

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**ANÁLISE LINEAR E ESPACIAL ENTRE ALGUNS
ATRIBUTOS PRODUTIVOS E TECNOLÓGICOS DA CANA-
DE-AÇÚCAR COM O pH DE UM ARGISSOLO VERMELHO
DE SUZANÁPOLIS (SP)**

CÉSAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA
Geógrafo

ILHA SOLTEIRA
ESTADO DE SÃO PAULO
FEVEREIRO/2012

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**ANÁLISE LINEAR E ESPACIAL ENTRE ALGUNS
ATRIBUTOS PRODUTIVOS E TECNOLÓGICOS DA CANA-
DE-AÇÚCAR COM O pH DE UM ARGISSOLO VERMELHO
DE SUZANÁPOLIS (SP)**

CÉSAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA
Geógrafo

Orientador: Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia –
UNESP - Campus de Ilha Solteira para a
obtenção do título de Doutor em Agronomia,
especialidade: Sistemas de Produção.

Ilha Solteira – SP
Fevereiro/2012

FICHA CATALOGRÁFICA

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

- L732a Lima, César Gustavo da Rocha.
Análise linear e espacial entre alguns atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar com o pH de um argissolo vermelho de Suzanápolis (SP) / César Gustavo da Rocha Lima. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2012
101 f. : il.
- Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção, 2012
- Orientador: Morel de Passos e Carvalho
Inclui bibliografia
1. Atributos químicos do solo. 2. Solos – Manejo. 3. Agroindústria canavieira.
4. Agricultura de precisão. 5. Geoestatística.



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise linear e espacial entre alguns atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar com o pH de um argissolo vermelho de Suzanópolis (SP)

AUTOR: CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA

ORIENTADOR: Prof. Dr. MOREL DE PASSOS E CARVALHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR 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

Profa. Dra. MARLENE CRISTINA ALVES
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. RAFAEL MONTANARI
Campus de Aquidauana / Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. ONÁ DA SILVA FREDDI
Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais / Universidade Federal de Mato Grosso

Data da realização: 27 de fevereiro de 2012.

DEDICO

Aos meus pais, *Dirceu Lima e Ione Soncini da Rocha Lima*.

À todos meus **familiares** e **amigos** que se mantiveram firmes ao meu lado.

AGRADEÇO

À **Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP**, pelo acolhimento e oportunidade de aprendizado.

Ao **Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho** pela paciência, compreensão, parceria e amizade.

À todo corpo docente da FEIS, UNESP.

E aos amigos e companheiros de jornada...

À todos vocês... obrigado!

LIMA, C. G. R. **Análise linear e espacial entre alguns atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar com o pH de um Argissolo Vermelho de Suzanópolis (SP)**. 2012. 101f. Tese (Doutorado em Agronomia - Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

RESUMO

Os índices de produtividade agrícola dependem primordialmente da capacidade produtiva dos solos. Deste modo, as práticas de manejo do solo objetivam modificações nas suas características físicas, químicas e biológicas, com vistas a proporcionar melhor condição ao desenvolvimento das culturas e conseqüentemente maior produtividade e qualidade do produto. No ano agrícola de 2009/2010, na Fazenda Valença I (Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar), município de Suzanópolis (SP), Brasil (20° 27' 33" S; 51° 08' 05" W), foram analisados, como atributos da cana-soca queimada a produtividade de colmos (TCH), a população de indivíduos por área (POP), teores de açúcares totais recuperáveis (ATR), sólidos solúveis totais (BRI), sacarose no caldo (POL), pureza aparente (PUR) e teor de fibra (FIB); e como atributos de um Argissolo Vermelho Distrófico, o pH (pH) sob diferentes metodologias e o Delta pH (DpH), em profundidade no perfil (0-0,20m; 0,20-0,40m; 0,80-1,00m). O objetivo foi avaliar as correlações lineares e espaciais entre os atributos da planta com os do solo, visando selecionar aqueles de melhor interação com a produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Para tanto, foi instalada uma malha geoestatística para a coleta de dados do solo e planta, contendo 118 pontos amostrais, numa área de aproximadamente 10,5ha. No geral, os atributos estudados seguiram padrões espaciais com boa definição, apresentando alcances entre 75,0-465,9m. As correlações lineares entre os atributos da planta com os do solo foram baixas, porém altamente significativas. Os de melhor correlação com a produtividade da cana (TCH) foram o pH em KCl (0,80-1,00m), o pH em CaCl₂ (0,80-1,00m), e o Delta pH (0,80-1,00m). Por outro lado, constatou-se uma maior explicação significativa da produtividade dada pela correlação linear múltipla entre TCH com POP, DpH₂ e pH_k 3. Do ponto de vista espacial houve boa resposta entre a produtividade de colmos (TCH) com o pH da camada de 0,20-0,40m do solo, permitindo inferir que o manejo químico de áreas específicas de maior acidez nesta camada proporcionará o incremento da produtividade de colmo da cana. O Delta pH do solo na camada de 0,80-1,00m apresentou apreciável interação tanto com a produtividade quanto com os atributos tecnológicos da cana, indicando que melhor qualidade química naquela camada proporciona melhor qualidade tecnológica do produto industrializável, com Pol e ATR mais elevados, porém, com uma menor tonelagem por hectare. O estudo do solo na camada mais profunda (0,80- 1,00m) permitiu concluir que os atributos avaliados apresentaram apreciável interação tanto com a produtividade de colmos (linear e espacialmente) quanto com os atributos tecnológicos da cana (espacialmente), permitindo a recomendação de manejo agrícola de áreas específicas para o local estudado. Por fim, para área avaliada, destacaram-se como os mais satisfatórios atributos do solo, com finalidade de manejo destinado ao incremento produtivo e qualitativo da cultura da cana-de-açúcar; no âmbito linear o pH em KCl na camada de 0,80-1,00m (produtividade); e espacialmente o pH em CaCl₂ na camada de 0,20-0,40m (produtividade) e o Delta pH na camada de 0,80-1,00m (qualidade tecnológica do produto industrializável).

Palavras-chave: Atributos químicos do solo. Manejo do solo. Agroindústria canavieira. Agricultura de precisão. Geoestatística.

LIMA, C. G. R. **Linear and spatial analysis between productive and technological attributes of sugarcane with the pH of a Red Ultisol in Suzanapolis (Sao Paulo state, Brazil)**. 2012. 101 f. Thesis (Doctor Degree in Agronomy - Systems of Production) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

ABSTRACT

The rate of agricultural productivity depends primarily on the productive capacity of soils. Thereby, handling practices with agricultural aim to modify your characteristics to physical, chemical and biological soil in order to provide better conditions for crop growth and hence productivity. The attributes of plant, in no-tillage sugarcane productivity (SP), population of individuals (PI), total recoverable sugars (TRS), total soluble solids (TSS), sucrose in the broth (SB), apparent purity (AP) and fiber (FIB); and chemicals of soil (hydrogenic potential-pH and Delta pH-DpH) depth (0-0,20m; 0,20-0,40m, 0,80-1,00m layers) in a Red Ultisol of Valencia I Farm (Vale do Parana S/A Alcohol and Sugar Industry), were analyzed in crop year of 2009/2010 in the Suzanapolis County, Sao Paulo State, Brazil (20° 27' 33" S; 51° 08' 05" W). The purpose was to study the linear and spatial correlations among the attributes (plant and soil), aiming to elect an index of soil chemical quality with good capacity to represent the productivity, particularly at high depths. A grid geostatistical to collect soil and plant attributes data was installed, with 118 sample points, in an area of 10,5 hectare. In the general, the studied attributes showed high to low variability, with good spatial performances, and ranges between 75,0 and 465,9 meters. The linear correlations between the sugarcane productivity (SP) with the soil attributes were low, but highly significant. Those of best correlations with SP were the pH in KCl (0,80-1,00m), pH in CaCl₂ (0,80-1,00m) and Delta pH (0,80-1,00m). However, there was a significant interaction given by the largest multiple linear correlations between sugarcane productivity, with the PI, Delta pH (0,20-0,40m), and pH in KCl (0,80-1,00m). From the spatial point of view there was good response from the productivity of cane (SP) with the pH of the second layer of the soil (0,20-0,40m), allowing inferring that the chemical management of specific areas of higher acidity provides increased productivity of the sugarcane. The Delta pH from 0,80-1,00m in the layer showed significant interaction with the productivity and with the technological components of the sugarcane, but in an antagonistic manner indicating that better chemical layer of soil that provides improved product quality (TRS and SB higher), but with a lower yield (t ha⁻¹). The study of soil in the deepest layer concluded that the attributes evaluated had considerable interaction with both the stalk productivity (linear and spatially) as the technology components of sugarcane (spatially) allowing recommendation of specific areas of agricultural management for the site studied. Finally, for the area evaluated, stood out as the most satisfying attributes of soil management for the purpose of increasing crop quality and yield of cane sugar: linear within the pH in KCl on layer of 0,80-1,00m (productivity); and spatially within the pH in CaCl₂ on the 0,20-0,40m layer (productivity) and Delta pH from 0,80-1,00m layer (technological quality of the product).

Keywords: Soil chemical attributes. Soil management. Sugarcane industry. Precision agriculture. Geostatistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo teórico de um semivariograma com dependência espacial.	23
Figura 2 - Modelo do comportamento de um semivariograma cruzado de correlação indireta (negativa [a]) e direta (positiva [b]).	24
Figura 3 - Precipitação pluvial e médias térmicas para região de Suzanápolis (SP).....	28
Figura 4 - Curva de resistência à penetração (a), e valores de umidade gravimétrica (b) em profundidade no perfil do solo na área de estudo.	30
Figura 5 - Aspecto geral do talhão de coleta das amostras após queima da palhada da cana.	31
Figura 6 - Croqui da malha de dados experimental.....	32
Figura 7 - Detalhe da área amostral (a), de um dos pontos da malha geoestatística (b), da coleta (c) e transporte da planta (d), da coleta do solo (e), e da preparação inicial do solo para análise (f).	32
Figura 8 - Modelo teórico de semivariograma não-estacionário (a), e estacionário (b).	36
Figura 9 - Equações de regressão entre atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar (TCH vs POP, ATR vs POP, e POL vs POP) em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).....	50
Figura 10 - Equações de regressão entre atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar (ATR vs BRI, POL vs BRI, e FIB vs BRI) em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).....	51
Figura 11 - Equações de regressão da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).....	52
Figura 12 - Equações de regressão da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).....	54

Figura 13 - Equações de regressão da população de plantas de cana-de-açúcar (POP) em função do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).....	55
Figura 14 - Equações de regressão de atributos tecnológicos da cana-de-açúcar (POP e ATR) em função do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).....	56
Figura 15 - Equações de regressão de atributos tecnológicos da cana-de-açúcar (POL e BRI) em função do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).....	57
Figura 16 - Semivariogramas simples ajustados para os atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).....	63
Figura 17 - Semivariogramas simples ajustados para os atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).....	64
Figura 18 - Semivariogramas simples ajustados para os atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).....	65
Figura 19 - Validações cruzadas ajustadas para os atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).....	67
Figura 20 - Validações cruzadas ajustadas para os atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).....	68
Figura 21 - Validações cruzadas ajustadas para os atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).....	69
Figura 22 - Mapas de krigagem dos atributos produtivos e tecnológicos (ETCH e ATR) da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).....	71
Figura 23 - Mapas de krigagem dos atributos tecnológicos (BRI, POL e FIB) da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).....	72
Figura 24 - Mapas de krigagem dos atributos do pH (0-0,20m: pHa1, pHk1, pHc1 e DpH1) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	73

Figura 25 - Mapas de krigagem dos atributos do pH (0,20-0,40m: pHa2, pHk2, pHc2 e DpH2) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	73
Figura 26 - Mapas de krigagem dos atributos do pH (0,80-1,00m: ξ pHa3, ξ pHc3 e DpH3) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	75
Figura 27 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do Brix em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	79
Figura 28 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do ATR em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	79
Figura 29 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do teor de Fibras em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	80
Figura 30 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do Pol em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	81
Figura 31 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) do ATR em função do Brix em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	82
Figura 32 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) do Pol em função do Brix em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	83
Figura 33 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do pH em CaCl ₂ (0,20-0,40m) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	86
Figura 34 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do Delta pH (0,80-1,00m) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	86

- Figura 35 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do pH em KCl (0,20-0,40m) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP)..... 87
- Figura 36 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) do ATR da cana-de-açúcar em função do Delta pH (0,80-1,00m) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP)..... 88
- Figura 37 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) do POL da cana-de-açúcar em função do Delta pH (0,80-1,00m) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP)..... 89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição morfológica e dados analíticos do solo estudado.	29
Quadro 2 - Análise química do solo da área de estudo.	30
Quadro 3 - Análise descritiva dos atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar, e do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	40
Quadro 4 - Matriz de correlação linear simples entre atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar, e do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	46
Quadro 5 - Equações de regressão simples e coeficientes do ajuste entre atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	49
Quadro 6 - Equação de regressão simples e coeficientes do ajuste de atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar com alguns atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	52
Quadro 7 - Análise de variância da regressão da produtividade de colmos de cana-de-açúcar (TCH) em função do conjunto de atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	59
Quadro 8 - Análise de variância da regressão da produtividade de colmos de cana-de-açúcar (TCH) em função do conjunto de atributos da planta e do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	60
Quadro 9 - Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar, e para os atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	62
Quadro 10 - Parâmetros dos semivariogramas cruzados e das validações cruzadas ajustados entre atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar, e atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR	16
2.1.1	Características gerais da cultura	16
2.1.2	Aspectos históricos	17
2.1.3	Aspectos produtivos e tecnológicos.....	17
2.1.4	Variedade RB 855453	19
2.2	ATRIBUTOS DA REAÇÃO QUÍMICA DO SOLO	19
2.2.1	pH do solo	19
2.2.2	Delta pH do solo	20
2.3	A GEOESTATÍSTICA E SUA APLICAÇÃO NA PESQUISA AGRONÔMICA	21
2.3.1	Conceitos básicos da análise geoestatística	21
2.3.2	O uso e aplicabilidade da geoestatística nos estudos agronômicos.....	25
3	MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ORIGEM DOS DADOS	28
3.2	IMPLANTAÇÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	30
3.3	IMPLANTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MALHA EXPERIMENTAL DE CAMPO	31
3.4	COLETA DOS DADOS E METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS PESQUISADOS	33
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA E GEOESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS PESQUISADOS	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS	39
4.1.1	Variabilidade dos atributos.....	39
4.1.1.1	<i>Atributos da planta</i>	39
4.1.1.2	<i>Atributos do solo</i>	41
4.1.2	Valores médios dos atributos	42

4.1.2.1	<i>Atributos da planta</i>	42
4.1.2.2	<i>Atributos do solo</i>	44
4.2	ANÁLISE DE REGRESSÃO ENTRE OS ATRIBUTOS	45
4.2.1	Regressão linear simples	45
4.2.1.1	<i>Matriz de correlação linear simples entre os atributos</i>	45
4.2.1.1.1	<i>Atributos da planta versus atributos da planta</i>	45
4.2.1.1.2	<i>Atributos da planta versus atributos do solo</i>	47
4.2.1.1.3	<i>Atributos do solo versus atributos do solo</i>	48
4.2.1.2	Regressão simples entre os atributos estudados	49
4.2.1.3	Regressão linear múltipla entre os atributos estudados (stepwise)	59
4.3	ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS	61
4.3.1	Análise semivariográfica simples	61
4.3.1.1	<i>Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos</i>	61
4.3.1.2	<i>Validação cruzada dos semivariogramas simples ajustados</i>	66
4.3.1.3	<i>Mapas de krigagem dos atributos</i>	70
4.3.2	Análise semivariográfica cruzada	76
4.3.2.1	<i>Ajuste dos semivariogramas cruzados, validações cruzadas e mapas de cokrigagem dos atributos</i>	76
5	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

Os índices de produtividade das culturas agrícolas dependem da capacidade produtiva dos solos. Desta forma, as práticas de manejo objetivam modificações nas características físicas, químicas e/ou biológicas do solo com vistas a proporcionar melhores condições ao desenvolvimento das culturas.

A variabilidade dos atributos químicos do solo representa um dos fatores de oscilação da produtividade agrícola, uma vez que eles sofrem sucessivas alterações provocadas pelas diversas atividades de manejo e, também pelos processos naturais de erosão e de lixiviação. Deste modo, em sistemas intensivos de cultivos como o da cana-de-açúcar, é fundamental se conhecer e entender as correlações entre os atributos produtivos e tecnológicos da planta com os do solo, de forma a contribuir não apenas com a redução dos custos por meio de manejos pontuais, mas também como forma de proporcionar o aumento da produtividade da cultura, bem como da qualidade do material colhido.

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), devido à sua múltipla utilidade, é uma gramínea de grande relevância econômica para o Brasil. O seu maior interesse está no uso como matéria prima na produção de açúcar e álcool. Assim, o Brasil tem se destacado já há anos como o maior produtor mundial da cultura, sendo o estado de São Paulo, responsável por mais da metade da produção brasileira. Deste modo, impulsionando a pesquisa acadêmica sobre as diferentes vertentes que envolvem o sistema produtivo da cana-de-açúcar, principalmente ao que diz respeito à agricultura de precisão pelo uso da geoestatística.

A geoestatística analisa a dependência espacial de dados georreferenciados, aos quais é ajustado o semivariograma, representado pelo gráfico da semivariância em função das distâncias entre observações. A partir dele pode-se confeccionar mapas para cada atributo pesquisado, do solo ou da planta, que representa a variabilidade espacial dos dados. Contudo,

havendo afinidade entre as dependências espaciais de dois atributos quaisquer, modelada pelo semivariograma cruzado, pode-se obter o mapeamento de um atributo principal, de difícil obtenção e de maior interesse, em função de um atributo secundário. Assim, a partir de mapeamentos de correlações existentes, diretas e/ou indiretas, entre os atributos do solo e a produtividade das culturas, pode-se efetuar a execução de determinadas práticas de forma pontua, direcionada e com taxas variáveis.

A geoestatística tem sido bastante aplicada na avaliação da variabilidade e dependência espacial dos atributos do solo e da planta, tendo revelado a influência dos atributos do solo sobre o padrão da distribuição espacial da produtividade vegetal. Assim, sabe-se que a planta atua de forma a responder, sobretudo quando sua produtividade é analisada espacialmente, de forma positiva e/ou negativa, conforme o comportamento da variabilidade dos atributos do solo.

Deste modo, diante do exposto, e, tendo em vista a crescente incorporação de novas áreas agrícolas para o sistema sucroalcooleiro no Brasil e a importância de se produzir cada vez mais (e se ter parâmetros que interagem) por área, a presente pesquisa, teve como objetivo analisar: a) as correlações lineares e espaciais existentes entre atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar com o Delta pH e o pH do solo pesquisado sob diferentes metodologias de avaliação, e em profundidade; b) avaliar o comportamento e as interações lineares-espaciais dos atributos do solo na camada menos impactada pelo manejo agrícola (0,80-1,00m) com os atributos da cana soca queimada bisada; e, c) determinar dentre os atributos do solo avaliados, aquele ou aqueles de melhor interação com os atributos da planta, de modo a evidenciar zonas específicas de manejo do pH do solo intimamente associadas a produtividade e a qualidade tecnológicas da cultura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

2.1.1 Características gerais da cultura

Originária do Sudoeste Asiático (Nova Guiné, Java e também Índia), a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma gramínea pertencente à família Poaceae (Gramineae) que possui grande importância econômica para o Brasil. Tal fato deve-se à sua múltipla utilidade, podendo ela ser empregada in natura: sob a forma de forragem, para alimentação animal; ou como matéria-prima: para a produção de rapadura, melado, aguardente, e principalmente açúcar e álcool. Seus resíduos também possuem utilidade econômica, sendo, o vinhoto transformado em fertilizante e o bagaço em combustível (FAHL et al., 1998; MOZAMBANI et al., 2006; TAUPIER; RODRÍGUEZ, 1999).

Como características fisiológicas, a espécie *Saccharum officinarum* L. apresenta-se como uma planta de ciclo semi-perene, com elevado teor de açúcar e baixa porcentagem de fibra. É uma planta de clima tropical-subtropical com adaptação a alta intensidade de luz, elevadas temperaturas e relativa escassez de água, encontrando excelentes condições para seu desenvolvimento em várias regiões do Brasil. Possui a maior parte de seu sistema radicular concentrado superficialmente (dependendo da variedade, aproximadamente 85% nos primeiros 0,50m e 60% entre os primeiros 0,20-0,30m) (MOZAMBANI et al., 2006; SEGATO et al., 2006a). Ainda, de acordo com Staut (2006), o sistema radicular da cana-de-açúcar possui uma diferenciação em relação à maioria das culturas anuais. Por possuir vários ciclos (de cinco a sete anos), as suas raízes, ao longo do tempo, podem atingir maiores profundidades, passando a ter uma maior relação com as condições físico-químicas e biológicas destas camadas, desde que não haja limitação mecânica do solo.

2.1.2 Aspectos históricos

A cana-de-açúcar é uma planta que vem sendo cultivada no Brasil à quase 500 anos, porém a sua grande expansão (na década de 70) deveu-se principalmente à implementação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que objetivou reduzir a dependência do petróleo. Neste período o Brasil liderou o mais importante programa de substituição de combustível fóssil por combustível renovável, com reflexo positivo para toda sua matriz energética. Recentemente, após um período de desestímulo, o álcool de cana-de-açúcar voltou a atrair as atenções, como alternativa energética renovável. Assim, o país tem se destacado já há algum tempo como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com áreas plantadas em expansão por todo o país, tendo nela uma de suas principais culturas agrícolas (FIGUEIREDO, 2008; VITTI; MAZZA, 2002). Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2011), o setor agroindustrial canavieiro nacional processou cerca de 623,9 milhões de toneladas de colmos na safra 2010/11, ficando o destaque para o estado de São Paulo, que continua representando mais da metade da produção nacional (52,6%), com uma área em torno de 4,4 milhões de hectares. Essa expansão tem motivado e direcionado cada vez mais as pesquisas agrônômicas na busca de novas variedades que melhor se adaptem às diferentes condições edafoclimáticas brasileiras, bem como nas melhores condições de manejo de solo para um ideal desenvolvimento da cultura.

2.1.3 Aspectos produtivos e tecnológicos

De acordo com Câmara (1993), o processo industrial canavieiro visa três objetivos primordiais: produtividade, qualidade e longevidade do canavial. No primeiro, procura-se obter uma alta produção de colmos industrializáveis por área. O segundo objetivo, diz respeito à riqueza de açúcar da fitomassa industrializável, que associado à produtividade reflete na produção de unidade/área. E, o terceiro objetivo está relacionado ao desempenho econômico, dessa forma, visa-se aumentar o número de cortes, sem afetar muito as quedas na produtividade, por maior tempo possível entre as reformas do canavial.

Por outro lado, a produtividade da cana-de-açúcar pode oscilar muito em função de inúmeros fatores: a variedade escolhida, maturação, manejo da cultura, e principalmente em função das características edafoclimáticas do local (CÉSAR et al., 1987; FAHL et al., 1998). Assim, no Brasil, a produtividade média de cana-de-açúcar, na safra 2010/2011, variou em torno de 77 t ha⁻¹ (CONAB, 2011). Outras fontes de pesquisas têm indicado médias gerais,

inclusos folhas secas e ponteiros, em torno de 80 t ha^{-1} , porém em situações ideais de clima e solo, com um adequado manejo e escolha da variedade certa, este valor pode atingir cifras da ordem de 150 t ha^{-1} (GROSSI; NÓBREGA, 2006; OLIVEIRA et al., 2001). Ainda, segundo Fahl et al. (1998) algumas regiões do estado de São Paulo (Ribeirão Preto e Jaú) apontaram média de produtividade em torno de 85 t ha^{-1} em cinco cortes, sendo recomendando a reforma do canavial quando esta indicar valores inferiores a 55 t ha^{-1} .

Tão importante quanto proporcionar o aumento da produtividade é produzir matéria de excelente qualidade, uma vez que a composição química e tecnológica da cana também tem forte influencia do ambiente de produção e do manejo do solo (SEGATO et al., 2006b). Deste modo, a qualidade dos atributos tecnológicos, tais como: açúcares totais recuperáveis (ATR), sólidos solúveis totais (BRIX), sacarose no caldo (POL), pureza aparente (PUR) e fibra (FIB), são fatores tão importantes quanto à produtividade da planta, uma vez que poderão influenciar o preço final do produto pago pela indústria (Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool - CONSECANA, 2006; TASSO JÚNIOR, 2007).

De acordo com Fernandes (2000), o ATR é um dos atributos mais importantes para a indústria sucroalcooleira, pois se refere à quantidade de sacarose que pode ser recuperada na forma de açúcar cristal. Segundo Segato et al. (2006b), os valores do ATR variam muito, porém um valor médio tem sido considerado como sendo de “cana padrão”, aplicados em contratos, o qual está em torno de 122 kg t^{-1} , sendo que a planta pode apresentar ATR em torno de $165\text{-}170 \text{ kg t}^{-1}$.

