with limited field observations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 1, p. 175-184, 1983.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.;

ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-53.

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

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 4, p. 1040-1048, 1991.

VITTI, A. C.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; ROSSETTO, R. Nitrogênio. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: FunAg, 2008. Cap. 10, p. 239-270.

WATSON, R. T.; NOBLE, I. R.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N. H.; VERARDO, D. J.; DOKKEN, D. J. **Land use, land-use change, and forestry: a special report of the IPCC**. Cambridge: IPCC: Cambridge University, 2000. 377 p.