O BRIX é um atributo tecnológico considerado como sendo um dos de maior facilidade de determinação. Refere-se, de modo geral, à porcentagem de sólidos solúveis em uma solução, como o caldo. Por consenso da indústria sucroalcooleira paulista, recomenda-se que a cana a ser industrializada, tomando como ponto de maturação da planta para o corte, apresente uma solução com BRIX de no mínimo 18% de sólidos solúveis (FERNANDES, 2000; FRANCO, 2003). Já o POL do caldo representa a porcentagem aparente de sacarose contida numa solução de açúcares. Valores recomendados de POL estão em torno de 14% (SEGATO et al., 2006b). Por outro lado, de acordo com Fernandes (2000), no estado de São Paulo, a cana considerada madura apresenta POL variando de 14,4-15,3% (do início ao decorrer da safra).

A PUR é a porcentagem de açúcares contida nos sólidos, deste modo, alta pureza significa melhor qualidade da matéria prima. Valores recomendados estão em torno de 85%, podendo ser recusadas nas unidades industriais a matéria prima que apresentar valores abaixo de 75% (CONSECANA, 2006; SEGATO et al., 2006b). De acordo com Fernandes (2000) os

valores de recomendação para o estado de São Paulo, para PUR, variam de 80% a 85% do início ao decorrer da safra. Finalmente, a FIB refere-se em si à matéria-prima, pois é a parte sólida da planta (material que é entregue às usinas, formada por celulose mais as impurezas vegetais e minerais). Utiliza-se a FIB como parâmetro para avaliar a qualidade da matéria prima conforme normas CONSECANA, sendo os valores recomendados em torno de 11-13%, conforme aponta Segato et al. (2006b).

2.1.4 Variedade RB 855453

A escolha da variedade de cana-de-açúcar para o setor agroindustrial tem grande influência para manutenção dos ganhos de produtividade. De acordo com o censo varietal, atualmente, as variedades RB ocupam mais de 50% dos canaviais do País, chegando em algumas regiões a representar até 70%. Nos aspectos gerais, a variedade RB 855453 destaca-se por ser resistente à maioria das fitossanidades e por possuir as seguintes características: colmos eretos e medianamente espalhados, com diâmetro de médio a grosso, cor verde amarelado, sendo de difícil tombamento, precocidade, alta produtividade agrícola (responsiva), ótimo brotamento da soca (tanto queimada quanto mecanizada crua), perfilhamento médio (tanto cana soca quanto cana planta), teor de sacarose muito alto, médio teor de fibras, e alta exigência ambiental (HOFFMANN et al., 2008).

2.2 ATRIBUTOS DA REAÇÃO QUÍMICA DO SOLO

2.2.1 pH do solo

O pH do solo é sem dúvida um dos atributos químicos de maior influência no crescimento e desenvolvimento das plantas, uma vez que está diretamente ligado à solubilidade, concentração, disponibilidade e capacidade de retenção da maioria dos nutrientes essenciais às culturas (CANELLAS et al., 1999; RAIJ, 1991; SOUZA et al., 2007a). É um atributo de fácil obtenção e de acordo com Wutke e Camargo (1975) o pH pode ser considerado aquele atributo que isoladamente reflete um conjunto complexo de reações no sistema solo que possibilita a mais ampla inferência sobre possíveis problemas com a fertilidade do solo ou mesmo problemas de toxicidade principalmente pela concentração de alumínio. Deste modo, sendo um eficiente indicador da qualidade ambiental do solo, uma vez que em inúmeros trabalhos tem apresentado interação, tanto direta (positiva) quanto indireta

(negativa) entre causa efeito, com o desenvolvimento das culturas agrícolas, tanto no âmbito linear como por meio da análise espacial (BEZERRA, 2008; COSTA, 2006; LIMA et al, 2010; MIGUEL, 2010). Assim, apesar de a cana-de-açúcar ser bastante tolerante à acidez e alcalinidade, para que se alcancem elevados índices de produtividade deve-se observar valores de pH satisfatórios que permitam um bom desenvolvimento das plantas. Para Raij (1991) valores entre 5,5 e 6,5 são favoráveis à disponibilidade da maioria dos nutrientes essenciais.

O pH do solo pode ser determinado por diferentes metodologias, e apesar das diferentes técnicas empregadas Wutke e Camargo (1975) afirmam que não pode-se pretender que tal análise revele exatamente a concentração hidrogeniônica que se encontram no solo uma vez que a mesma é influenciada e varia com as partículas do solo, umidade, tipo de sais, concentração de gás carbônico da atmosfera no solo, etc. Porém, sua determinação fornece informações ímpares de correlação com a nutrição e o desenvolvimento das plantas.

A utilização das diferentes metodologias, principalmente para recomendação de correção do solo varia muito de estado para estado, e também principalmente em função do tipo de solo avaliado, considerando a metodologia mais satisfatória aos seus objetivos. O pH determinado em água, é uma das medidas mais comuns, porém pode fornecer valores bastante instáveis, isto porque, esta determinação é mais afetada por pequenas quantidades de sais que podem ocorrer nas amostras de solo, em consequência de adubações, períodos de seca ou da mineralização que ocorre em amostras de solo úmidas acondicionadas em sacos plásticos (NOLLA; ANGHINONI, 2004; QUAGGIO, 1983; RAIJ; QUAGGIO, 1983).

A determinação do pH em CaCl_2 , permite obter resultados mais consistentes do que a determinação do pH em água. Segundo Raij et al. (1987), as vantagens na utilização deste método é que o pH medido torna-se pouco afetado pela relação solo:solução e tem efeito reduzido dos sais que interferem na medida. De acordo com Wutke e Camargo (1975) e Mello et al. (1983), o pH em KCl é quase sempre menor que o obtido em água uma vez que o K^+ extrai o Al^+ e alguns H^+ trocáveis e ainda apresenta algumas vantagens em relação ao determinado em água, pois os resultados são menos afetados pela variação da concentração de sais do solo oferecendo resultados mais constantes para um mesmo solo amostrado.

2.2.2 Delta pH do solo

O Delta pH do solo refere-se à diferença entre o pH determinado em KCl e aquele determinado em água. Ele indica, conforme Fearnside e Leal Filho (2002), o estado da carga

elétrica de um sistema óxido, ou seja, quando o pH em KCl for inferior ao pH em água, o delta pH é negativo e indica a predominância de carga negativa (>CTC). Já quando o pH em KCl for superior ao pH em água, o delta pH será positivo e indicará predominância de carga positiva (>CTA), retendo mais ânions. Por outro lado, quando o valor de pH em água for igual ao valor de pH em KCl, indica que o balanço de cargas é nulo. Desta forma retendo cátions e ânions em pequenas quantidades, porém em mesma proporção. Ainda, algumas referências como a de Prado et al. (2011) tem relatado que o delta pH tem sido um atributo freqüentemente usado como indicador do conteúdo de matéria orgânica no solo.

Apesar dessas inferências possibilitadas pela avaliação do Delta pH, a literatura ainda conta com poucos trabalhos e estudos sobre a correlação entre a variabilidade da produtividade das plantas com este atributo do solo (ALBUQUERQUE et al., 2005; COSTA, 2006), principalmente no âmbito da variabilidade e dependência espacial (VIEIRA, 1997).

2.3 A GEOESTATÍSTICA E SUA APLICAÇÃO NA PESQUISA AGRONÔMICA

Sabe-se que interações entre os diferentes elementos de formação do solo fazem com que a sua variabilidade espacial (características físicas, químicas e/ou biológicas), seja algo inquestionável, portanto altamente relevante nos estudos agronômicos. Deste modo, quando um atributo do solo varia em um determinado tempo/espço e obedece algum grau de organização, expressa pela dependência espacial, o modo de análise mais adequado e capaz de contemplar o entendimento desta situação está pautada na utilização da geoestatística (PONTES, 2002; VIEIRA, 2000; VIEIRA et al., 1983; TRANGMAR et al., 1985).

2.3.1 Conceitos básicos da análise geoestatística

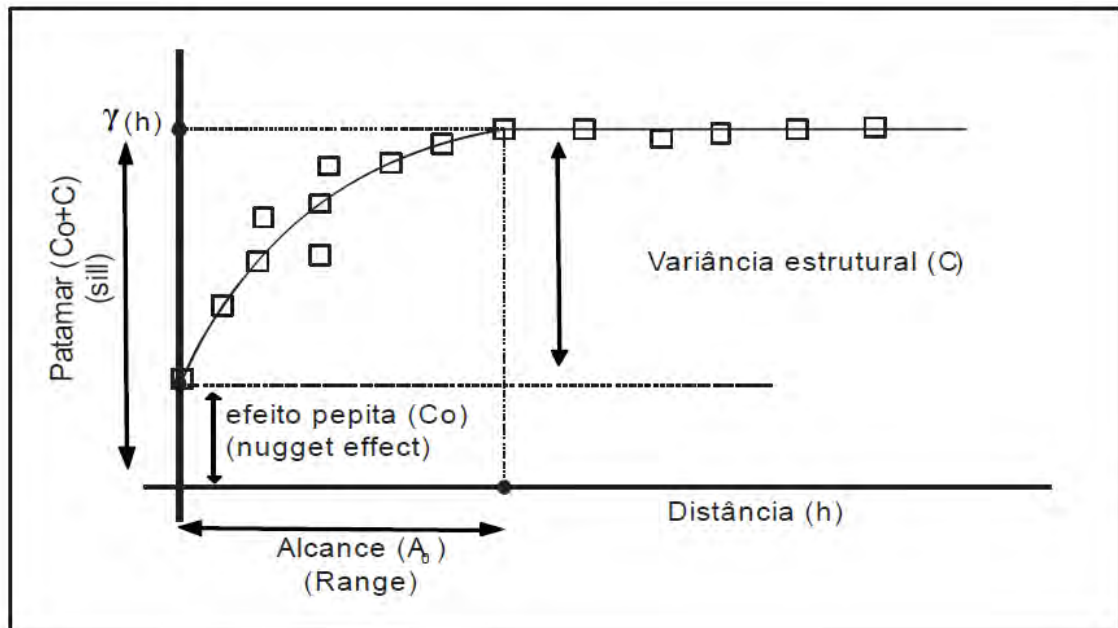
De acordo com Ribeiro Júnior (1995), pode-se dizer que a geoestatística é considerada um grupo ou uma modalidade estatística composta por procedimentos que podem ser aplicados a alguns modelos analíticos quando os dados são georreferenciamente amostrados no tempo/espço. Este grupo estatístico tem sido aplicado já há algum tempo para a avaliação da variabilidade espacial de atributos de interesse em ciências agrárias o que tem possibilitado a interpretação de resultados com base na estrutura da sua variabilidade natural, como constatado nos trabalhos de Lima (2007), Montanari (2009) e Miguel (2010), contribuindo muito para a compreensão e o entendimento das diferentes interações entre os atributos do solo e o desenvolvimento das culturas.

A análise do grau da dependência espacial entre as amostras vizinhas de uma determinada rede de coleta de dados é obtida por meio de autocorrelações entre elas, as quais são medidas por meio do semivariograma. Este que é a ferramenta de suporte às técnicas de mapeamento por interpolação de dados (krigagem), ou seja, em outras palavras, o semivariograma define parâmetros necessários para estimativa de valores em locais não amostrados dentro da área de coleta de dados, por meio da técnica de krigagem (VIEIRA, 2000). Deste modo, quando detectada dependência espacial pelo semivariograma e aplicado a técnica de krigagem, torna-se possível representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no tempo/espaço por meio de um mapa de fácil interpretação.

Quando são amostrados e avaliados inúmeros atributos do solo e da planta em uma mesma área de abrangência, torna-se de fundamental importância às propostas da pesquisa agrônômica, a aplicação do semivariograma cruzado, uma vez que ele permite verificar o relacionamento ou a dependência espacial entre as variabilidades espaciais de duas variáveis de dados espacialmente medidos, podendo ser: 1) variável dependente vs variável independente; 2) variável dependente vs variável dependente; e 3) uma variável independente vs variável independente. Desse modo, essa dependência espacial, quando detectada pelo semivariograma cruzado, pode ser também representada por meio de mapas, utilizando-se a técnica de cokrigagem (LIMA, 2007; MONTANARI, 2009), que de modo geral pode ser considerada uma extensão multivariada da krigagem (univariada) (VIEIRA, 2000). Sendo que, nesta análise multivariada a ausência de alguns dados não apresenta sérios obstáculos uma vez que, segundo Landim et al. (2002), o método é sugerido principalmente em situações onde uma das variáveis estudadas apresenta-se sub-amostrada.

De acordo com Robertson (2004), o modelo semivariográfico teórico ideal (Figura 1), possui como parâmetros principais: o efeito pepita (C_0), o patamar (C_0+C), a variância estrutural (C), e o alcance (A_0). Deste modo, o efeito pepita corresponde à variabilidade não explicada, medindo duas parcelas da variabilidade observada, sendo elas: a) aquela não captada ou abrangida pela rede amostral; e b) a da variabilidade induzida por erros não sistemáticos de amostragem (durante a coleta, análise em laboratório, etc.). Quando o efeito pepita apresentar valor constante e igual ao valor do patamar, ocorre o efeito pepita puro, que representa a dependência espacial nula. Assim, os dados amostrados não podem ser analisados e/ou explicados pelas técnicas e ferramentas da geoestatística. Considera-se que nesse caso, a dependência espacial, quando existir, será manifestada à uma distância ou tempo de cobertura menor do que o menor espaçamento entre as amostras que foram dispostas na amostragem (GUIMARÃES, 2004; PONTES, 2002; SOARES, 2000).

Figura 1 - Modelo teórico de um semivariograma com dependência espacial.



Fonte: Braga (2011).

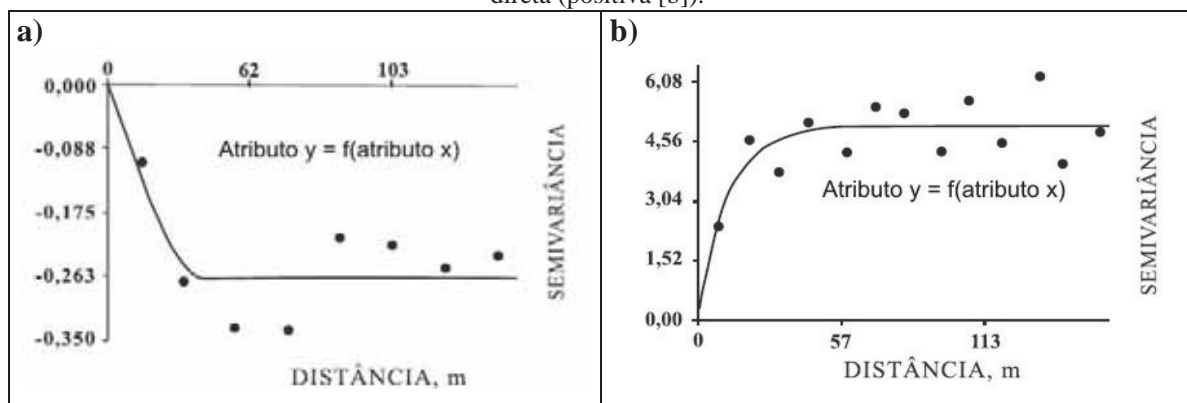
De acordo com Vieira (2000), o patamar é o valor onde ocorre a estabilização da semivariância da amostra, sendo atingido no momento em que a variância dos dados se torna constante com a distância entre as amostras. Em outras palavras, considera-se que ele corresponde à variância total dos dados da estatística convencional. Contudo, alguns atributos podem apresentar semivariogramas sem patamar definido. Durante a análise semivariográfica, quando ocorre tal situação, considera-se que o semivariograma apresenta uma tendência em seus dados. Nesse caso, o patamar se houver, poderá ocorrer há distâncias não contempladas pela rede amostral, sugerindo uma nova rede de coleta de dados, ou pode-se ainda realizar a aplicação de algumas técnicas na tentativa de retirada da tendência dos dados, testando assim, outra vez a estacionaridade da variável estudada.

A variância estrutural representa a diferença entre o nível definido pela semivariância inicial (efeito pepita) e pelo patamar. Assim, diferentemente do efeito pepita (considerado o erro), adota-se que a variância estrutural corresponde ao acerto. Já ao alcance refere-se à distância atingida pelo patamar, demonstrando, no geral, o limite de grandeza da dependência espacial do atributo estudado. Ele representa a distância máxima em que os pontos amostrais estão correlacionados entre si, por meio da dependência espacial. Assim, medidas localizadas à distâncias maiores do que o alcance tem distribuição aleatória no espaço, sendo independentes entre si (PONTES, 2002; RODRIGUES, 2002; VIEIRA, 2000). Ainda, de acordo com Souza (1992), o alcance também é referência na definição do raio máximo de ação na interpolação por krigagem, onde os pesos utilizados nessa ponderação podem afetar

os valores estimados. O seu conhecimento é de grande importância para a agricultura de precisão, uma vez que possibilita alimentar programas computacionais de implementos agrícolas coordenados via satélite, permitindo realizar a aplicação de insumos com taxas variáveis no terreno, conforme necessidade pontual (VIEIRA et al., 1991).

Já o modelo de semivariograma cruzado (Figuras 2a,b) teria a mesma aparência do semivariograma simples (Figura 1), mas com significados diferentes uma vez que envolve o resultado das diferenças de uma dupla de atributos distintos.

Figura 2 - Modelo do comportamento de um semivariograma cruzado de correlação indireta (negativa [a]) e direta (positiva [b]).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Neste caso, o alcance representa a máxima distância de dependência espacial entre as variáveis ao passo que o patamar, se houver, deve aproximar-se do valor da covariância entre as duas variáveis, podendo haver semivariogramas cruzados apresentando valores negativos em caso de correlação inversa entre causa-efeito (Figura 2a) e valores positivos no caso de correlação direta entre causa-efeito (Figura 2b).

Segundo Lima (2007), sendo respectivamente a interpolação por krigagem e por cokrigagem a representação da dependência dos atributos e da correlação espacial entre atributos, entende-se que ambas estão fortemente associadas aos modelos semivariográficos ajustados, os quais podem ser avaliados por meio da validação cruzada. Sendo esta ferramenta de análise (validação cruzada), uma última etapa da análise geoestatística. Em sua avaliação, cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido e seu valor estimado por meio da krigagem/cokrigagem como se ele não existisse. Deste modo, um gráfico de valores estimados vs valores observados é construído, para todos os pontos. Do conjunto de valores estimados e valores observados, calculam-se dados estatísticos básicos (média, variância dos desvios), com o objetivo de validar o modelo escolhido para o semivariograma (SOARES,

2000). Assim, aquela validação que apresentar os melhores parâmetros indicará os melhores ajustes semivariográficos e os melhores mapeamentos.

2.3.2 O uso e aplicabilidade da geoestatística nos estudos agrônômicos

A geoestatística tem sido amplamente utilizada e difundida como uma excelente ferramenta na pesquisa agrônômica, contribuindo muito para a compreensão e o entendimento das diferentes interações (espaciais/temporais) entre os atributos do solo e o desenvolvimento das culturas, principalmente no que se refere aos atributos químicos, os quais segundo Cora & Beraldo (2006) tendem a não variar, espacial e temporalmente, ao acaso, e sim de modo coordenado com uma continuidade aparente. Ainda de acordo com Salviano et al. (1998) existe uma tendência das plantas a responder espacialmente aos atributos químicos do solo. Deste modo, com base nos parâmetros e informações de ajustes de semivariogramas simples e cruzados, e as representações gráficas (krigagens e cokrigagens) como resultado final da análise espacial, a geoestatística têm sido uma importante aliada para o manejo pontual em uma determinada área agrícola, proporcionando economia de insumos e aumento de produtividades das culturas.

O uso da geoestatística na avaliação da variabilidade e correlação espacial tem sido aplicado com longa data, apresentando importantes resultados para a pesquisa agrônômica, como pode ser observado nos seguintes trabalhos: Sanches et al. (2005), trabalhando com cafeeiro, encontraram dependência espacial moderada a forte para as propriedades físicas e químicas do solo bem como para a produtividade de café; Kitamura et al. (2007) ao analisar a variabilidade de atributos granulométricos do solo e do feijoeiro de forma a caracterizar suas dependências espaciais e as correlações, linear e espacial, entre eles, observaram interações significativas entre os atributos avaliados. De acordo com seus resultados, as evidências mostraram indicativos de que mesmo os baixos valores de coeficiente de correlação linear, entre dois atributos quaisquer, não invalidam a hipótese de ocorrência de apreciável correlação espacial entre eles; Bezerra (2008) em seu trabalho analisou a variabilidade e a correlação espacial entre atributos químicos do solo com a produtividade do milho safrinha e constatou a interação espacial entre produtividade de matéria seca do milho com atributos químicos estudados, sendo que alguns desses atributos químicos apresentaram-se como forte indicadores da qualidade do solo sendo de boa representatividade para estimar a produtividade da forragem na área estudada; Guedes Filho (2009) correlacionou a produtividade de diferentes culturas com atributos físicos e químicos do solo, na tentativa de

obter informações mais completas em relação ao manejo da produção agrícola. Dentre suas conclusões citou que a variabilidade espacial encontrada para os atributos químicos justifica o manejo diferenciado quanto à aplicação de calcário e fertilizante. Ainda seus resultados demonstraram que houve relação espacial entre a produtividade das culturas e os atributos químicos do solo, indicando que a área pode ser dividida em zonas de manejo diferenciadas; Lima et al. (2010) analisando a variabilidade e a dependência espacial entre atributos químicos de um Latossolo Vermelho do cerrado com características dendrométricas do eucalipto, observaram do ponto de vista espacial, que o pH do solo variou inversamente ao volume de madeira do eucalipto, sendo esse atributo considerado o com melhor potencial para indicador da qualidade do solo quando destinado a estimativa da produtividade do eucalipto; Dalchiavon (2010) estudou os atributos químicos de um Latossolo Vermelho com o objetivo de avaliar dentre eles aquele com melhor correlação espacial e linear para explicar a variabilidade da produtividade do arroz de terras altas, obtendo resultados que comprovaram do ponto de vista espacial que houve dentre os atributos químicos avaliados, bons indicadores na estimação da produção de grãos de arroz.

Com o a evolução do setor sucroalcooleiro brasileiro e devido à grande importância econômica da cultura da cana-de-açúcar no Brasil tem-se observado crescente aplicação da geoestatística nos estudos de manejo do solo voltado à produção desta cultura. Oliveira (2002) objetivou analisar o comportamento das variáveis químicas do solo em uma área de cultivo de cana-de-açúcar por meio da geoestatística. Concluiu que esta é uma importante ferramenta na agricultura de precisão assim como para o manejo das culturas; Corá et al. (2004) estudaram a variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo da região de Jaboticabal-SP sob cultivo de cana-de-açúcar. Seus resultados permitiram concluir que a variabilidade espacial dos atributos químicos nas camadas estudadas do solo proporcionou a visualização e definição de zonas de manejo específico quanto à aplicação de calcário e fertilizante, implicando em benefícios econômicos; Souza et al. (2004) avaliaram a variabilidade espacial de atributos químicos do solo, em área sob cultivo da cana-de-açúcar, por meio da análise geoestatística e constataram dentre outros resultados que as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial, o que permitiu seu mapeamento e análise espacial; Mello et al. (2006) estudaram a variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas em um Argissolo Vermelho-Amarelo (região de Monte Alto-SP) sob diferentes manejos e em um Latossolo Vermelho (região de Jaboticabal-SP) cultivado com cana-de-açúcar, com a finalidade de fornecer subsídios ao manejo localizado de insumos. Seus resultados permitiram constatar que os atributos químicos e físicos dos solos estudados apresentaram dependência e interação

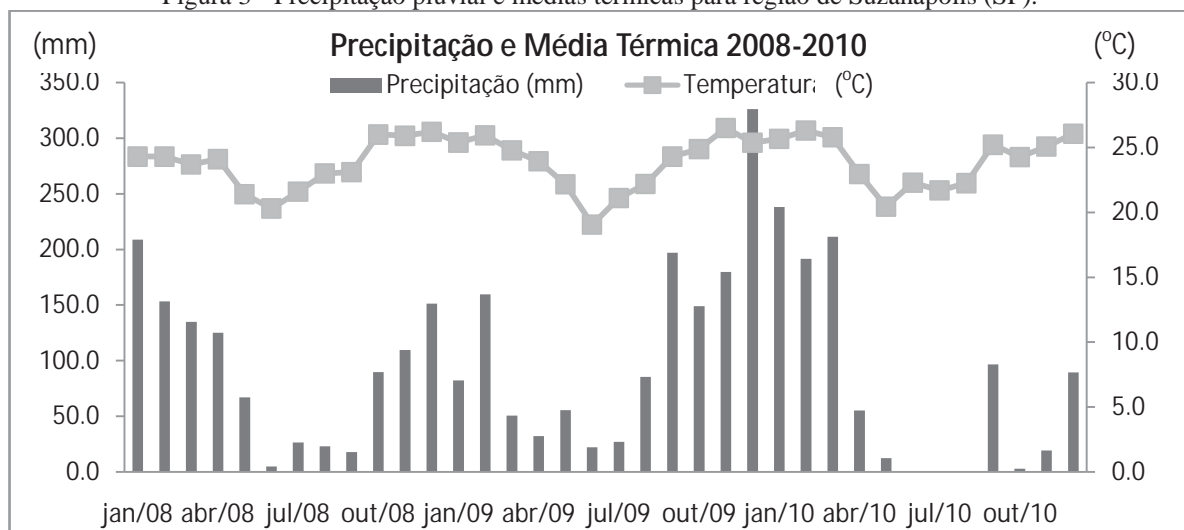
espacial; Souza et al. (2007b) avaliaram a necessidade de aplicação de insumos para a cultura da cana-de-açúcar e o comportamento espacial dos atributos químicos em uma área de 42 ha em Guariba-SP. Conforme seus resultados, o uso da técnica de geoestatística possibilitou uma precisa descrição e definição de zonas de manejo, indicando os locais de ocorrência de déficit e excesso, de modo a proporcionar economia e maior eficiência na aplicação dos insumos; Barbieri et al. (2008) analisaram a variabilidade espacial dos atributos químicos de um Argissolo da região de Catanduva-SP para o manejo localizado em uma área sob plantio de cana-de-açúcar e concluíram que a elaboração de mapas para aplicação de insumos à taxas variadas proporcionaram maior eficiência para a aplicação de calcário e outros insumos agrícolas; Marques Júnior et al. (2008) em seu estudo objetivaram analisar a variabilidade espacial de atributos químicos do solo em um Latossolo Vermelho do município de Guariba-SP, cultivado com cana-de-açúcar por longo período. Seus resultados permitiram concluir que a variabilidade espacial dos atributos químicos deve ser levada em consideração no planejamento agrícola, uma vez que estas informações poderão ser usadas na otimização do uso de insumos, reduzindo os custos e aumentando a produtividade da cultura; Grego et al. (2010) em seu trabalho objetivaram fazer uso da geoestatística para verificação da variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo e dados biométricos das plantas de cana-de-açúcar em uma área experimental em Ribeirão Preto-SP. Os resultados evidenciaram dependência espacial para a maioria dos atributos do solo, ainda notando-se boa representatividade da dependência espacial dos atributos do solo e da planta, descartando-se a hipótese de aleatoriedade para disposição de parcelas nesta área; Miguel (2010) em seu trabalho correlacionou espacialmente a produtividade da cultura da cana-de-açúcar com alguns atributos químicos do solo em uma área amostral em Mogi Mirim-SP, que totalizou cerca de 18 ha. Após análise geoestatística e gerados mapas de krigagem e cokrigagem constatou-se que o pH e demais atributos químicos do solo, como Ca e Mg, foram eficientes na determinação de valores de produtividade em locais não amostrados, apontando grande correlação espacial entre esses atributos com a produtividade da cana-de-açúcar; Braga (2011) estudando as correlações lineares e espaciais da produtividade de cana-de-açúcar com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho Eutrófico de Suzanópolis-SP, observou do ponto de vista espacial, que o pH do solo apresentou-se como um potencial indicador de sua qualidade química, podendo-se definir zonas específicas de manejo visando o aumento de produtividade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ORIGEM DOS DADOS

O presente trabalho foi desenvolvido durante o ano agrícola de 2009/2010, na Fazenda Valença I (Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar), município de Suzanópolis, noroeste do estado de São Paulo, Brasil, altitude média de 350m, 20° 27' 33" S e 51° 08' 05" W. Segundo a classificação de Köeppen (1948) o tipo climático regional é o Aw, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. A precipitação pluvial média anual é de 1400 mm e a temperatura média anual do ar é de 24,5 °C (CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA - CEPAGRI, 2011). Com base nos dados da Estação Agroclimatológica de Marinópolis-SP (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP, 2011), que representa a região estudada, foi apresentado na Figura 3 o gráfico de precipitação pluvial e média térmica observadas entre os anos de 2008-2010.

Figura 3 - Precipitação pluvial e médias térmicas para região de Suzanópolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Conforme levantamento taxonômico semi-detalhado realizado por Alves et al. (2009), o solo estudado, no qual se instalou a malha experimental, foi classificado como um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abrupto textura média/argilosa, A moderado, hiperDistrófico, meso-epiEutrófico, endoálico, endodêmico, epicompactado, muito profundo, fortemente ácido, cujos dados analíticos se encontram no Quadro 1.

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.....			
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

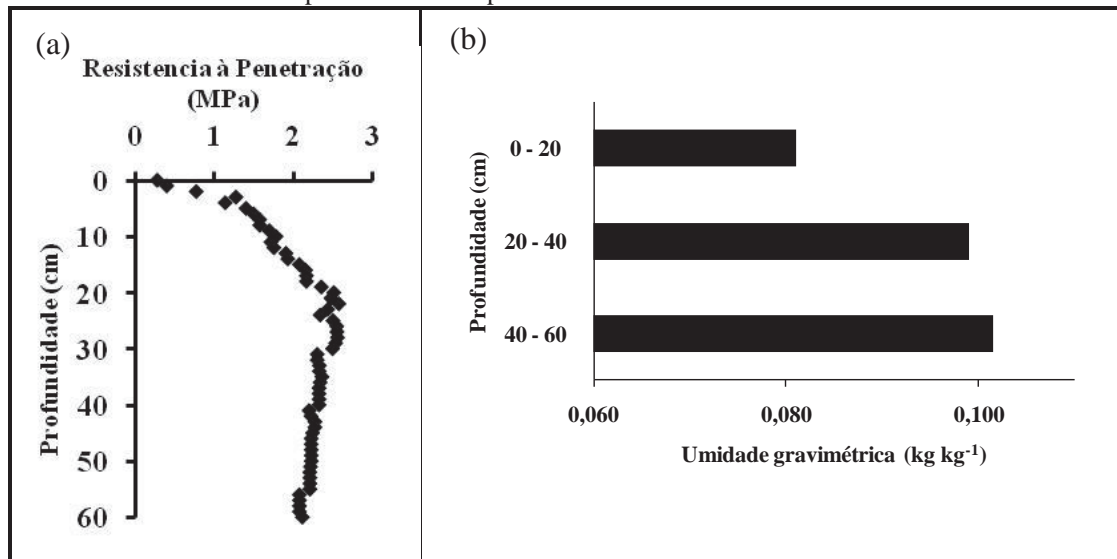
Horizonte		Atributos físicos				
Símbolo	Profundidade	Densidade do solo	Densidade da partícula	Macroporosidade	Microporosidade	Porosidade total
	(cm)kg/dm ³m ³ /m ³		
Ap	0-33	1,56	2,59	0,07	0,33	0,40
BA	33-63	1,58	2,55	0,06	0,29	0,35
Bt1	63-124	1,50	2,58	0,06	0,30	0,37
Bt2	124-164	1,44	2,62	0,09	0,34	0,43
Bt3	164- 200 +	1,49	2,59	0,08	0,33	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	mmol.c.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

Fonte: Adaptado de Alves et al. (2009).

Já nas Figuras 4a,b estão apresentadas a curva de resistência à penetração e a umidade gravimétrica do solo, avaliada num perfil até 0,60m de profundidade, caracterizando a compactação do solo na área experimental. Já no Quadro 2, está apresentada a análise química dos primeiros 0,40m de profundidade do local de origem dos dados.

Figura 4 - Curva de resistência à penetração (a), e valores de umidade gravimétrica (b) em profundidade no perfil do solo na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

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%
(m)	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂mmolc dm ⁻³								
0 – 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
0,20 – 0,40	6,2	13,1	5,0	1,1	10,8	6,9	17,0	1,2	19,5	37,3	50,2	6,9

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.2 IMPLANTAÇÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

A implantação da cultura da cana-de-açúcar (variedade RB 855453) foi realizada sobre uma área ocupada há 10 anos com pastagem (braquiária). Para tanto realizou-se a dessecação com o herbicida *glyphosate* na dosagem de 1,977 kg ha⁻¹ (p.a.). Para o preparo do solo foram realizadas as seguintes operações: Uma gradagem pesada e duas gradagens intermediárias; aplicação a lanço de 2,0 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, sendo para sua incorporação, a 0,35 m de profundidade do solo, utilizado um arado de aivecas (4 aivecas). Para finalizar o preparo do solo utilizou-se uma grade niveladora.

O plantio foi realizado em 12 de maio de 2006, sendo para tanto utilizado um sulcador de duas linhas (1,50 m entre hastes). No momento da sulcação utilizou-se 500 kg ha⁻¹ do formulado 6-30-24 e para tratamento dos toletes no sulco de plantio foi aplicado o inseticida *fipronil* na dosagem de 200 g ha⁻¹ (p.a.) visando o controle de pragas de solo, principalmente cupins. O primeiro corte da cultura (cana crua) ocorreu em setembro de 2007 (colheita mecanizada), posteriormente realizou-se aplicação de 1 t ha⁻¹ de gesso e 500 kg ha⁻¹ do formulado 18-00-27. Após o segundo corte, em 2008, realizou-se adubação da soqueira com 400 kg ha⁻¹ do formulado 18-00-27.

Por ocasião da coleta de dados (26/05/2010), a cultura encontrava-se em 3º ciclo tendo sido bisada em 2009, estando, portanto com 24 meses em campo. O manejo para o corte manual foi realizado, com a queima do talhão. Uma visão geral da área em 24/05/2010 pode ser observada nas Figuras 5a,b.

Figura 5 - Aspecto geral do talhão de coleta das amostras após queima da palhada da cana.



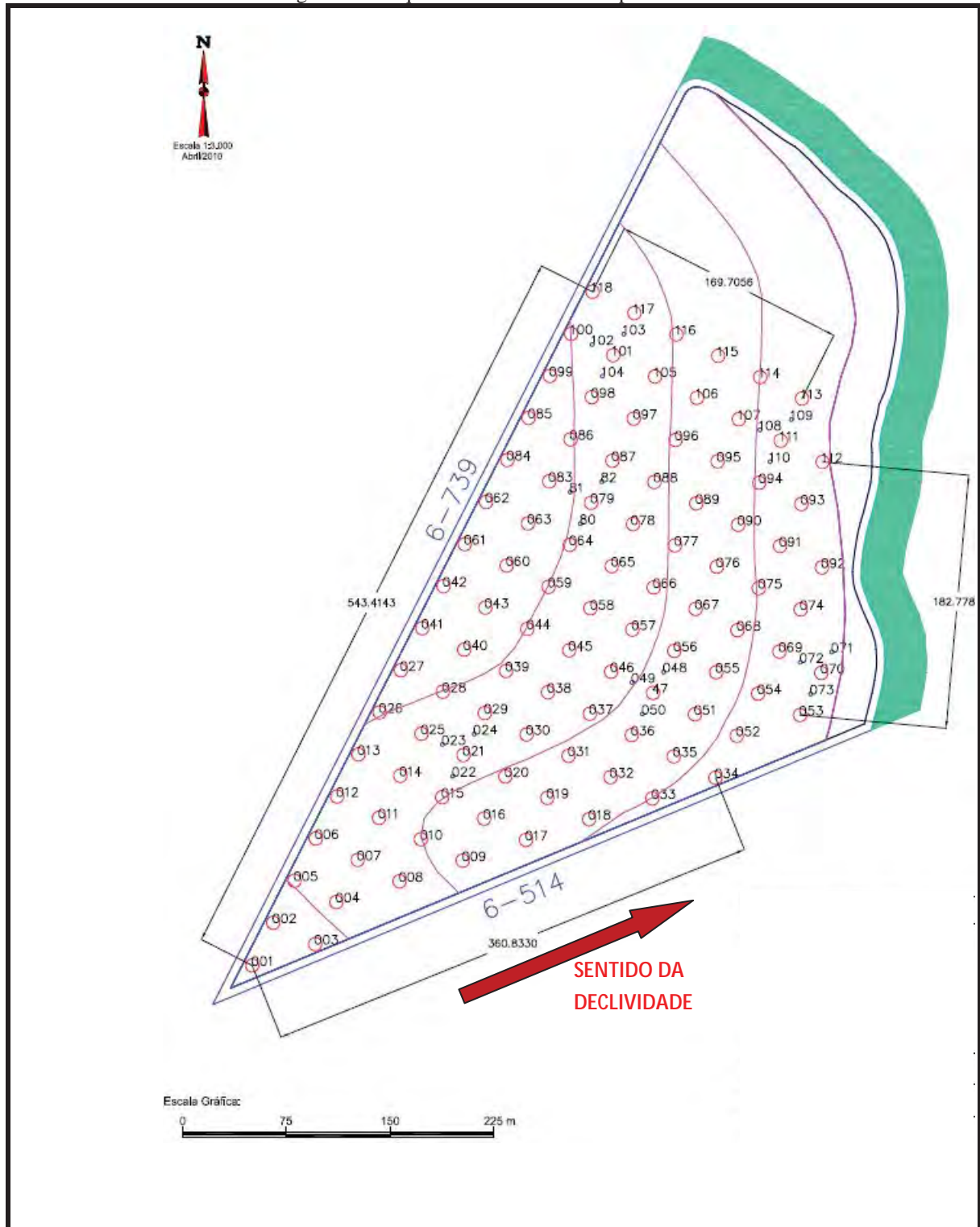
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3 IMPLANTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA MALHA EXPERIMENTAL DE CAMPO

Na alocação da malha experimental foram definidas as direções *x* e *y* do sistema de coordenadas cartesianas, sendo constituída de 118 pontos amostrais, distribuídos de forma a cobrir toda a área do talhão escolhido, conforme croqui apresentado na Figura 6. Suas coordenadas originaram uma planilha de dados de latitude e longitude de cada ponto no espaço. Deste modo, com o auxílio de um GPS de navegação alimentado por essa planilha de coordenadas, realizou-se o estaqueamento dos pontos da malha geoestatística no talhão de cana-de-açúcar queimada, o que permitiu o início da coleta dos dados da planta e do solo, conforme exemplificado nos segmentos da Figura 7. Adotou-se o cuidado de realizar o estaqueamento sempre na entre linha da cultura. O perímetro de abrangência dos pontos de

coleta cobriu aproximadamente 10,5 ha. Assim, na malha de coleta os pontos amostrais espaçavam-se na grande malha em aproximadamente 34m e na malha de refinamento, em 17m.

Figura 6 - Croqui da malha de dados experimental.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 7 - Detalhe da área amostral (a), de um dos pontos da malha geoestatística (b), da coleta (c) e transporte da planta (d), da coleta do solo (e), e da preparação inicial do solo para análise (f).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.4 COLETA DOS DADOS E METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS PESQUISADOS

Foram determinados os atributos do solo e da planta, individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral. Para a coleta dos atributos da planta definiu-se uma área útil, compreendendo duas linhas de 3m de cultivo, totalizando uma área de 9 m² ao redor de cada ponto amostral. Para determinação do atributo produtividade de colmos da cana-de-açúcar

(TCH), expresso em $t\ ha^{-1}$, utilizou-se uma balança eletrônica portátil com capacidade de 50kg e precisão de 20g. Para obtenção da massa de colmos por ponto, as plantas da área útil foram cortadas simulando a colheita mecânica, sendo posteriormente, organizadas em feixes, pesadas e somadas. Os dados de pesagem de THC coletados em campo, foram transferidos para uma planilha do excel onde realizou-se a extrapolação dos valores da área útil de $9m^2$ para 1 ha. Já para a obtenção do atributo população de plantas (POP), expresso em plantas por m^{-2} (pl. m^{-2}), utilizou-se uma trena de bolso para marcar 3m lineares e assim executou-se a contagem do número de colmos industrialmente viáveis por ponto.

Para a obtenção dos dados tecnológicos da planta, foram coletados 10 colmos industrializáveis, retirados em seqüência na touceira conforme recomendação de Bidoia & Bidoia (2008). Os feixes foram despontados, despalhados, numerados e encaminhados ao laboratório PCTS (Pagamento da Cana-de-açúcar pelo Teor de Sacarose) da Usina Vale do Paraná, unidade de Suzanápolis (SP), onde obteve-se: os teores de açúcares totais recuperáveis (ATR), expresso em $kg\ t^{-1}$ de colmos; sólidos solúveis totais-BRIX (BRI), sacarose no caldo (POL), pureza aparente (PUR) e fibra (FIB), todos expressos em %; seguindo a metodologia determinada conforme Consecana (2006). Dessa forma os atributos da planta avaliados no presente trabalho foram: TCH, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB.

Os atributos químicos do solo avaliados foram o pH em água (pHa), pH em Cloreto de Cálcio (pHc), pH em Cloreto de Potássio (pHk), e o Delta pH (DpH), oriundos de amostras deformadas coletadas no meio da entrelinha de semeadura da cana-de-açúcar nas seguintes profundidades: 1) 0-0,20m; 2) 0,20-0,40m e 3) 0,80-1,00m, utilizando para tal um trado caneca, com diâmetro interno de 0,08m e altura de 0,20m. As amostras do solo foram secas ao ar, posteriormente destorroadas e passadas por uma peneira de 2,0mm (Terra Fina Seca ao Ar - TFSA) sendo as análises químicas realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS-UNESP).

O **pHa** foi determinado por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo/água (1:2,5). O **pHc** foi determinado em solução de $CaCl_2\ 0,025\ mol\ L^{-1}$ (1:2,5) ao passo que a determinação do **pHk** foi feita em solução de $KCl\ 1\ mol\ L^{-1}$ (1:2,5) conforme Embrapa (2009).

O **DpH** foi calculado pela seguinte expressão:

$$DpH = (pHk - pHa).....(1)$$

onde: **DpH** é o valor de Delta pH, **pHk** é o pH determinado em Cloreto de Potássio e o **pHa** é o pH determinado em água, ambos expresso em unidade. Deste modo, foram analisados ao todo, 12 atributos do solo, a saber: a) profundidade 1 (de 0-0,20m): pHa1, pHc1, pHk1,

DpH1; b) na profundidade 2 (de 0,20-0,40m): pHa2, pHc2, pHk2, DpH2; e c) na profundidade 3 (0,80-1,00m): pHa3, pHc3, pHk3, DpH3.

3.5 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), onde foram obtidas as seguintes medidas estatísticas: média, mediana, valores mínimo e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e realizada a análise da distribuição de frequência. Posteriormente foram identificados *outliers*, conforme identificação do gráfico de ramos e folhas, efetuando-se assim 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.

Com o auxílio da planilha de cálculos Excel, montou-se 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 testadas as regressões múltiplas entre: 1) TCH (como variável dependente) em função dos demais atributos da planta (como variáveis independentes); 2) TCH (dependente) em função dos atributos do solo pesquisados (independentes); 3) TCH (dependente) em função de todos os atributos do solo e da planta (independentes); e, 4) cada componente tecnológico individualmente (POP, ATR, BRI, POL, PUR, e FIB) em função dos atributos do solo, no intuito de selecionar aqueles atributos que, nos devidos casos, proporcionariam as melhores equações para estimar a variável dependente, por intermédio do *stepwise*, a 10% de probabilidade. O desempenho das equações foi analisado pelo coeficiente de determinação (r^2).

Para cada atributo da planta e do solo foi analisada a dependência espacial pelo cálculo do semivariograma, com base nas pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote computacional *Gamma Design Software GS⁺ 7.0* (ROBERTSON, 2004). Os ajustes dos semivariogramas (krigagem e cokrigagem), em função de seus modelos (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 por meio da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da

vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem e/ou cokrigagem. 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 calculada segundo sugestão de Cambardella et al. (1994), modificada de acordo com Robertson (2004), conforme a seguinte expressão:

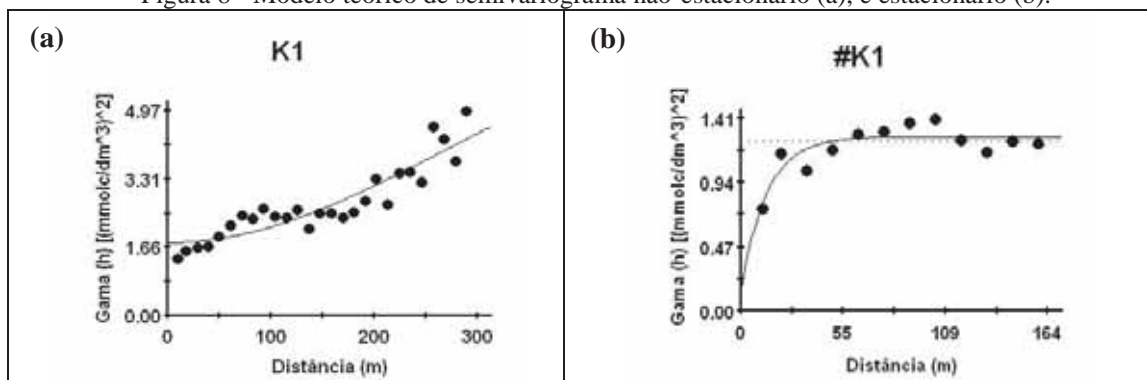
$$ADE = [C/(C+C_0)].100.....(2)$$

onde: **ADE** é o avaliador da dependência espacial; **C** é a variância estrutural; $C+C_0$ é o patamar. A interpretação proposta para o **ADE** foi a seguinte: a) $ADE < 20\%$ = variável espacial de muito baixa dependência; b) $20\% \leq ADE < 40\%$ = baixa dependência; c) $40\% \leq ADE < 60\%$ = média dependência; d) $60\% \leq ADE < 80\%$ = alta dependência, e e) $80\% \leq ADE < 100\%$ = dependência muito alta. 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.

3.5.1 Exclusão da tendência quando da não- formação da estacionariedade

Na análise espacial, 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. As Figuras 8a,b ilustram tipicamente os semivariogramas não-estacionário e estacionário.

Figura 8 - Modelo teórico de semivariograma não-estacionário (a), e estacionário (b).



Fonte: Braga (2011).

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

$$\mathbf{Z}(s) = \mathbf{t}(s) + \mathbf{R}(s) \dots \dots \dots (3)$$

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

Segundo Davis (1986), a tendência $\mathbf{t}(s)$ da variável $\mathbf{Z}(s)$, que depende exclusivamente da localização geográfica (coordenadas cartesianas x e y) do ponto amostral, na qual o componente aleatório vai ficar modelado no resíduo, pode ser obtida pela técnica da regressão múltipla polinomial, quando $\mathbf{t}(s)$ 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:

$$\mathbf{t}(x,y) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{y} \dots \dots \dots (4)$$

$$\mathbf{t}(x,y) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{y} + \mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{x}^2 + \mathbf{a}_4 \cdot \mathbf{y}^2 + \mathbf{a}_5 \cdot \mathbf{xy} \dots \dots \dots (5)$$

$$\mathbf{t}(x,y) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{y} + \mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{x}^2 + \mathbf{a}_4 \cdot \mathbf{y}^2 + \mathbf{a}_5 \cdot \mathbf{xy} + \mathbf{a}_6 \cdot \mathbf{x}^3 + \mathbf{a}_7 \cdot \mathbf{y}^3 + \mathbf{a}_8 \cdot \mathbf{x}^2 \mathbf{y} + \mathbf{a}_9 \cdot \mathbf{y}^2 \mathbf{x} \dots \dots \dots (6)$$

Dessa forma, a eleição da tendência $\mathbf{t}(s)$, 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 $\mathbf{R}(x,y)$, a partir da equação 7, efetuando-se:

$$\mathbf{R}(x,y) = \mathbf{Z}(x,y) - \mathbf{t}(x,y) \dots \dots \dots (7)$$

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 $\mathbf{Z}^*(x,y)$, com a qual poderá ser efetuada a krigagem, conforme a equação 8:

$$\mathbf{Z}^*(x,y) = \mathbf{t}^*(x,y) + \mathbf{R}^*(x,y) \dots \dots \dots (8)$$

onde: $\mathbf{Z}^*(x,y)$ é a estimativa da variável não-estacionária $\mathbf{Z}(s)$, $\mathbf{t}^*(x,y)$ é a tendência da variável $\mathbf{t}(s)$, e $\mathbf{R}^*(x,y)$ 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^+ (ROBERTSON, 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 $\mathbf{R}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$. Seguidamente, pode-se calcular a $\mathbf{t}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ pelo uso dos coeficientes adjuntos calculados pela expressão ajustada anteriormente. A partir do conhecimento do $\mathbf{R}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ e da $\mathbf{t}^*(\mathbf{x},\mathbf{y})$ podem ser calculados os valores do atributo retro transformado pelo uso da equação 8. Com isso, retorna-se ao programa GS^+ e efetua-se a krigagem com tais valores retro transformados (\pounds 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 (#atributo). Já quando referidos no mapa de krigagem e/ou cokrigagem ficaram precedidos por \pounds (\pounds atributo).

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 consta a análise descritiva dos atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar, e do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis-SP. De acordo com Pimentel-Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (CV), sendo baixo quando: ($CV \leq 10\%$); médio ($10\% < CV \leq 20\%$); alto ($20\% < CV \leq 30\%$), e muito alto ($CV > 30\%$). Deste modo, um CV elevado indica heterogeneidade dos dados, ao passo que CV baixo é indicador de homogeneidade (FROGBROOK et al., 2002). Para os atributos da planta, Fibra (FIB) e a Pureza (PUR), foram observadas baixas variabilidades, muito provavelmente devido ao fato de se tratar de cana queimada e enfeixada à mão o que deve ter reduzido as impurezas. Assim, FIB e PUR apresentaram valores de CV respectivamente de 9,3% e 3,8%. Já os atributos POL, BRI e ATR apresentaram média variabilidade dos dados, com 13,8%, 11,3% e 11,9%, respectivamente. Por outro lado, observou-se alta variabilidade dos dados para a população de plantas (POP), $CV = 20,9\%$, e para a produtividade de colmos (TCH), $CV = 23,0\%$. Assim, sendo o número de colmos o componente principal na definição da produtividade, e tendo este atributo apresentado médio CV, esperava-se o mesmo comportamento do CV para a TCH.

Braga (2011) em seu trabalho avaliou a produtividade e as características tecnológicas da cana-soca em um Argissolo Vermelho Eutrófico no município de Suzanápolis-SP e encontrou CV

Quadro 3 - Análise descritiva dos atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar, e do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).

Medidas estatísticas descritivas										
Atributo ^(a)	Valor		Desvio		Coeficiente			Probabilidade do teste ^(b)		
	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Padrão	Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
<i>Atributos da Cana-de-Açúcar</i>										
<i>TCH (t ha⁻¹)</i>	89,51	90,35	42,00	153,01	20,618	23,0	0,075	0,143	0,3860	NO
<i>POP (pl. m⁻²)</i>	6,55	5,56	2,44	10,67	1,374	20,9	0,763	0,047	0,4665	NO
<i>ATR (kg t⁻¹)</i>	136,0	136,0	90,69	171,84	16,179	11,9	0,209	-0,466	0,0708	NO
<i>BRI (%)</i>	19,51	19,38	14,00	26,22	2,205	11,3	0,167	0,169	0,8752	NO
<i>POL (%)</i>	16,66	16,67	10,08	23,19	2,297	13,8	0,633	-0,395	0,0916	NO
<i>PUR (%)</i>	85,48	85,69	77,22	92,61	3,22	3,8	-0,252	-0,444	0,0340	TN
<i>FIB (%)</i>	13,55	13,43	11,10	17,28	1,258	9,3	-0,461	0,285	0,1937	LN
<i>Atributos do pH do Solo (0-0,20m)</i>										
<i>pHa1</i>	5,87	5,90	5,30	6,60	0,247	4,2	-0,013	0,122	0,0313	TL
<i>pHk1</i>	4,83	4,85	4,30	5,50	0,257	5,3	-0,479	0,055	0,0402	TN
<i>pHc1</i>	4,64	4,70	4,00	5,20	0,233	5,0	-0,326	-0,016	0,0656	NO
<i>DpH1</i>	-1,05	-1,00	-1,40	-0,70	0,160	15,3	-0,166	-0,353	0,0001	IN
<i>Atributos do pH do Solo (0,20-0,40m)</i>										
<i>pHa2</i>	6,01	6,00	5,40	6,70	0,240	4,0	-0,100	0,083	0,0561	NO
<i>pHk2</i>	4,97	4,90	4,40	5,70	0,282	5,7	-0,396	0,023	0,0441	TL
<i>pHc2</i>	4,75	4,70	4,30	5,40	0,249	5,2	-0,479	0,199	0,0204	TL
<i>DpH2</i>	-1,04	-1,00	-1,50	-0,500	0,163	15,7	0,548	-0,205	0,0003	IN
<i>Atributos do pH do Solo (0,80-1,00m)</i>										
<i>pHa3</i>	5,99	6,00	5,20	6,80	0,364	6,1	-0,767	-0,107	0,0123	IN
<i>pHk3</i>	4,94	4,75	4,30	5,90	0,527	10,7	-1,456	0,310	0,0001	IN
<i>pHc3</i>	4,78	4,60	4,20	5,90	0,486	10,2	-1,072	0,523	0,0001	IN
<i>DpH3</i>	-1,06	-1,00	-1,90	-0,40	0,292	27,5	0,301	-0,365	0,0507	LN

^(a) TCH, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB são respectivamente, a produtividade 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; pHa, pHk, pHc e DpH são respectivamente atributos químicos da reação do solo nas respectivas camadas: (1:0-0,20m; 2:0,20-0,40m; 3:0,80-1,00m); ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, TN, LN, TL e IN respectivamente do tipo normal, tendendo à normal, lognormal, tendendo à lognormal e indefinido.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

semelhante para a variedade RB 855536, tanto na produtividade quanto para os demais atributos tecnológicos da planta avaliados. Ou seja, encontrou CV baixo para PUR e FIB, CV médio para POL, BRI e ATR, e alto para TCH. A única discordância encontrada foi em relação a POP onde no referido trabalho observou-se médio CV. Tal fato muito provavelmente por se tratar de um atributo onde não existem apenas os reflexos das condições do solo, mas também há grande influência da ação manual do plantio.

A PUR e FIB (Quadro 3) foram os atributos mais homogêneos no campo, podendo tal fato estar ligado à própria característica varietal da planta, não sofrendo tanta influência da variabilidade das condições de campo. Uma vez que, segundo Fernandes (2000), o teor de fibra também é influenciado por diversos fatores edafoclimáticos tais como o clima (chuva e temperatura), solo (umidade e fertilidade), e também pela época de corte e método de determinação. O que se pode inferir quanto aos semelhantes valores de CV constatados para o conjunto de atributos POL, BRI e ATR, deve estar relacionado à interdependência existente entre esses atributos, os quais parecem se mostrar igualmente influenciados pelas condições edafoclimáticas do local de estudo. De acordo com Franco (2003), a determinação do Brix pode facilmente subsidiar a avaliação do estágio de maturação em que se encontra um determinado talhão de cana. Do mesmo modo, as considerações de Deuber (1988), permitem inferir que o teor de sacarose indica o momento de maturação da cultura. Assim, os valores do coeficiente de variação avaliados para o conjunto POL e BRI indicam que no campo, o estágio de maturação da planta não se apresentou tão uniforme, provavelmente devido ao caso da cana ter sido bisada em 2009, havendo assim a campo, muitas plantas jovens e outras maduras.

Com relação a TCH (Quadro 3), a alta variabilidade dos dados está em consonância com resultados apresentados em alguns estudos, realizados em solos e com variedades de cana distintas, como nos trabalhos de Miguel et al. (2010) onde foi observado coeficiente de variação de 21,38%, e de Miguel et al. (2009) com $CV = 21,05\%$. Souza et al. (2010) verificaram coeficiente de variação médio (18,51%) para produtividade da cana. Segundo Marin (2011), a variedade RB855453 é exigente em solo/água, deste modo sendo a sua produtividade mais suscetível à variabilidade das condições do solo/manejo e clima, refletindo assim as diferentes condições edafoclimáticas durante os 24 meses que a cultura ficou a campo.

4.1.1.2 Atributos do solo

No Quadro 3, pela análise descritiva dos atributos químicos do solo, nas camadas superficiais, 0-0,20m, 0,20-0,40m, os atributos do pH (pHa, pHk e pHc) apresentaram baixa variabilidade dos dados, muito provavelmente devido ao efeito antrópico da correção e incorporação do calcário com arado de aivecas (0,35m). Na camada mais profunda (0,80-1,00m) o pHa apresentou baixo CV, ao passo que o pHk e pHc apresentaram médio CV. Ficando tal fato em sintonia com os trabalhos de Corá et al. (2004), Cerri (2005), Mello et al.

(2006), Zanão Júnior (2007), Montanari et al. (2008), Souza et al. (2007b; 2010) e Miguel (2010), os quais também constataram ora baixa ora média variabilidade para pH, avaliados sob diferentes metodologias. O Delta pH (DpH) apresentou média variabilidade nas camadas superiores (0-0,20m; 0,20-0,40m) e alta variabilidade na camada de 0,80-1,00m, concordando em parte com Vieira (1997) que avaliando o Delta pH em diferentes camadas do solo encontrou média variabilidade dos dados.

Sabe-se que a variabilidade do solo é produto da interação entre os fatores e os processos de sua formação. Por outro lado, o manejo do solo, quando analisado pela ação que o preparo/manejo o proporciona (adubação, sistemas de plantio, espaçamentos, ciclos sucessivos) constitui-se num fato decisivo para o aumento da sua heterogeneidade (FREDDI et al., 2006; SOUZA et al., 2004). Porém, a idéia geral do manejo e preparo do solo é proporcionar não apenas um ambiente favorável, mas, homoganeamente favorável, de modo a resultar no melhor desenvolvimento da planta em toda a área de plantio. Assim, tendo em vista as práticas iniciais adotadas como a calagem e, posteriormente a gessagem do solo, pode-se inferir que tal fato deve ter corroborado para uma menor heterogeneidade do pH do solo nas camadas superficiais (até 0,40m), que no geral apresentou baixos CVs (Quadro 3).

4.1.2 Valores médios dos atributos

4.1.2.1 Atributos da planta

Lima (2007) ressalta que quando uma variável qualquer possui distribuição com frequência normal a sua medida de tendência central deve ser a média, ao passo que para distribuições de frequência do tipo lognormal, a medida de tendência mais adequada a ser utilizada é a mediana. Deste modo, no Quadro 3, para os atributos da planta, a distribuição de frequência foi do tipo normal para TCH, POP, ATR, BRI, e POL; e tendendo a normal para PUR, ao passo que FIB apresentou distribuição de frequência do tipo lognormal. O valor médio para produtividade de colmos (TCH) foi de 89,5 t ha⁻¹ ficando este valor, acima da média brasileira na safra 2010/2011 que foi de 77,4 t ha⁻¹ (CONAB, 2011). Ainda, de acordo com Rapassi (2008) que considerou valores em torno de 85 t ha⁻¹, como sendo base de produtividade para o 3º corte da cultura no oeste do estado de São Paulo, os dados obtidos no presente trabalho, ficaram em consonância com as informações apresentadas na pesquisa supracitada. Por outro lado, por se tratar de cana bisada, no terceiro corte (24 meses em campo), a produtividade não se apresentou com valores satisfatórios, tendo em vista elevadas

produtividades quando com manejo adequado, principalmente pelo fato de Fahl et al. (1998) ter apontado em algumas regiões do estado de São Paulo (Ribeirão Preto e Jaú) produtividades para indústria em torno de 85 t ha⁻¹ no quinto corte. Assim, considerando-se a produtividade abaixo do esperado, conforme também observado por Braga (2011) em seu trabalho, o autor relata que a baixa população de plantas pode ter influenciado diretamente a produtividade da cultura. No presente trabalho, a POP apresentou valor médio de 6,5 pl. m⁻² (equivalente a 9,9 pl. metro), abaixo do ideal para o arranjo do espaçamento utilizado (1,5m), uma vez que Braga (2011) trabalhando também em um Argissolo Vermelho de Suzanópolis-SP, obteve uma população média de 10,5 pl. m⁻², e considerou como sendo ideal, valor da ordem de 14 pl. m⁻² (equivalente 21,9 pl. metro) para uma produtividade máxima nas condições de campo avaliadas. Deste modo, a população de plantas observada no presente trabalho também deve ter corroborado diretamente para que a produtividade da cana estivesse abaixo do esperado para a cana bisada no 3º corte, uma vez que sob tal influência (cana bisada) esperava-se uma maior produtividade de fitomassa (t ha⁻¹).

Com relação ao ATR (Quadro 3), o valor médio de 136 kg ha⁻¹ está acima do valor médio considerado como “padrão” que equivale a aproximadamente 122 kg t⁻¹, conforme apresentado em Segato et al. (2006b), porém por se tratar de cana bisada este valor está muito abaixo do esperado principalmente pelo fato de Rapassi (2008) ter indicado valor médio para a região oeste paulista em torno de 146 kg t⁻¹. O BRI apresentou média de 19,51% e de acordo com Fernandes (2000) este valor está dentro dos padrões mínimos para o processamento considerados pela indústria sucroalcooleira paulista o qual deve apresentar no mínimo 18° Brix, ou seja, 18% de sólidos solúveis. Já o POL de 16,66% indicou valores um pouco acima do valor médio apresentado no trabalho de Segato et al. (2006b), o qual foi apontado em 14%. Tal fato está em consonância com Fernandes (2000) que indicou que para o estado de São Paulo, a cana madura deve apresentar valores em torno de 14-15% de Pol do início da colheita até o final da safra. Por outro lado, mesmo os valores médios de BRI e POL indicando esta tendência geral da cultura estar no ponto em torno do ideal para colheita (maturação), a amplitude entre os valores mínimos e máximos apresentados por estes atributos, e tendo por referência o CV=médio, denota a idéia de que o talhão apresentava plantas que não estavam no estágio ótimo de maturação, bem como, plantas passando do ponto da colheita, o que sugere, principalmente, reflexo das condições edafoclimáticas a campo, e o fato da cana bisada ser outro importante fator de adição de heterogeneidade dos atributos da cana-de-açúcar.

O valor médio para FIB (Quadro 3) foi de 13,55%, próximo do ideal de recomendado

(de 11-13%), conforme Segato et al. (2006b). Segundo Tasso Júnior (2007), a porcentagem de fibra de uma cana considerada normal, deve oscilar na faixa de 10-11%. Podendo ainda, segundo esse autor, na cana industrial, apresentar valores de 14-15% por conta presença de matéria que não integra a fração fibra (impurezas). De acordo com Stupiello (2002) dentre os fatores que causam variação do teor de fibra, pode-se citar a variedade da planta, o tipo do solo, o período de safra, além da idade do canavial, condições climáticas e práticas culturais. Ressalta-se que o valor mínimo de 11,1% de FIB está dentro da faixa considerada padrão, já o valor máximo de 17,2% encontra-se muito elevado, porém muito provavelmente devido ao fato da cana ser bisada. Por fim, a PUR apresentou valor médio de 85,69%, ficando dentro da média recomendada em Segato et al. (2006b) que é de 85%. Tasso Júnior (2007) relatou que no estado de São Paulo essa variável deve ser no mínimo de 80% (início da safra) ou 85% (transcorrer da safra) para que seja recomendada a industrialização da cana. Assim, de modo geral, apesar das inferências apontadas, salienta-se que os valores dos atributos produtivos e tecnológicos obtidos no presente trabalho estão satisfatórios com base nos padrões para industrialização conforme União da Indústria de Cana-de-Açúcar - UNICA (2009).

Em geral, as informações observadas, coeficientes de variação, valores médios, mínimos e máximos, parecem demonstrar, além do reflexo dos efeitos das características edafoclimáticas, que a cana, por ser bisada, contribuiu para um aumento da heterogeneidade nos dados de seus atributos tecnológicos dentro do talhão estudado, de modo que tal prática não foi desejável em quantidade e qualidade da cana.

4.1.2.2 Atributos do solo

A variabilidade dos atributos químicos do solo é resultado da interação entre os fatores de sua formação, porém deve-se considerar as práticas de manejo/preparo do solo (adubação, sistemas de plantio) e das culturas (espaçamento, ciclo de sucessivos cultivos) como fontes de adição de variabilidade (SOUZA et al., 2004), principalmente, conforme sugere Corá (1997), nas camadas superficiais. Por outro lado, o manejo do solo visa em seu ensejo maior, de certo modo, tornar o ambiente de cultivo mais propício ao desenvolvimento agrícola, sendo essencial que este ambiente favorável seja o mais homogêneo possível em campo. Desta forma, os dados dos atributos químicos do solo (Quadro 3) indicaram que os valores de pH foram mais elevados quando determinados em água (pHa) em todas as camadas, o que já era esperado. Tal fato deve-se principalmente a influência da presença de sais no solo, conforme relatou Wutke e Camargo (1975) e Mello et al. (1983). De modo geral, com base nos dados

pode-se inferir que o pH do solo avaliado em KCl e CaCl₂ apresentou valores um pouco abaixo da média consideradas ideal para disponibilidade da maioria dos nutrientes, para todas as camadas, indicando elevada acidez conforme classes apresentadas por Raij et al. (1997). Já em profundidade, observa-se que a diferença entre os valores encontrados foi pequena, porém com aumento gradual em profundidade, provavelmente devido ao preparo do solo (calagem e gessagem) associado ao processo natural de lixiviação em profundidade no perfil ao longo dos anos. De fato, no geral observou-se que o manejo (calagem e gessagem) sugeriu atender a expectativa do preparo do solo, no que se refere proporcionar um ambiente mais homogêneo também em profundidade no perfil. Do mesmo modo, o Delta pH médio apresentou-se quase que uniforme nas camadas avaliadas, indicando predominância das cargas negativas e conseqüentemente uma maior capacidade de retenção de cátions.

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

No Quadro 4 está apresentada a matriz de correlação linear simples entre os atributos produtivos e tecnológicos da cultura da cana-de-açúcar (TCH, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB) e do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis-SP (pHa, pHc, pHk e DpH), nas respectivas camadas de 0,0-0,20m, 0,20-0,40m, e 0,80-1,00m.

4.2.1.1.1 Atributos da planta versus atributos da planta

Das correlações entre os atributos da planta (Quadro 4), houve significância para os seguintes pares TCH vs POP ($r = 0,388^{**}$), ATR vs POP ($r = -0,178^*$), POL vs POP ($r = -0,184^*$), ATR vs BRI ($r = 0,904^{**}$), ATR vs POL ($r = 0,984^{**}$), ATR vs PUR ($r = 0,456^{**}$), POL vs BRI ($r = 0,918^{**}$), FIB vs BRI ($r = 0,418^{**}$), PUR vs BRI ($r = 0,238^{**}$), POL vs FIB ($r = 0,324^{**}$) e, POL vs PUR ($r = 0,458^{**}$). Deste modo, nestas correlações observaram-se algumas informações importantes do ponto de vista prático da colheita da cana, uma vez que a POP (um atributo de fácil obtenção em campo) evidenciou correlações significativas com atributos de conhecimento desejável para escolha do melhor momento para o início da colheita da cultura, como a produtividade (TCH). Em relação à TCH, a POP foi o único atributo

Quadro 4 - Matriz de correlação linear simples entre atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar, e do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)																	
	TCH	POP	ATR	BRI	POL	PUR	FIB	pHa1	pHk1	pHc1	DpH1	pHa2	pHk2	pHc2	DpH2	pHa3	pHk3	pHc3
POP	0,388**																	
ATR	-0,028 ^{ns}	-0,178*																
BRI	-0,069 ^{ns}	-0,143 ^{ns}	0,904**															
POL	-0,055 ^{ns}	-0,184*	0,984**	0,918**														
PUR	-0,028 ^{ns}	-0,153 ^{ns}	0,456**	0,238**	0,458**													
FIB	-0,122 ^{ns}	-0,059 ^{ns}	0,173 ^{ns}	0,418**	0,324**	0,007 ^{ns}												
pHa1	-0,020 ^{ns}	0,124 ^{ns}	-0,093 ^{ns}	-0,133 ^{ns}	-0,100 ^{ns}	-0,018 ^{ns}	-0,098 ^{ns}											
pHk1	0,026 ^{ns}	0,075 ^{ns}	-0,124 ^{ns}	-0,144 ^{ns}	-0,130 ^{ns}	-0,060 ^{ns}	-0,054 ^{ns}	0,777**										
pHc1	0,073 ^{ns}	0,126 ^{ns}	-0,104 ^{ns}	-0,121 ^{ns}	-0,110 ^{ns}	-0,050 ^{ns}	-0,055 ^{ns}	0,718**	0,899**									
DpH1	0,057 ^{ns}	-0,083 ^{ns}	-0,067 ^{ns}	-0,048 ^{ns}	-0,072 ^{ns}	-0,062 ^{ns}	0,025 ^{ns}	-0,255**	0,385**	0,326**								
pHa2	-0,005 ^{ns}	0,236*	-0,211*	-0,231*	-0,209 ^{ns}	-0,111 ^{ns}	-0,094 ^{ns}	0,750**	0,643**	0,686**	-0,102**							
pHk2	0,128 ^{ns}	0,229*	-0,217*	-0,235*	-0,216*	-0,156 ^{ns}	-0,072 ^{ns}	0,564**	0,702**	0,711**	0,252**	0,816**						
pHc2	0,183*	0,233*	-0,155 ^{ns}	-0,178 ^{ns}	-0,156 ^{ns}	-0,124 ^{ns}	-0,072 ^{ns}	0,524**	0,627**	0,688**	0,202*	0,791**	0,927**					
DpH2	0,228*	0,049 ^{ns}	-0,065 ^{ns}	-0,066 ^{ns}	-0,066 ^{ns}	-0,106 ^{ns}	0,014 ^{ns}	-0,127 ^{ns}	0,269**	0,219*	0,585**	-0,060 ^{ns}	0,528**	0,438**				
pHa3	0,218*	0,223*	0,029 ^{ns}	0,017 ^{ns}	0,010 ^{ns}	-0,128 ^{ns}	-0,098 ^{ns}	0,323**	0,204*	0,289**	-0,185*	0,410**	0,336**	0,394**	-0,022 ^{ns}			
pHk3	0,299**	0,167 ^{ns}	0,070 ^{ns}	0,053 ^{ns}	0,051 ^{ns}	-0,124 ^{ns}	-0,071 ^{ns}	0,165 ^{ns}	0,077 ^{ns}	0,139 ^{ns}	-0,158*	0,258**	0,249**	0,302**	0,052 ^{ns}	0,848**		
pHc3	0,294**	0,205*	0,088 ^{ns}	0,082 ^{ns}	0,071 ^{ns}	-0,122 ^{ns}	-0,045 ^{ns}	0,218*	0,083 ^{ns}	0,155 ^{ns}	-0,225**	0,291**	0,242**	0,299**	-0,010 ^{ns}	0,845**	0,980**	
DpH3	0,268**	0,024 ^{ns}	0,091 ^{ns}	0,074 ^{ns}	0,080 ^{ns}	-0,064 ^{ns}	-0,006 ^{ns}	-0,106 ^{ns}	-0,115 ^{ns}	-0,109 ^{ns}	-0,054 ^{ns}	-0,046 ^{ns}	0,031 ^{ns}	0,054 ^{ns}	0,121 ^{ns}	0,285**	0,750**	0,717**

^(a) TCH, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB são, respectivamente, a produtividade 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; pHa, pHk, pHc e DpH são respectivamente atributos químicos da reação do solo nas respectivas camadas: (1:0-0,20m; 2:0,20-0,40m; 3:0,80-1,00m); ^(b) * significativo ao nível de 5% de probabilidade; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade; ^{ns} não significativo.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

que apresentou correlação, ficando evidenciado esse atributo como potencializador de incremento direto da produtividade, o que é esperado, uma vez que o número de indivíduos é fator determinante para definir a produtividade da cultura, conforme também observado por Braga (2011), o qual obteve correlação positiva entre POP e TCH com um coeficiente de correlação ($r = 0,430^{**}$). Por outro lado, a POP também apresentou importante correlação com ATR e POL, porém de forma indireta indicando que o incremento destes atributos (ATR e POL) se dará à medida que menor for o número de indivíduos por área. Em outras palavras, quanto menor a competição das plantas em um determinado espaço, maior o aproveitamento dos nutrientes, ar, água do solo, e conseqüentemente maior conversão em açúcares.

4.2.1.1.2 Atributos da planta versus atributos do solo

As correlações entre produtividade de colmos da cana (TCH) e os atributos do solo (Quadro 4) apresentaram significância exclusiva para os pares TCH vs pHc2 ($r = 0,183^*$), TCH vs DpH2 ($r = 0,228^*$), TCH vs pHa3 ($r = 0,218^*$), TCH vs pHk3 ($r = 0,299^{**}$), TCH vs pHc3 ($r = 0,294^{**}$) e, TCH vs DpH3 ($r = 0,268^{**}$), sendo todos de forma direta (positiva), concordando com o obtido por Miguel (2010) que também verificou correlação direta entre pH e a produtividade da cana-de-açúcar. Deste modo, com o aumento do pH, principalmente nas camadas mais profundas (0,80-1,00m), e conseqüentemente redução da acidez, haverá o incremento da produtividade, seja pela maior disponibilidade de nutrientes proporcionada, ou seja pela redução dos efeitos de toxidez do alumínio (DIAS; ROSSETTO, 2006), mais comuns nas camadas mais profundas do solo. A literatura também tem indicado correlação inversa entre causa efeito para a interação pH vs produtividade da cana, como por exemplo, nos trabalhos de Cerri (2005) e Souza et al. (2008). Assim, conforme observado neste estudo e de acordo com o fato apontado e comprovado no trabalho de Miguel (2010), outras pesquisas têm mostrado baixa correlação entre atributos físicos/químicos do solo com a produtividade das culturas (CERRI, 2005; SOUZA et al., 2008). Já o atributo Delta pH do solo, quando avaliado na camada de 0,20-0,40m (DpH2) e na camada de 0,80-1,00m (DpH3), também apresentou correlação significativa e positiva entre causa e efeito quando pareados com a produtividade da cana (TCH).

Em virtude dos baixos coeficientes de correlação observados entre os atributos da produtividade da cultura com atributos do solo [r abaixo de 0,500], Souza et al. (2008) com base em seu trabalho e demais referências (KRAVCHENCO; BULLOCK, 2000; SOUZA et al., 2004) relataram que o relevo tem sido um atributo de definição da distribuição de

atributos químicos do solo, deste modo apresentando altas correlações com a produtividade de culturas. Porém, do ponto de vista prático agrônomo, o relevo como atributo de análise não é comumente passível de manejo agrícola como os demais atributos físicos e químicos do solo, principalmente por ele de certa forma agregar a influência exercida por um conjunto de fatores cujo manejo deve ser específico, diferentemente da observação de um exclusivo atributo passível de manejo como o pH (calagem, drenagem). Assim, diferentemente do relevo, os atributos químicos e físicos do solo, mesmo tendo sido de baixa correlação, quando significativa, devem ser tecnicamente consideradas.

As correlações entre os atributos do solo e os demais atributos da cana-de-açúcar (Quadro 4) mostraram-se significativas exclusivamente para os pares POP vs pHa2 ($r = 0,236^*$), POP vs pHk2 ($r = 0,229^*$), POP vs pHc2 ($r = 0,233^*$), POP vs pHa3 ($r = 0,223^*$), POP vs pHc3 ($r = 0,205^*$); ATR vs pHa2 ($r = -0,211^*$), ATR vs pHk2 ($r = -0,217^*$); BRI vs pHa2 ($r = -0,231^*$), BRI vs pHk2 ($r = -0,235^*$) e, POL vs pHk2 ($r = -0,216^*$), todas à 5% de significância. Os atributos do solo (pHa2, pHk2, pHc2, pHa3, pHc3) quando pareados com a POP foram de correlação direta entre causa e efeito, ou seja, demonstrando que o aumento do pH influenciou positivamente na população industrialmente viável da cultura da cana. Já com relação aos atributos tecnológicos (ATR, BRI e POL), quando os atributos do solo com eles correlacionados (pHa2, pHk2, pHc2) indicaram que o aumento do pH na segunda camada (0,20-0,40 m) proporcionaria menores rendimentos para ATR, BRI e POL, mostrando que tais atributos, para a variedade trabalhada (RB 855453), não são favoravelmente estimuladas pela elevação do pH, mas pelo contrário, parecendo indicar, estes atributos, que solos mais ácidos não representariam um ambiente menos propício no alcance dos melhores índices de ATR, BRI e POL.

4.2.1.1.3 Atributos do solo versus atributos do solo

As correlações entre os atributos do solo foram, em sua grande maioria, significativas. Fato este por se tratar, à exceção do Delta pH, de um mesmo atributo, apenas analisado sob diferentes metodologias, indicando assim, no geral, a mesma tendência entre eles, principalmente quando na mesma camada de avaliação. Por outro lado, sendo o Delta pH um atributo oriundo do conjunto pH determinado em KCl e o pH determinado em água, também possui em seus valores a mesma genética e portanto a mesma tendência, sendo neste caso de menor importância à discussão dessas situações constatadas.

4.2.1.2 Regressão simples entre os atributos estudados

No geral foram verificadas equações de regressão com maior expressividade entre atributos, cujos coeficientes de correlação foram apresentados no Quadro 4, a seguir: a) entre os atributos da planta, e, b) entre os atributos da planta em função dos do solo. Deste modo, as equações de regressão simples entre os atributos da produtividade de colmos da cana-de-açúcar (TCH) estão apresentadas no Quadro 5; Figuras 9 e 10. Assim, os modelos apresentados foram para os pares de atributos que exclusivamente proporcionaram correlações significativas e que também apresentaram coeficientes adjuntos das variáveis independentes de forma estatisticamente significativas.

Quadro 5 - Equações de regressão simples e coeficientes do ajuste entre atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).

Modelo matemático ^(a)	Coeficiente de ajuste ^(b)					equação
	a	b	C	r	r ²	
Planta x Planta						
TCH = a . exp^{POP} . b	5,518.10 ¹	6,929.10 ^{-2**}	-	0,393**	-	(9)
ATR = a . exp^{POP} . b	1,507.10 ²	-1,680.10 ^{-2*}	-	-0,185*	-	(10)
POL = a . exp^{POP} . b	1,889.10 ¹	-2,061.10 ^{-2*}	-	-0,194*	-	(11)
ATR = a + b . BRI + c . BRI²	-8,497.10 ¹	1,596.10 ^{1**}	-2,359.10 ^{-1**}		0,828**	(12)
POL = a + b . BRI	-2,068	9,564.10 ^{-1**}	-	0,918**	-	(13)
FIB = a . exp^{BRI} . b	9,524	1,780.10 ^{-2**}	-	0,429**	-	(14)
PUR = a . BRI^b	6,651	8,427.10 ^{-2**}	-	0,251**	-	(15)

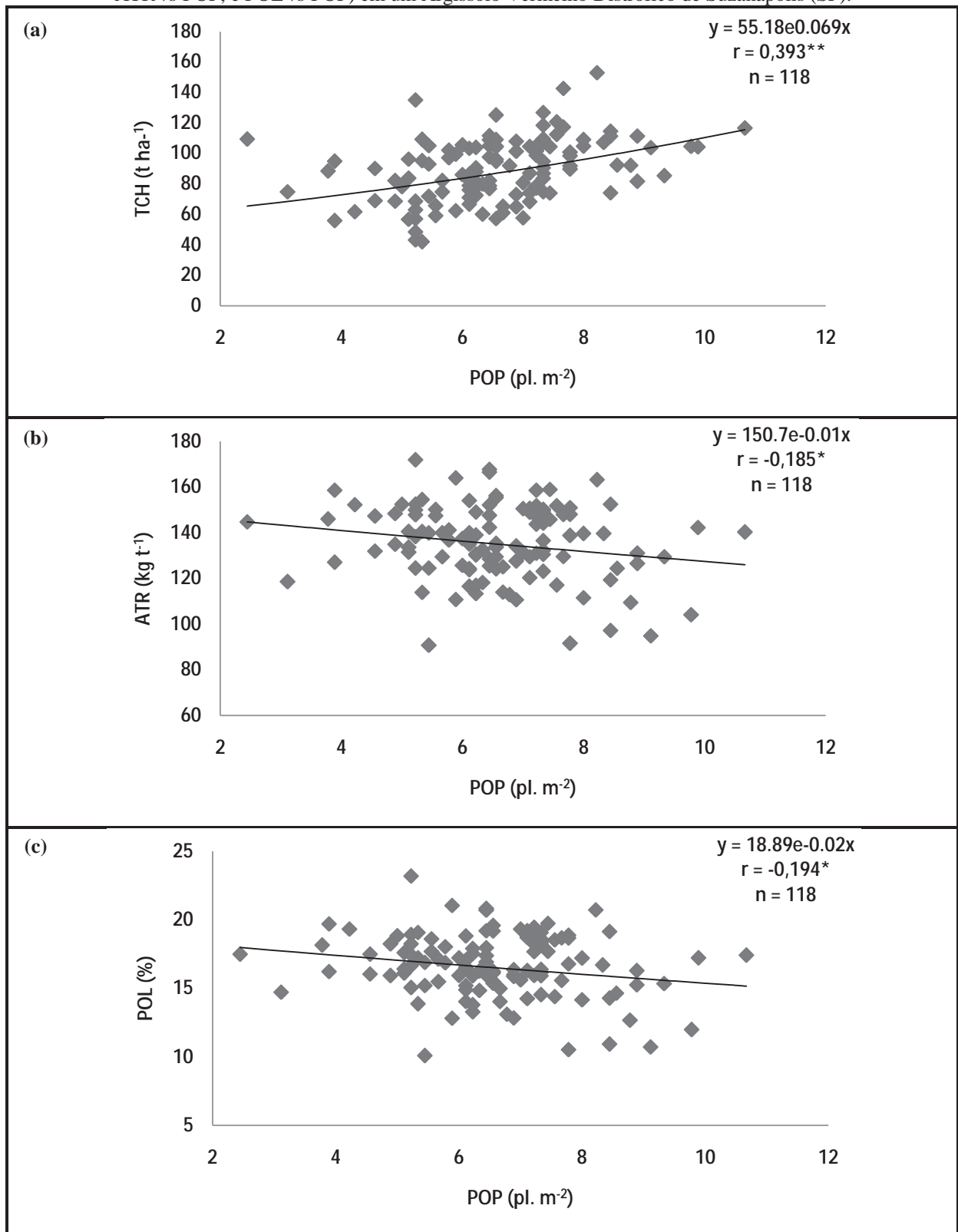
^(a) TCH, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB são, respectivamente, a produtividade de colmos por hectare, população de plantas por metro quadrado, açúcares totais recuperáveis, percentual de sólidos solúveis totais, percentual de sacarose, pureza e percentual de fibra; ^(b) * = significativo a 5%, e ** = significativo a 1%.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Do ponto de vista prático e de maior relevância, no âmbito da regressão entre os atributos da planta, ficou evidenciado ajuste ao modelo exponencial para o par TCH vs POP, dada pelo modelo matemático descrito na eq (9) [Quadro 5]; Figura 9a, indicando que onde a POP variou de 2,4-10,7 pl. m⁻², a TCH apresentou cifras da ordem de 65,1-115,5 t ha⁻¹. Esse intervalo de dados infere que a população ideal, para uma produtividade máxima, nas mesmas condições de solo, e espaçamento de plantas, seria de 10,7 pl. m⁻², equivalente a aproximadamente 16 plantas por metro. Deste modo, a produtividade da cana-de-açúcar RB 855453 pode ser determinada a partir dos dados de população de plantas por meio da eq (9) com elevado nível de significância.

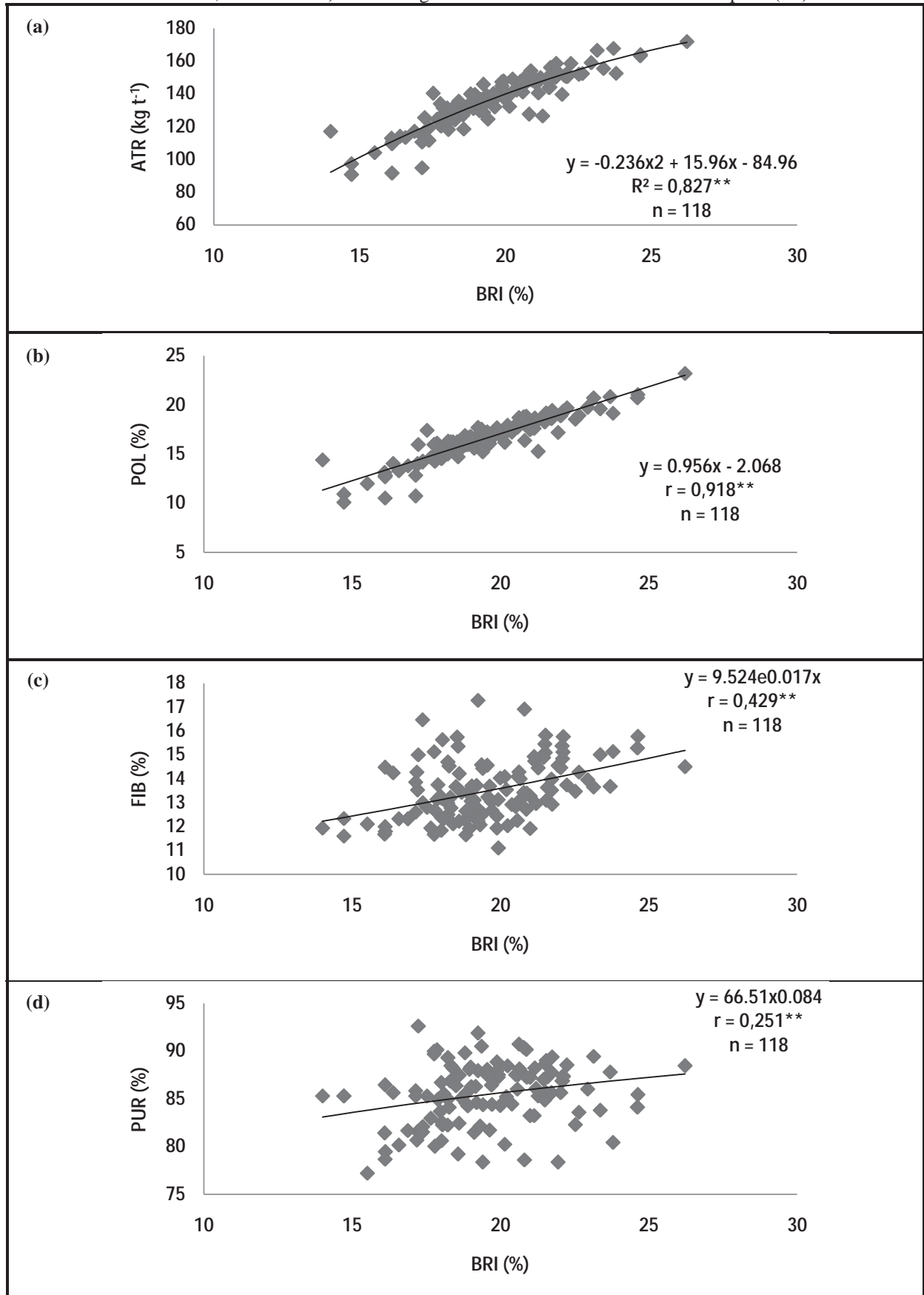
Ainda com relação às demais correlações modeladas (Quadro 5), também foram

Figura 9 - Equações de regressão entre atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar (TCH vs POP, ATR vs POP, e POL vs POP) em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 10 - Equações de regressão entre atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar (ATR vs BRI, POL vs BRI, e FIB vs BRI) em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

evidenciados os seguintes ajustes: exponencial entre ATR vs POP (Figura 9b) e entre POL vs POP (Figura 9c); ajuste quadrático entre ATR vs BRI (Figura 10a); ajuste linear entre POL vs BRI (Figura 10b), ajuste exponencial entre FIB vs BRI (Figura 10c); e ajuste potencial entre PUR vs BRI (Figura 10d). Deste modo, considerando também outros importantes atributos tal como o ATR (essencial na determinação do preço pago pela cana na indústria) e o POL (essencial para decisão do ponto ideal para colheita), tais atributos podem ser estimados por meio do BRIX (BRI) que é um atributo que pode ser facilmente avaliado em campo. Assim, o ajuste quadrático dada pela eq. (12) permite estimar o ATR com uma probabilidade de acerto de 91%; e o ajuste exponencial dado pela eq. (13) permite estimar o POL com uma probabilidade de acerto de 92%.

As equações de regressão simples entre os atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar com os atributos do pH do solo estão apresentadas no Quadro 6 e Figuras 11, 12, 13, 14 e 15.

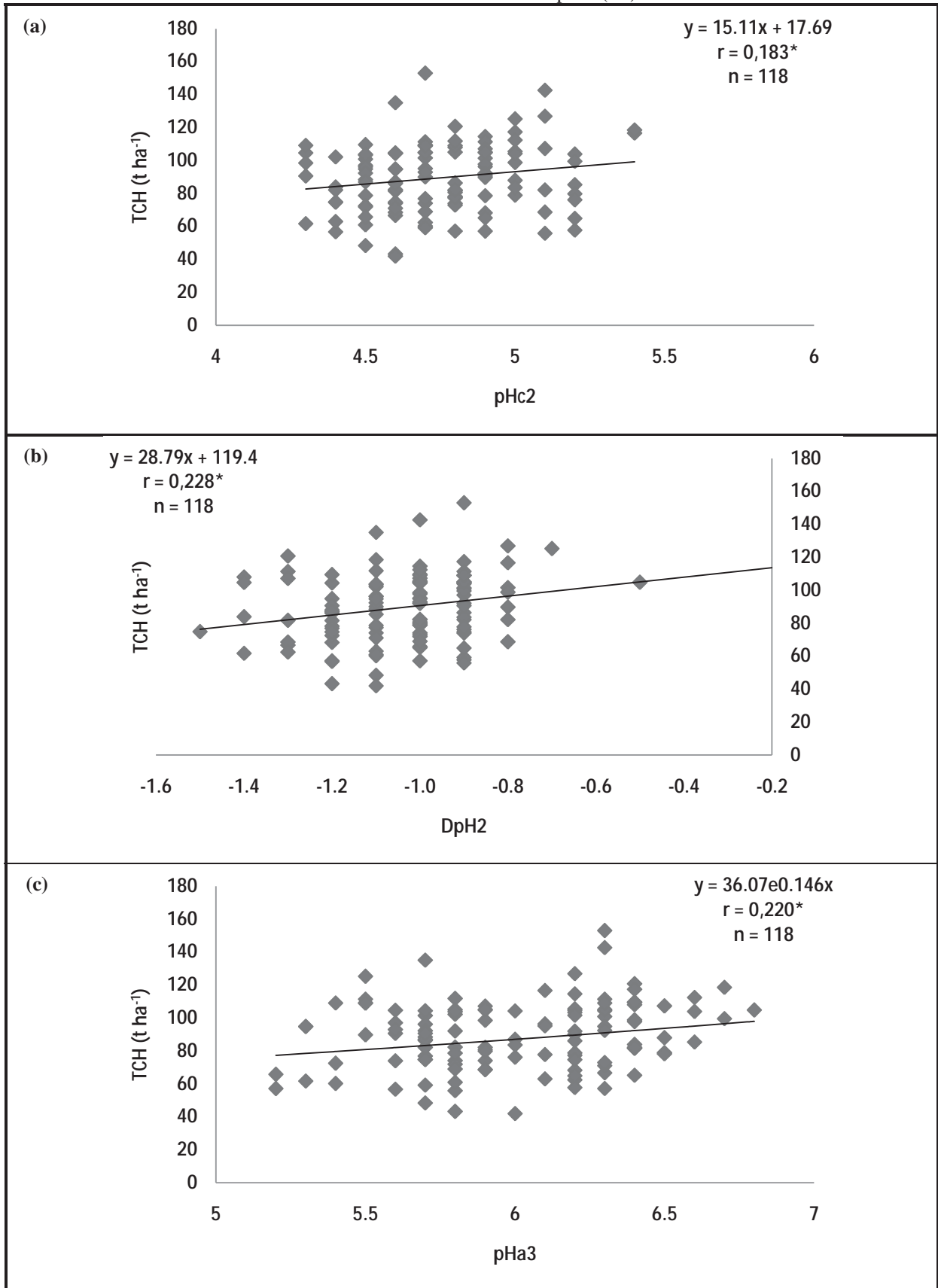
Quadro 6 - Equação de regressão simples e coeficientes do ajuste de atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar com alguns atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).

Modelo matemático ^(a)	Coeficiente de ajuste ^(b)					equação
	a	b	c	r	r ²	
Planta x Solo						
TCH = a + b . pHc2	1,769.10 ¹	1,511.10 ^{1*}	-	0,183*	-	(16)
TCH = a + b . DpH2	1,194.10 ²	2,879.10 ^{1*}	-	0,228*	-	(17)
TCH = a . exp^{pHa3 . b}	3,607.10 ¹	1,468.10 ^{-1*}	-	0,220*	-	(18)
TCH = a + b . pHk3	3,172.10 ¹	1,169.10 ^{1**}	-	0,299**	-	(19)
TCH = a + b . pHc3	2,997.10 ¹	1,245.10 ^{1**}	-	0,294**	-	(20)
TCH = a + b . DpH3	1,095.10 ²	1,896.10 ^{1**}	-	0,268**	-	(21)
POP = a . exp^{pHa2 . b}	1,663	2,248.10 ^{-1**}	-	0,239*	-	(22)
POP = a . exp^{pHk2 . b}	2,480	1,914.10 ^{-1**}	-	0,239*	-	(23)
POP = a + b . pHa3	1,520	8,430.10 ^{-1*}	-	0,223*	-	(24)
POP = a + b . pHc2	4,842.10 ⁻¹	1,282*	-	0,233*	-	(25)
ATR = a + b . pHa2	2,215.10 ²	-1,422.10 ^{1*}	-	-0,211*	-	(26)
ATR = a + b . pHk2	1,979.10 ^{2**}	-1,245.10 ^{1*}	-	-0,217*	-	(27)
BRI = a . exp^{pHa2 . b}	3,811.10 ¹	-1,118.10 ^{-1**}	-	-0,237*	-	(28)
BRI = a . exp^{pHk2 . b}	3,130.10 ¹	-9,564.10 ^{-2**}	-	-0,238*	-	(29)
POL = a + b . pHk2	2,542.10 ¹	-1,762*	-	-0,216*	-	(30)

^(a) TCH, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB são, respectivamente, a produtividade 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; pHa, pHk, pHc e DpH são respectivamente atributos da reação do solo nas respectivas camadas: (1:0-0,20m; 2:0,20-0,40m; 3:0,80-1,00m); ^(b) * = significativo a 5%, e ** = significativo a 1%.

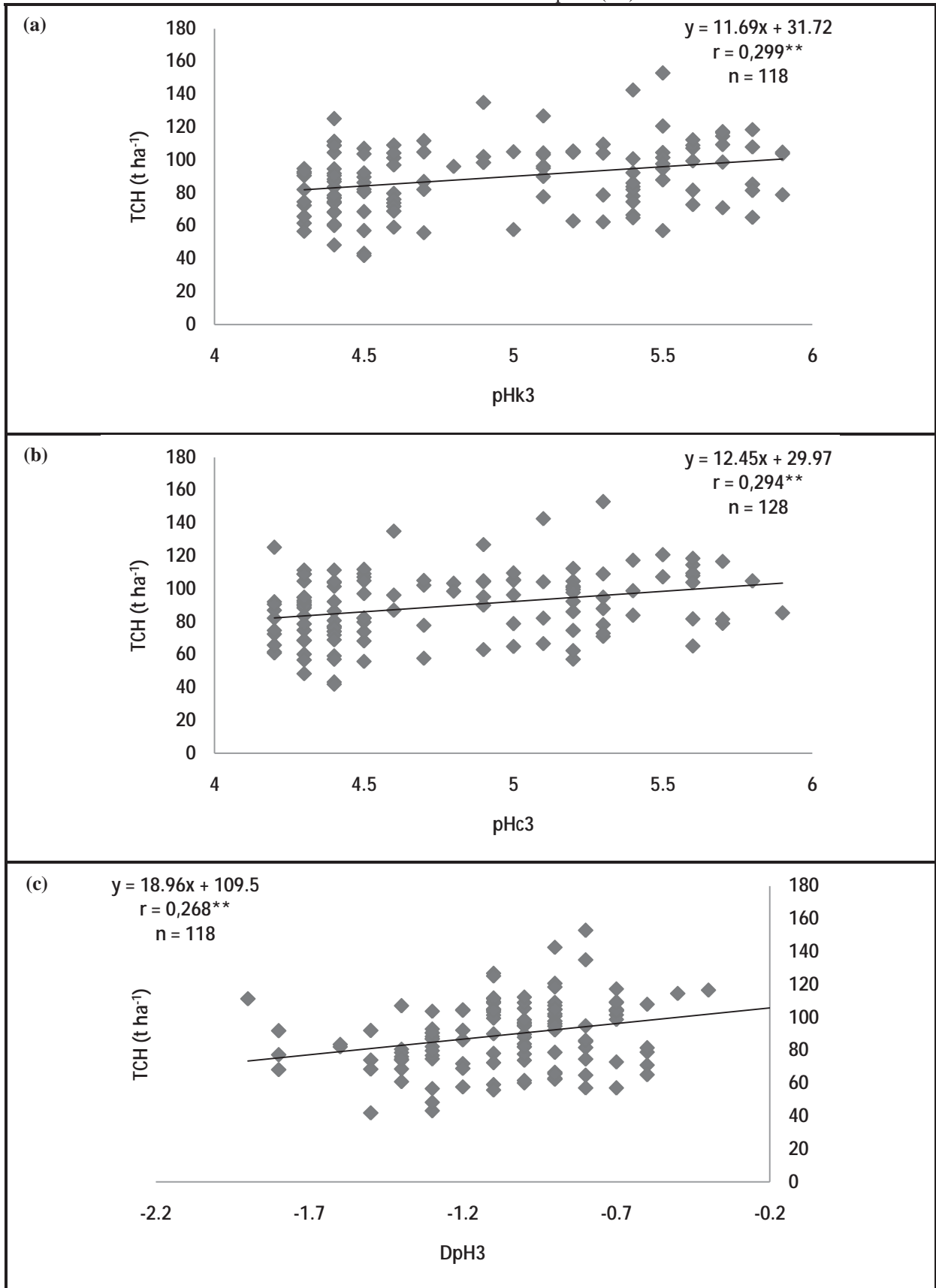
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 11 - Equações de regressão da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).



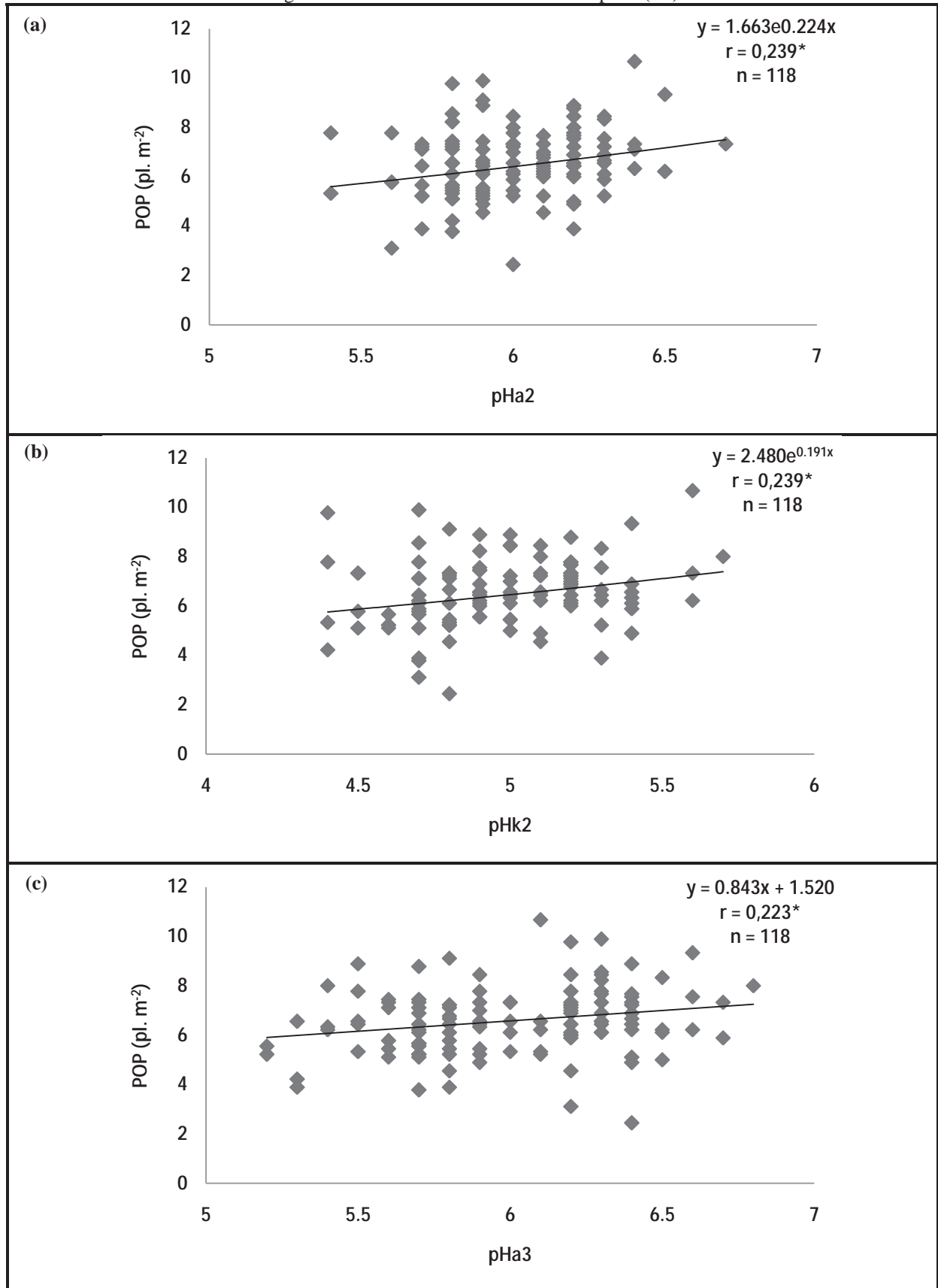
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 12 - Equações de regressão da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).



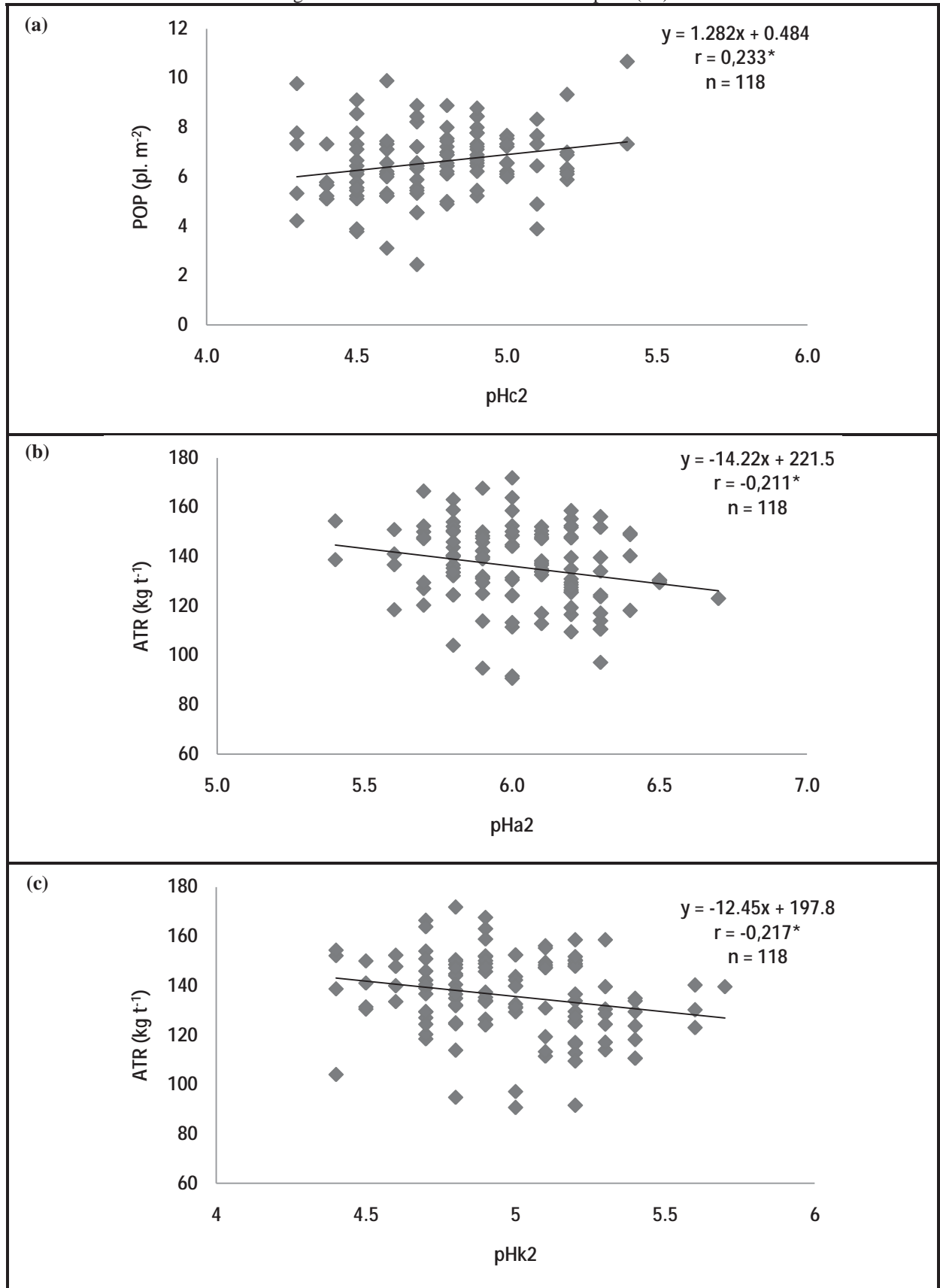
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 13 - Equações de regressão da população de plantas de cana-de-açúcar (POP) em função do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).



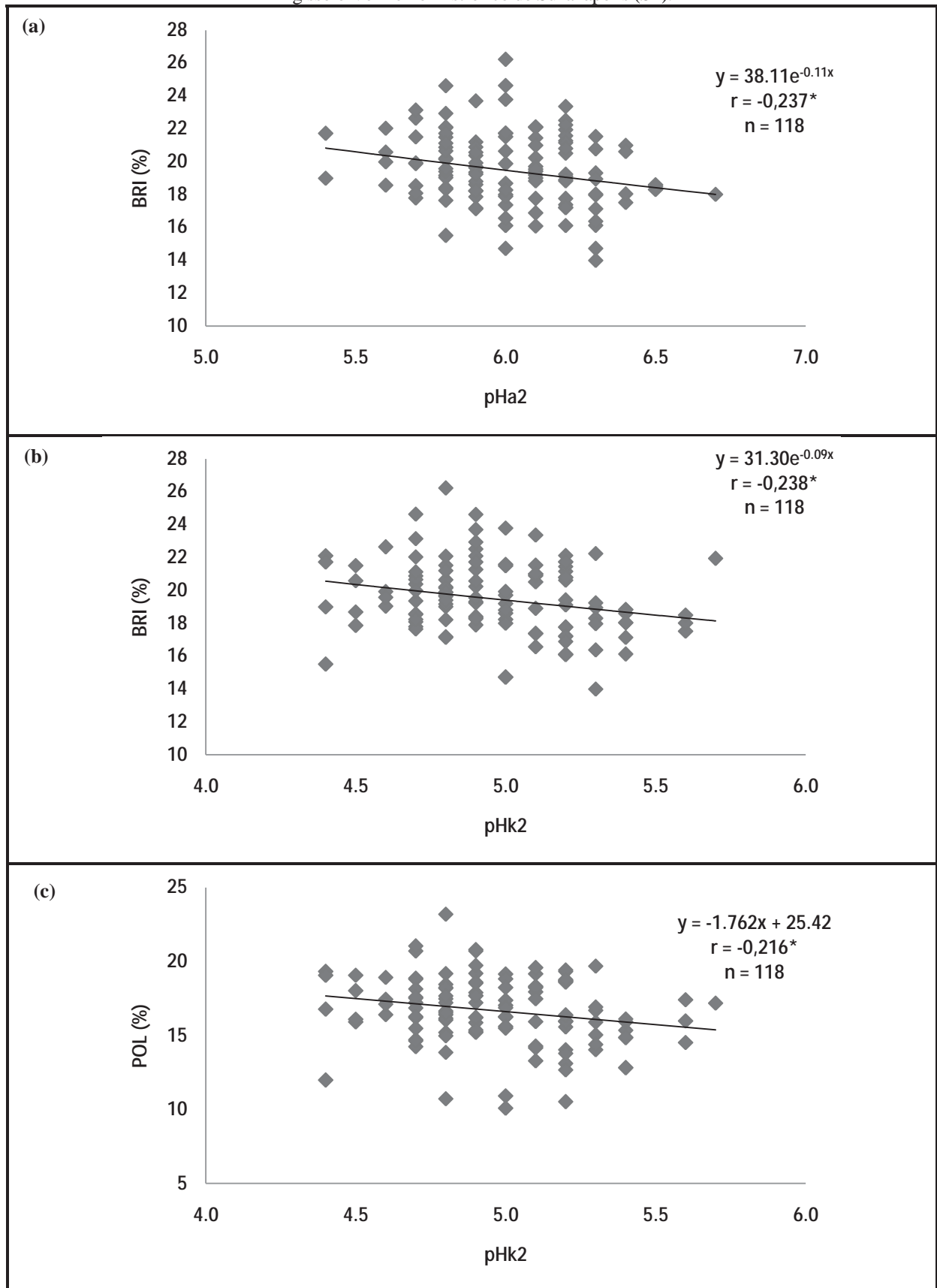
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 14 - Equações de regressão de atributos tecnológicos da cana-de-açúcar (POP e ATR) em função do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 15 - Equações de regressão de atributos tecnológicos da cana-de-açúcar (POL e BRI) em função do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Considerando-se os atributos da planta e os atributos do pH do solo, relações lineares foram obtidas entre os seguintes pares TCH vs pHc2, TCH vs DpH2, TCH vs pHa3 (Figura 11a,b,c); TCH vs pHk3, TCH vs pHc3, TCH vs DpH3 (Figura 12a,b,c); POP vs pHa2, POP vs pHk2, POP vs pHa3 (Figura 13a,b,c); POP vs pHc2; ATR vs pHa2, ATR vs pHk2 (Figura 14a,b,c); BRI vs pHa2, BRI vs pHk2, e POL vs pHk2 (Figura 15a,b,c).

Assim, dentre as regressões modeladas (planta vs solo), destacam-se como as principais, a da produtividade de colmos de cana-de-açúcar (TCH) em função dos atributos pHk3, pHc3, em virtude de sua importância agrônômica e do seu maior grau de significância apresentada entre as correlações. Ressalta-se que estas combinações que resultaram nos melhores ajustes com o atributo da planta (TCH) representam a interação direta entre causa e efeito da ação dos atributos estudados no solo à profundidade de 0,80-1,00m. Ou seja, indicando que a camada menos impactada pelo manejo agrícola, e também aquela menos estudada com a finalidade de incremento na produtividade agrícola, possibilitou observar as melhores interações com o atributo da planta. Tal fato muito provavelmente por se tratar de um Argissolo com horizonte b textural abrupto que se inicia em torno dos 0,60m de profundidade (Quadro 1), ou seja, nas camadas superiores tem-se um solo muito mais arenoso e nas camadas mais profundas (abaixo de 0,60m) uma maior concentração de argila, esta que é essencial para a atividade química do solo e conseqüentemente responsável pela êxito de resposta às necessidades nutricionais das plantas.

Deste modo, as regressões da TCH em função do pHk3, pHc3 e do DpH3 apresentaram relação positiva entre causa e efeito [Quadro 6: eq. 19, 20 e 21; Figura 12a,b,c]. Assim, a relação linear entre TCH e o pHk3, cujo modelo matemático dado por: $y=11,69**x+31,72$ ($r=0,299**$), indicou que onde o pHk3 variou em torno de 4,5, apresentou produtividades da ordem de 84,32 t ha⁻¹, já onde o pHk3 variou em torno de 5,5 a produtividade variou em torno de 96,01 t ha⁻¹. Se for contemplado um maior detalhamento, será observado que o aumento de 1 décimo nos valores de pH na terceira camada estudada sugeriu um incremento de 1,17 t ha⁻¹ na produtividade da cana. Na regressão da produtividade (TCH) em função do pHc3 cujo o modelo matemático: $y=12,45**x + 29,97$ ($r=0,299**$), indicou que quando o pHc3 for 4,5, a produtividade será de 85,99 t ha⁻¹, e onde o pHc3 for 5,5 a produtividade será de 98,44 t ha⁻¹. Sendo que o aumento de um décimo nos valores de pHc3 denotaria no o aumento de 1,25 t ha⁻¹. Assim, no âmbito do manejo do solo, as equações apresentadas são altamente relevantes, uma vez que tal relação indicou que a qualidade química na camada mais profunda avaliada, que de certo modo até então pouco considerada do ponto de vista prático agrônômico, se mostrou como fator de incremento da produtividade

da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho. Deste modo, para a camada estudada de 0,80-1,00m, o pH_k e o pH_c, como foram os atributos que refletiram melhor o conjunto de algumas das influências das propriedades químicas do solo (aumento/diminuição da CTC; disponibilidade, solubilidade e aproveitamento de nutrientes; redução da toxidez por alumínio), e portanto, podem ser atributos de essencial importância para o manejo da área de estudo quando se almeja o incremento produtivo da TCH.

4.2.1.3 Regressão linear múltipla entre os atributos estudados (stepwise)

Na análise de regressão múltipla, com relação a produtividade da cana (TCH) quando estabelecida como variável dependente, e seus demais atributos tecnológicos como variáveis independentes, os testes realizados não denotaram resultados significativos. Já quando se avaliou a produtividade da cana contra todos os atributos do pH do solo, o modelo testado (eq. 31) apresentou significância à 10% de probabilidade na explicação da variação da produtividade (TCH), sendo os coeficientes das variáveis independentes DpH2 e pH_{k3} significativos a 1% (**), conforme análise de variância expressa no Quadro 7. Assim:

$$\text{TCH} = 61,866 + 26,915.\text{DpH2} + 11,266.\text{pHk3} \quad (r^2 = 0,135) \quad (31)$$

onde: **TCH** é a produtividade de colmos da cana-de-açúcar (t ha⁻¹), **DpH2** é o Delta pH na segunda camada estudada (0,20-0,40m), e o **pHk3** é o pH determinado em cloreto de potássio, na terceira camada estudada (0,80-1,00m).

Com relação à TCH, a sua estimativa foi implementada com a combinação de mais de uma variável, podendo ser atestada pelo incremento significativo do coeficiente de correlação (r) do conjunto de fatores (DpH2 e pH_{k3} [r = 0,367**]) em relação ao atributo individual (Quadro 3) que apresentou o maior coeficiente de correlação para pH_{k3} (r=0,299**).

Quadro 7 - Análise de variância da regressão da produtividade de colmos de cana-de-açúcar (TCH) em função do conjunto de atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).

<i>Causas de variação</i>	<i>GL</i>	<i>SQ</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr > F</i>
<i>Modelo</i>	2	6709.958	3354.979	8.97	< 0,0001
<i>Erro</i>	115	43028	374.154		
<i>Total</i>	117	49738			

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Por outro lado, quando se correlacionou o atributo principal da planta (TCH) em função de todos os demais atributos (planta e solo) houve correlação significativa conforme modelo ajustado abaixo (eq. 32):

$$\text{TCH} = 94,158 + 5,607.\text{POP} + 22,828.\text{DpH2} + 16,777.\text{pHk3} \quad (r^2 = 0,250) \quad (32)$$

Onde: **TCH** é a produtividade de colmos da cana-de-açúcar (t ha^{-1}), **POP** é a população de plantas (pl. m^{-2}), **DpH2** é o Delta pH na segunda camada estudada (0,20-0,40m), e o **pHk3** é o pH determinado em cloreto de potássio, na terceira camada estudada (0,80-1,00m). Deste modo, observa-se uma melhor correlação explicativa da produtividade da cana, com a influência advinda de três atributos, cujo coeficiente de correlação (r) deste conjunto de fatores (POP, DpH2 e pHk3) foi de $r=0,500^{**}$. Assim, os coeficientes das variáveis independentes POP, DpH2 e pHk3 foram significativos a 1% (**), conforme análise de variância expressa no Quadro 8.

Quadro 8 - Análise de variância da regressão da produtividade de colmos de cana-de-açúcar (TCH) em função do conjunto de atributos da planta e do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).

<i>Causas de variação</i>	<i>GL</i>	<i>SQ</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr > F</i>
<i>Modelo</i>	3	12441	4146.964	12.68	< 0,0001
<i>Erro</i>	114	37297	327.165		
<i>Total</i>	117	49738			

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As demais interações com a produtividade da cana devem-se a outros fatores, de atributos não avaliados. Assim, esta explicação proposta com base na regressão múltipla demonstrou que a implicação na produtividade (TCH) advinda de um conjunto de fatores significativos (da planta e solo) possibilitou resultados com uma maior probabilidade de acerto. Por fim, quando se avaliou cada componente tecnológico da cana-de-açúcar contra os demais atributos do pH do solo, os testes realizados não denotaram resultados significativos.

4.3 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS

4.3.1 Análise semivariográfica simples

4.3.1.1 Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos

Na análise estatística convencional, um dos preceitos para a avaliação dos dados é que eles apresentem distribuição do tipo normal. Conforme observado no Quadro 3, alguns atributos avaliados apresentaram dados com distribuição não normal, porém na análise geoestatística, a normalidade dos dados não é considerada uma exigência. Por outro lado, conforme Isaaks e Srivastava (1989), mais importante é a observância da ocorrência ou não do efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes na área de estudo. Assim, no Quadro 9 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar, bem como dos atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis-SP. Nas Figuras 16-18 são apresentados os semivariogramas simples dos atributos que demonstraram dependência espacial.

À exceção da POP, PUR, e do pHk3, que apresentaram efeito pepita puro (epp.), todos os demais atributos (da planta e do solo) apresentaram dependência espacial (Quadro 9), ficando evidenciado a continuidade do semivariograma para as distâncias amostradas e sua não aleatoriedade de distribuição espacial. A análise dos parâmetros semivariográficos simples revelou ainda para os atributos da planta ajustes do tipo exponencial (#TCH) e esférico (ATR, BRI, POL e FIB), com alcances variando de 139,0m (FIB) a 274,8m (#TCH). Já a análise dos parâmetros semivariográficos simples dos atributos do solo revelou ajustes do tipo esférico (pHa1, pHk1), do tipo exponencial (pHc1, pHc2, pHa2, pHk2) e do tipo gaussiano (DpH1, DpH2, DpH3, #pHa3, #pHc3), com alcances variando de 75m (pHc3) a 465,9m (DpH2).

No geral, ainda foi observado um moderado desempenho dos atributos da planta e do solo dado pelo ADE que variou de 23,5% (#pHc3) a 75,5% (pHc1) (Quadro 9). Deste modo, a ordem dos melhores ajustes, representados por aqueles atributos que apresentaram os maiores coeficiente de determinação espacial (r^2), seguiu a seguinte seqüência, para os atributos da planta: (1) BRI (0,982), (2) ATR (0,904), (3) #TCH (0,882), (4) PUR (0,875), (5) FIB (0,840); e para os atributos do solo: (1) #pHa3 (0,992), (2) pHk1 (0,983), (3) DpH1 (0,981), (4) pHa2 (0,980), (5) pHc2 (0,971), (6) DpH2 (0,968), (7) pHc1 (0,959), (8) DpH3 (0,939),

(9) #pHc3 (0,898), (10) pHa1 (0,860), e (11) pHk2 (0,784). Por sua vez, sendo o TCH o atributo da planta de grande importância agrônômica, e tendo o mesmo apresentado dependência espacial, merece destaque relatar que foi observado para este atributo ajuste ao modelo exponencial com alcance de 274,8m e classe de dependência espacial (ADE) média.

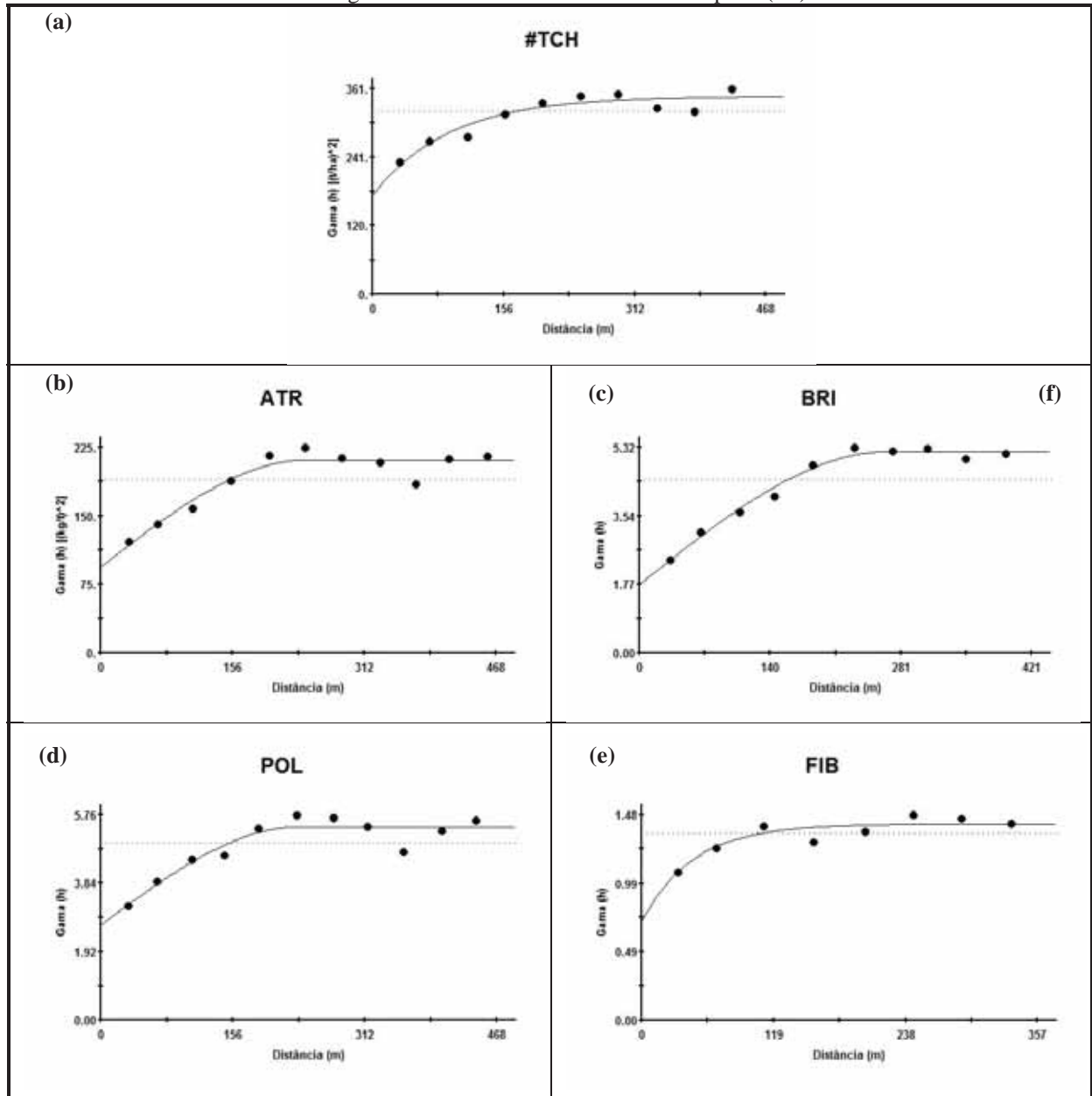
Quadro 9 - Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar, e para os atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).

Atributos ^(a)	Parâmetros do Ajuste										
	modelo ^(b)	C ₀	C ₀ +C	A ₀ (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		validação cruzada		
							%	classe	a	b	r
<i>γ(h) Simples da Planta</i>											
#TCH (t ha ⁻¹)	exp	1,739.10 ²	3,479.10 ²	274,8	0,882	1,850.10 ³	50,0	média	-3,78	0,746	0,288
POP (pl. m ⁻²)	epp	1,950	1,950	-	-	-	-	-	-	-	-
ATR (kg t ⁻¹)	esf	9,380.10 ¹	2,112.10 ²	243,4	0,904	1,160.10 ³	55,6	média	7,41	0,946	0,546
BRI (%)	esf	1,760	5,204	267,7	0,982	1,730.10 ⁻¹	66,2	alta	3,90.10 ⁻¹	0,980	0,614
POL (%)	esf	2,670	5,420	235,1	0,875	8,420.10 ⁻¹	50,8	média	4,00.10 ⁻¹	0,976	0,519
PUR (%)	epp	1,060.10 ¹	1,060.10 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-
FIB (%)	esf	7,100.10 ⁻¹	1,410	139,0	0,840	2,090.10 ⁻²	49,6	média	9,80.10 ⁻¹	0,927	0,373
<i>γ(h) Simples do Solo 0-0,20 m</i>											
pHa1	esf	3,410.10 ⁻²	6,510.10 ⁻²	184,2	0,860	7,521.10 ⁻⁵	47,6	média	3,90.10 ⁻¹	0,934	0,499
pHk1	esf	3,515.10 ⁻²	6,430.10 ⁻²	179,0	0,983	6,687.10 ⁻⁶	45,3	média	3,30.10 ⁻¹	0,934	0,438
pHc1	exp	1,060.10 ⁻²	4,330.10 ⁻²	100,5	0,959	5,657.10 ⁻⁶	75,5	alta	1,30	0,721	0,311
DpH1	gau	1,805.10 ⁻²	3,553.10 ⁻²	416,5	0,981	6,880.10 ⁻⁶	49,2	média	-1,00.10 ⁻¹	0,903	0,366
<i>γ(h) Simples do Solo 0,20-0,40 m</i>											
pHa2	exp	2,960.10 ⁻²	6,130.10 ⁻²	324,0	0,980	9,702.10 ⁻⁶	51,7	média	6,60.10 ⁻¹	0,890	0,444
pHk2	exp	3,460.10 ⁻²	7,210.10 ⁻²	107,0	0,784	4,005.10 ⁻⁵	52,0	média	2,02	0,595	0,210
pHc2	exp	2,791.10 ⁻²	5,772.10 ⁻²	123,6	0,971	3,928.10 ⁻⁶	51,6	média	6,90.10 ⁻¹	0,856	0,329
DpH2	gau	1,359.10 ⁻²	3,108.10 ⁻²	465,9	0,968	1,403.10 ⁻⁵	56,3	média	-6,00.10 ⁻¹	0,940	0,414
<i>γ(h) Simples do Solo 0,80-1,00 m</i>											
#pHa3	gau	5,720.10 ⁻²	8,939.10 ⁻²	98,3	0,992	3,426.10 ⁻⁶	36,0	baixa	0,00	0,932	0,383
pHk3	epp	2,362.10 ⁻¹	2,362.10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-
#pHc3	gau	1,300.10 ⁻¹	1,745.10 ⁻¹	75,0	0,898	8,206.10 ⁻⁵	25,5	baixa	-1,00.10 ⁻²	0,879	0,235
DpH3	gau	4,710.10 ⁻²	7,900.10 ⁻²	93,1	0,939	2,092.10 ⁻⁵	40,4	média	0,00	0,999	0,409

^(a) TCH, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB são, respectivamente, a produtividade 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; pHa, pHk, pHc e DpH são respectivamente atributos da reação do solo nas respectivas camadas: (1:0-0,20m; 2:0,20-0,40m; 3:0,80-1,00m); # trabalhado com o resíduo do atributo; ^(b) gau = gaussiano, exp = exponencial, esf = esférico; epp = efeito pepita puro; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial.

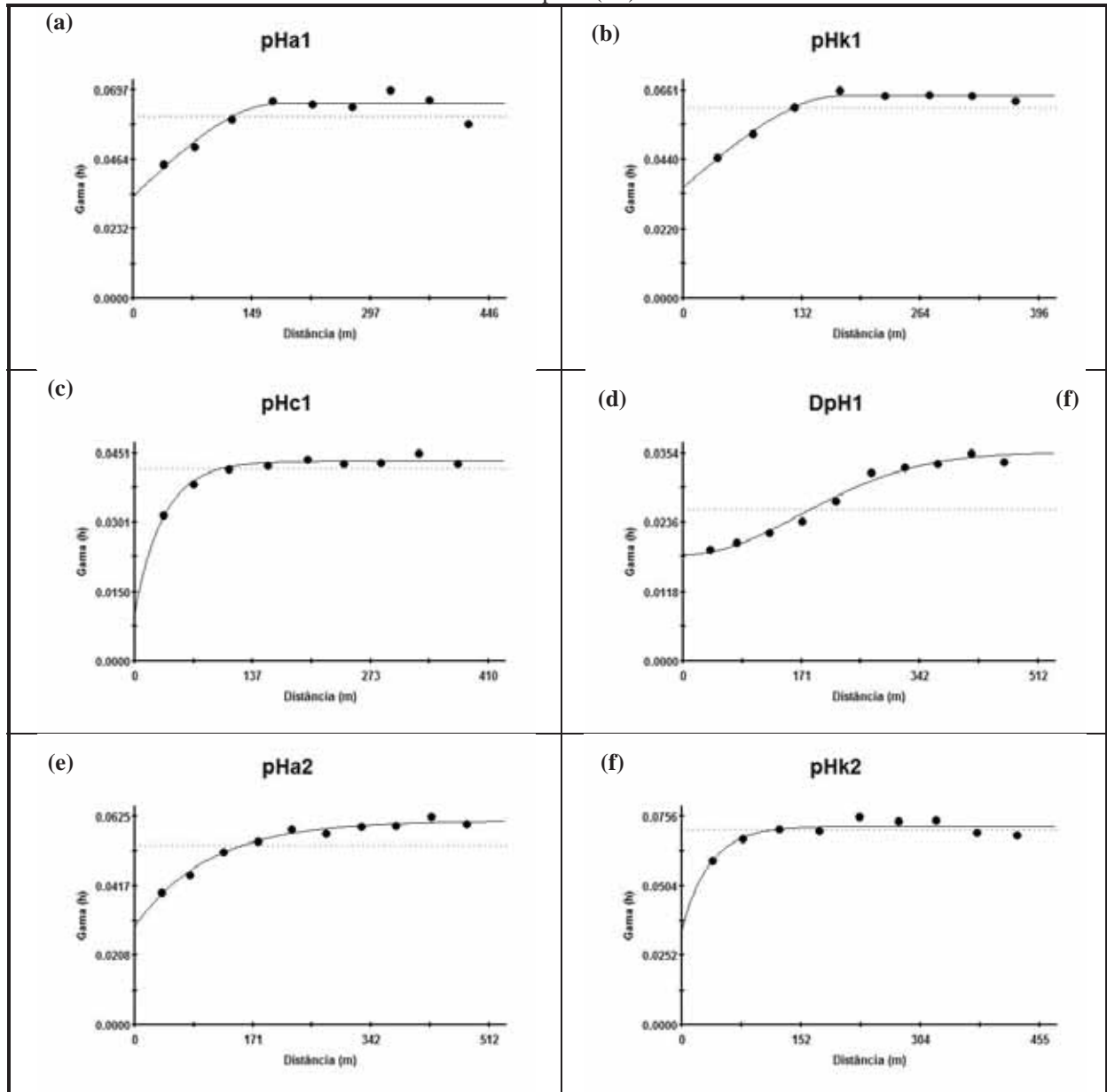
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 16 - Semivariogramas simples ajustados para os atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



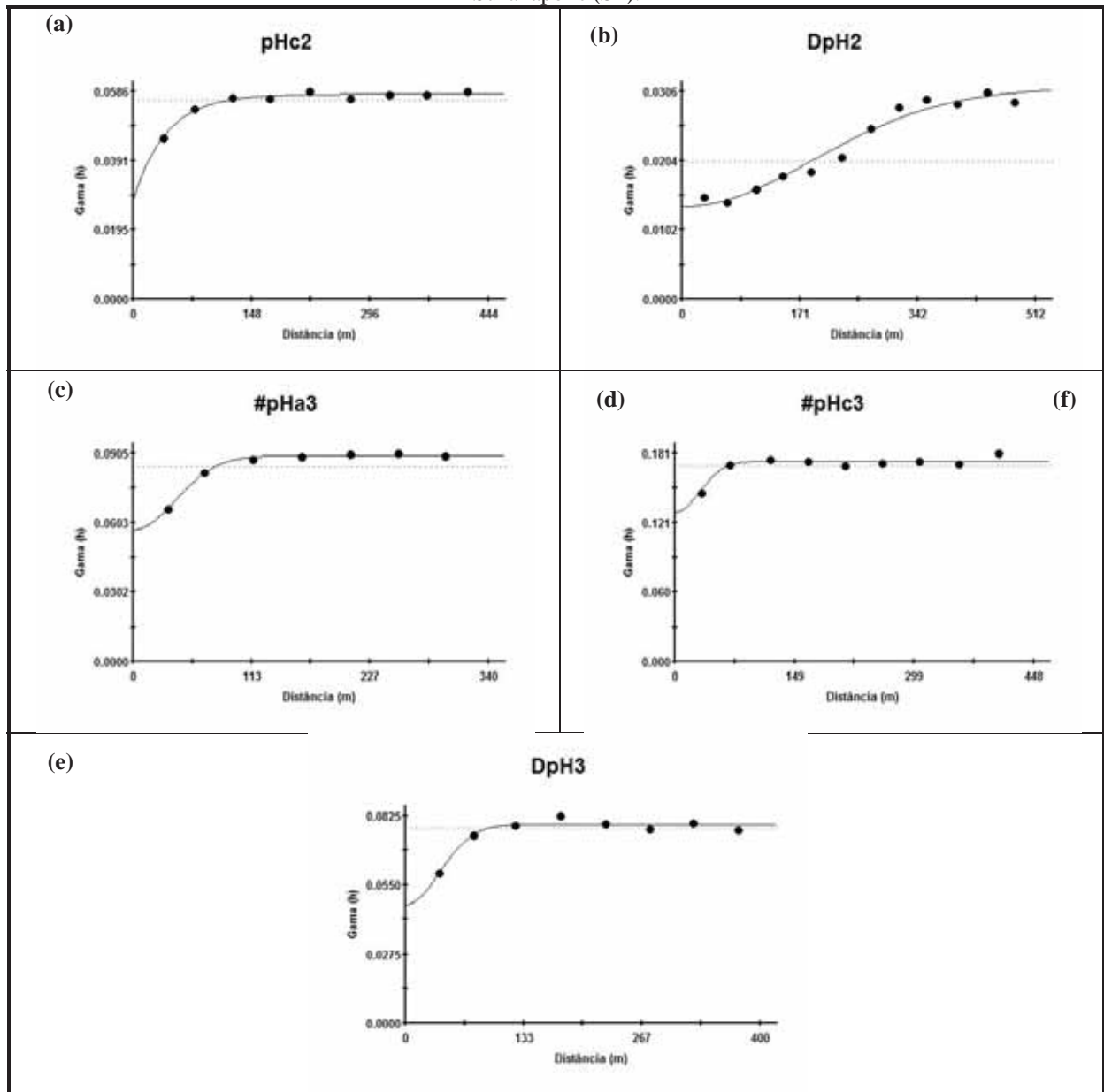
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 17 - Semivariogramas simples ajustados para os atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 18 - Semivariogramas simples ajustados para os atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Buscando comparações com os resultados observados, encontraremos trabalhos como o de Miguel et al. (2009), que estudando a produtividade da cana-de-açúcar em um Nitossolo Vermelho Eutrófico melhor ajustaram este atributo ao modelo do tipo esférico, o qual apresentou um alcance de 150m e médio grau de dependência espacial. Por outro lado, Miguel (2010) trabalhando em um Nitossolo Vermelho Eutrófico verificou para a produtividade da cana-de-açúcar ajuste do tipo exponencial e alcance de 79m com um grau de dependência espacial muito alto. Braga (2011) trabalhando em um Argissolo Vermelho Eutrófico constatou para produtividade da cana soca bisada, ajuste do tipo gaussiano com

alcance de 72,0m e ADE média. Já Souza et al. (2010) ao avaliar a produtividade da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho Amarelo verificaram ajuste esférico com alcance de 471m, porém com um baixo grau de dependência espacial.

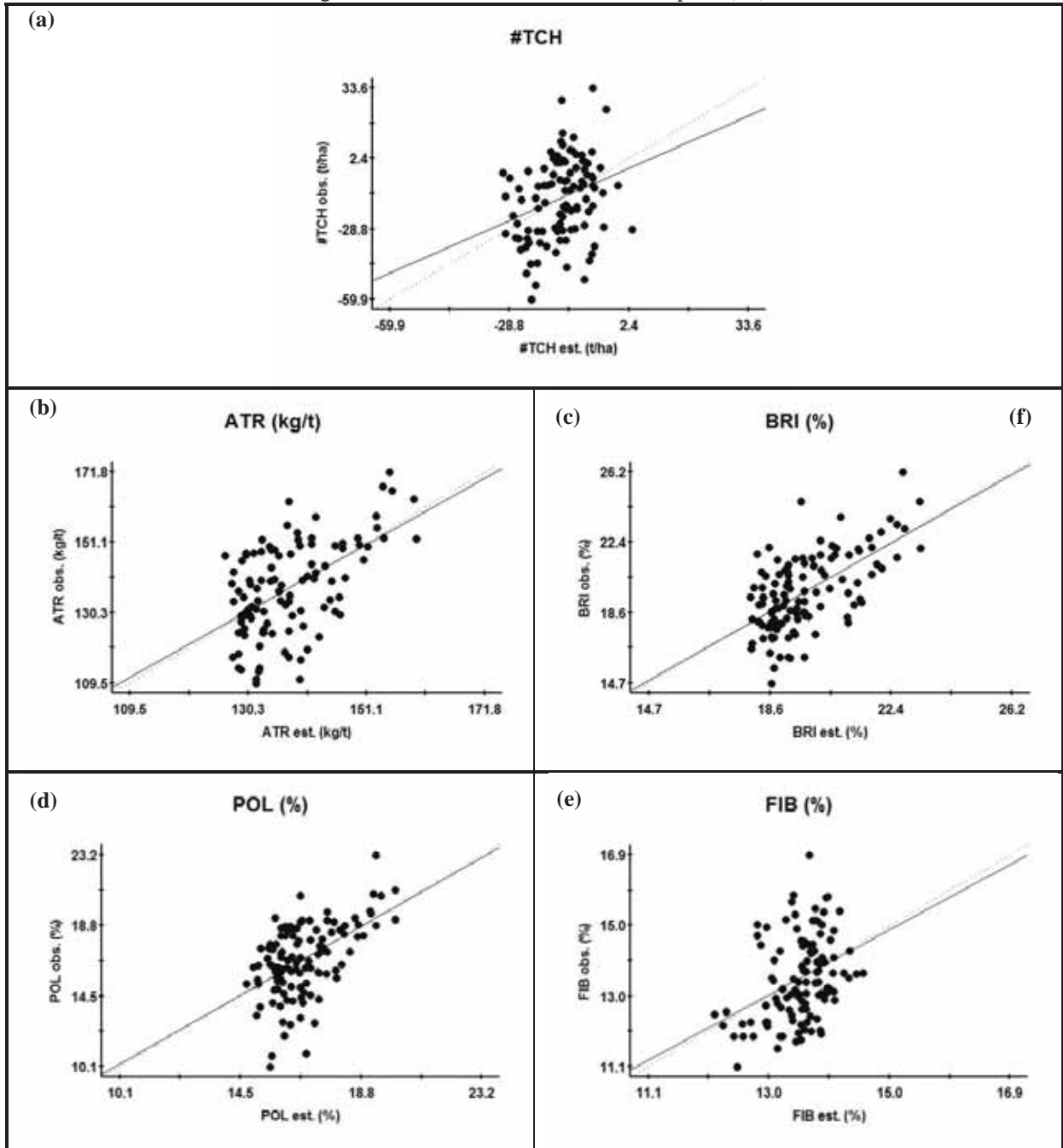
Com relação aos atributos do solo (Quadro 9) considerando todos aqueles que apresentaram dependência espacial, nos da primeira camada (0-0,20m) foram constatados ajustes semivariográficos do tipo esférico, exponencial e gaussiano, com alcances variando de 100,5m (pHc1) à 416,0m (DpH1) e ADE entre média e alta; Na segunda camada (0,20-0,40m) foram observados ajustes do tipo exponencial e gaussianos, com alcances variando de 107,0m (pHk2) à 465,9m (DpH2). Finalmente, na terceira camada (0,80-1,00m) verificaram-se ajustes apenas do tipo gaussiano e alcances variando de 75,0m (#pHc3) a 98,3m (#pHa3), com ADE entre baixa e média. Deste modo, à exceção do Delta pH para o qual ainda tem-se observado alguma dificuldade em encontrar trabalhos que apresentem sua avaliação por meio da aplicação de técnicas geoestatística, como no de Vieira (1997), o pH do solo avaliado, em suas diferentes metodologias testadas apresentaram no geral parâmetros semivariográficos que se mostraram-se em sintonia com os resultados obtidos em diversos trabalhos (BEZERRA, 2008; BRAGA, 2011; CARVALHO et al., 2002; CERRI, 2005; CORÁ et al., 2004; LIMA et al., 2010; MELLO et al., 2006; MIGUEL, 2010) uma vez que neles, ora um ora outro modelo de ajuste (esférico, gaussiano e exponencial), foi observado, bem como alcances (variando de 8,5–783,0m), e ADE (variando de moderado a muito alto).

De acordo com o observado por Dalchiavon (2010), o valor do alcance pode influenciar a qualidade da estimativa, uma vez que determina o número de valores usados na interpolação. Nesse sentido, segundo Corá et al. (2004), as krigagens utilizando os maiores alcances tendem a apresentar mapas que melhor descrevem a realidade local. Portanto, tendo como base o quadro geral dos alcances encontrados no presente estudo, para a área em questão, nos trabalhos futuros de caráter semelhante, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos empregados na agricultura de precisão não deverão ser menores do que 75,0 m, bem como para novas amostragens dos mesmos atributos, o espaçamento máximo entre pontos amostrais na rede de coleta não deverá ser maior que 75 m.

4.3.1.2 Validação cruzada dos semivariogramas simples ajustados

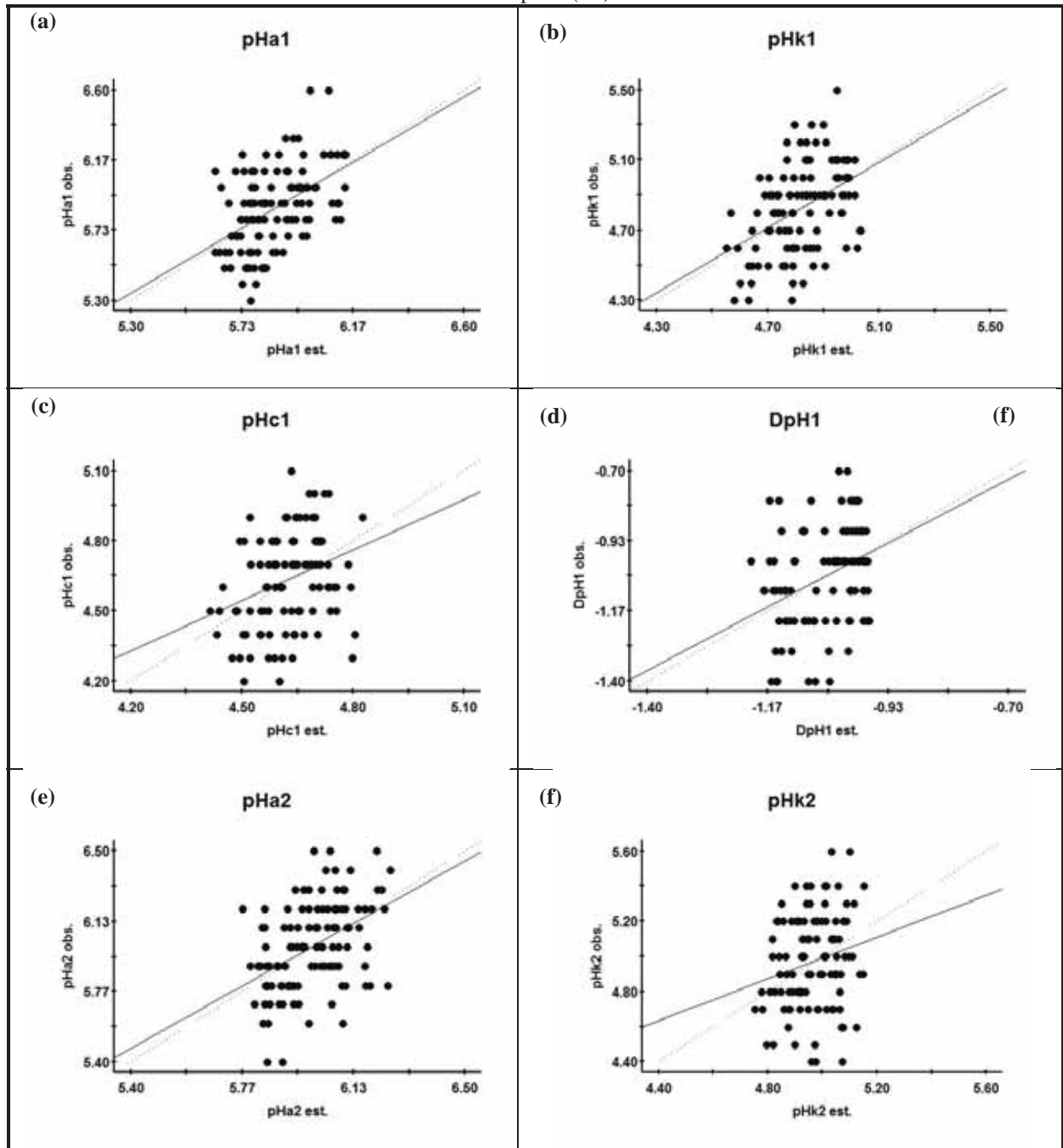
Os parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens para os atributos da planta assim como para os atributos do pH do solo estão apresentados no Quadro 9, e nas Figuras 19-21, estão apresentados as validações cruzadas dos referidos atributos.

Figura 19 - Validações cruzadas ajustadas para os atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).



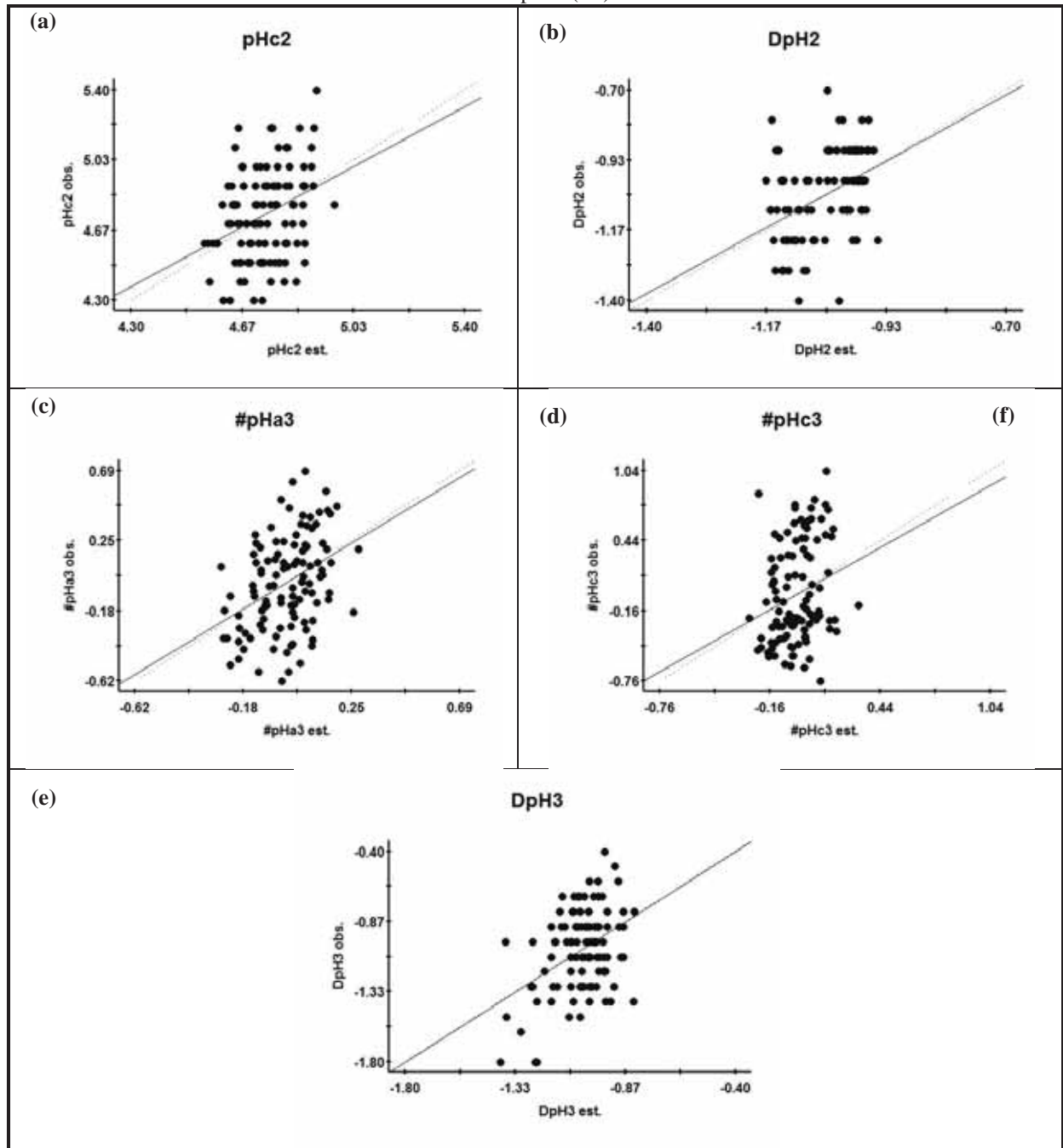
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 20 - Validações cruzadas ajustadas para os atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 21 - Validações cruzadas ajustadas para os atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Deste modo, conforme ordem de grandeza decrescente do parâmetro coeficiente de correlação (r) tem-se a seguinte seqüência (Quadro 9): a) para os atributos da planta – (1) BRI (0,614), (2) ATR (0,546), (3) POL (0,519), (4) FIB (0,373) e, (5) #TCH (0,288); b) para os atributos do solo – (1) pHa1 (0,499), (2) pHa2 (0,444), (3) pHk1 (0,438), (4) DpH2 (0,414), (5) DpH3 (0,409), (6) #pHa3 (0,383), (7) DpH1 (0,366), (8) pHc2 (0,329), (9) pHc1 (0,311), (10) pHc3 (0,235) e, (11) pHk2 (0,210).

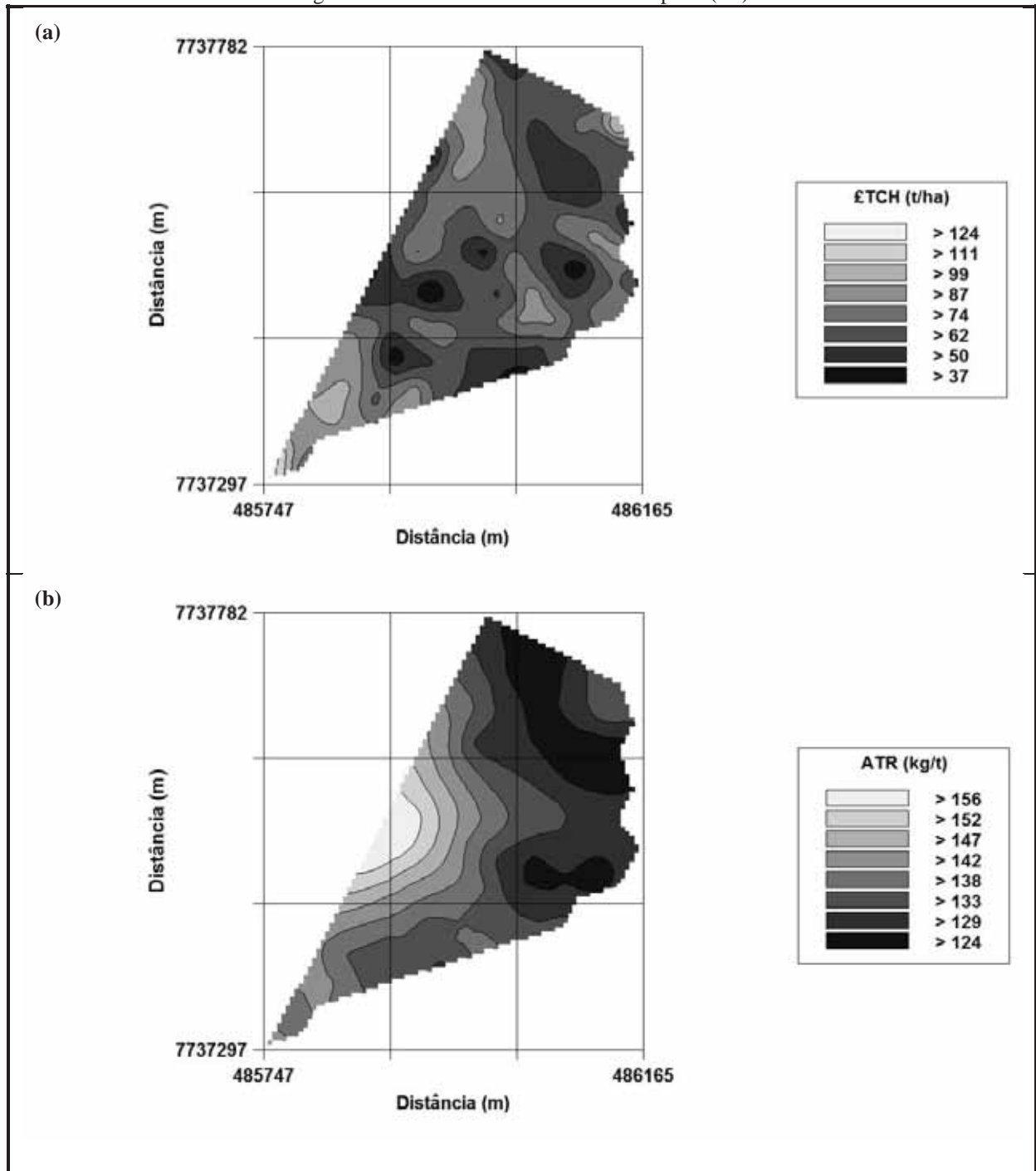
Portanto, dentre os atributos da planta, o BRI foi aquele que apresentou o melhor ajuste, uma vez que, além do melhor desempenho de seu coeficiente de correlação (r) também apresentou o maior coeficiente angular (b). Por outro lado, de modo geral, considerando os atributos do solo, pode-se dizer que em cada camada estudada, na de 0-0,20m, o pHa1, na de 0,20-0,40m, o pHa2 e o DpH2, e na de 0,80-1,00 m, o DpH3, foram aqueles atributos de melhor desempenho no âmbito da análise geoestatística, de acordo com o preconizado por Robertson (2004), onde para o modelo ideal de semivariograma, um ajuste da validação cruzada deve apresentar um coeficiente linear (a) tendendo a zero, assim como com o coeficiente angular (b) e o de correlação (r) tendendo a 1 (um), conforme citado por Lima (2007).

4.3.1.3 Mapas de krigagem dos atributos

Nas Figuras 22-26 estão evidenciados os mapas de krigagens simples dos atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar e do pH do solo. Deste modo, para leitura espacial dos mapas, deve-se definir as direções norte-sul estabelecidas sob o eixo cartesiano y (cima-baixo) e as direções leste-oeste sob o eixo cartesiano x (direita-esquerda). Do ponto de vista prático, no mapa de produtividade da cana-de-açúcar (#TCH; Figura 22a), sendo este o atributo de maior importância agrônômica, nota-se visualmente, que seus valores mostraram um arranjo espacial bem disperso e pouco uniforme na área estudada. Deste modo, em relação aos demais atributos da planta, e também do solo, torna-se difícil observar, pelo menos a grosso modo, visualmente, grandes semelhanças entre eles. Contudo, tal fato não exclui a hipótese da correlação espacial a ser evidenciada pela análise geoestatística.

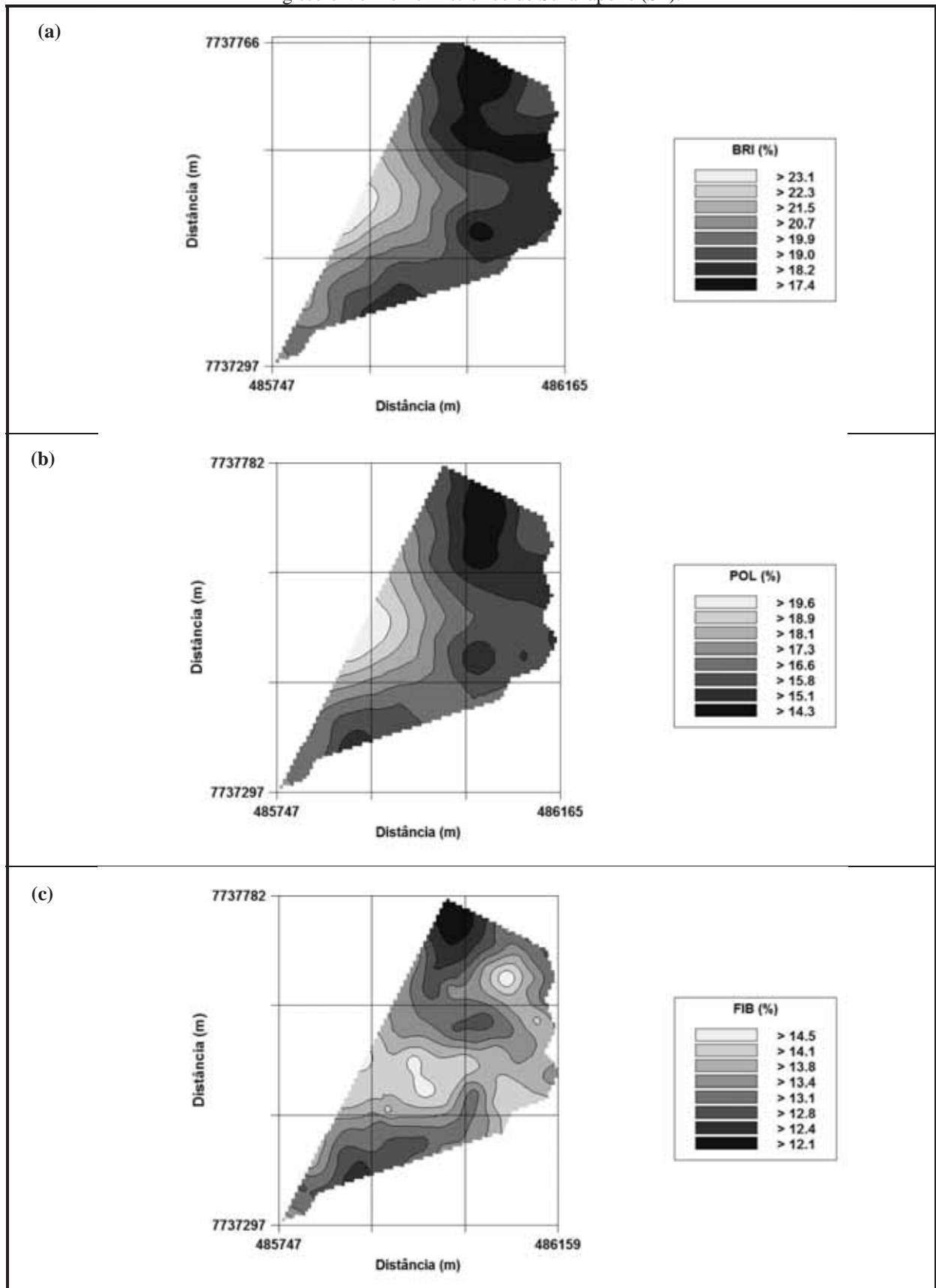
Nas demais krigagens da planta, ATR, BRI, POL e FIB (Figuras 22b; 23a,b,c), foi notada distribuição espacial seus valores muito bem definidas visualmente, o que permitiu aferir que o ATR variou de 124,0-141,9 kg t⁻¹ (regiões norte-nordeste e leste do mapa) a 142,0-156,0 kg t⁻¹ (região centro-sul do mapa); o BRI variou de 17,4-20,6 % (regiões norte-nordeste e leste do mapa) a 20,7-23,1 % (região centro-sul do mapa); e o POL variou de 14,3 a

Figura 22 - Mapas de krigagem dos atributos produtivos e tecnológicos (ϵ TCH e ATR) da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 23 - Mapas de krigagem dos atributos tecnológicos (BRI, POL e FIB) da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 24 - Mapas de krigagem dos atributos do pH (0-0,20m: pHa1, pHk1, pHc1 e DpH1) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).

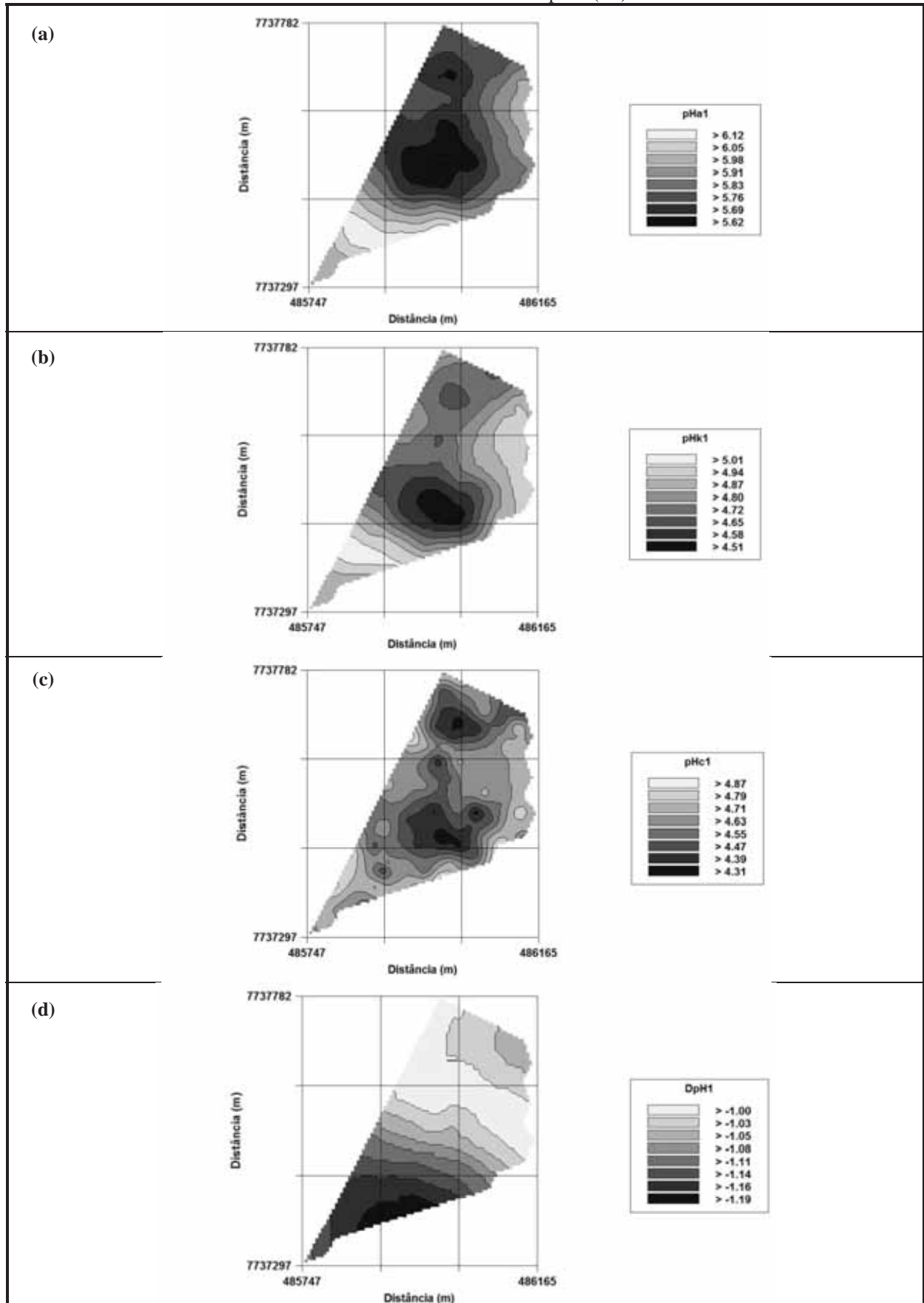
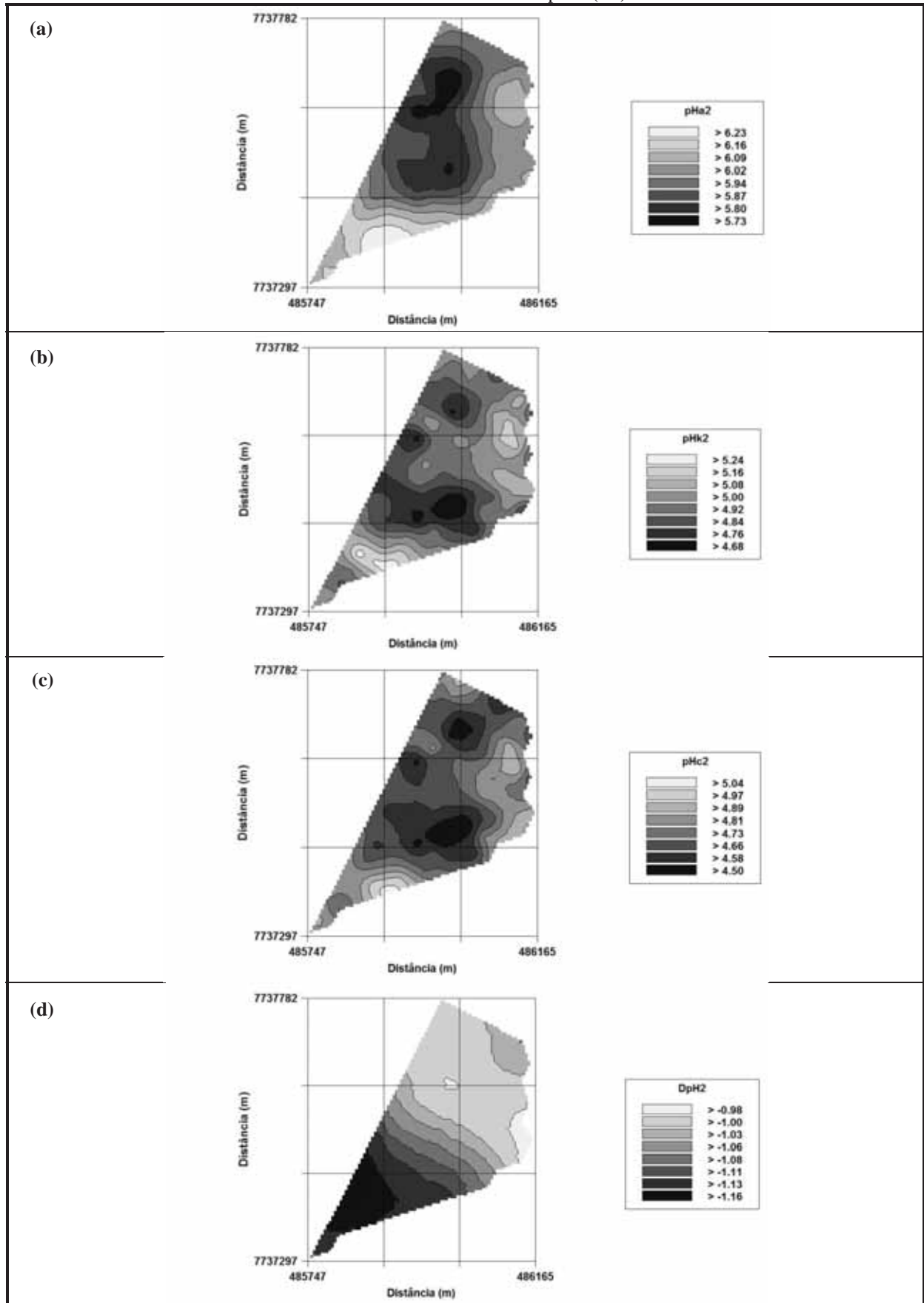
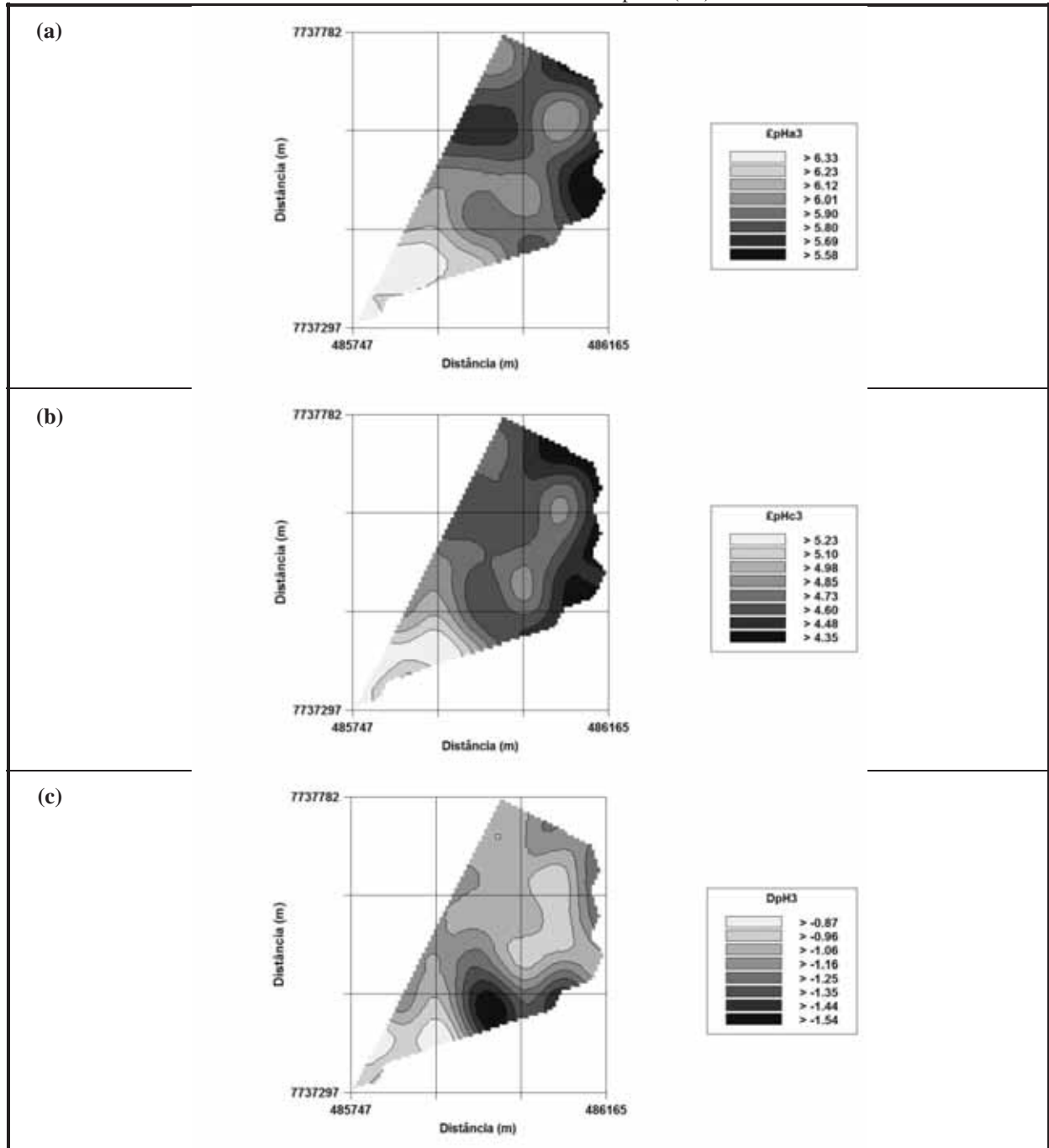


Figura 25 - Mapas de krigagem dos atributos do pH (0,20-0,40m: pHa2, pHk2, pHc2 e DpH2) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 26 - Mapas de krigagem dos atributos do pH (0,80-1,00m: ϵpHa3 , ϵpHc3 e DpH3) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

17,2 % (regiões norte-nordeste e leste do mapa) a 17,3-19,6 % (região centro-sul do mapa). Já FIB apresentou valores de 12,1-13,3 % (regiões sul-sudeste e norte) a 13,4-14,5 % (regiões leste, nordeste e central do mapa). Ainda ressalta-se a evidente semelhança entre ATR, BRI e POL, sendo todas de modo direto, ou seja, semelhanças positivas entre causa e efeito. Assim, observaram-se os maiores valores de ATR, BRI e POL nas mesmas regiões do mapa (região centro-sul) ao passo que seus menores valores ficaram distribuídas nas regiões norte-nordeste e leste do mapa. Tal fato deve-se principalmente à origem dos dados, uma vez que são parâmetros tecnológicos interdependentes entre si. Porém tal correlação espacial na análise geoestatística, viabiliza a estimação desses atributos (aqueles de maior dificuldade de obtenção laboratorial) em função do atributo de obtenção mais fácil, sendo de grande valia, do ponto de vista prático agrônomo.

Na maioria dos atributos do solo (Figuras 24, 25 e 26) foi observado que a distribuição das faixas de valores ficaram visualmente bem definidas (pHa1, pHk1, DpH1, pHa2, DpH2, £pHa3, £pHc3 e DpH3) o que possibilitou observar algumas fortes semelhanças entre os atributos da planta ATR, BRI e POL (Figuras 22b, 23a,b) com o pH do solo, dada de modo inverso entre causa e efeito. Assim, nos sítios onde se observou os maiores valores de pH, ou seja, onde foi observado solo menos ácido (regiões mais claras dos mapas de krigagens), notou-se os menores valores de ATR, BRI e POL. Deste modo, se atestada a correlação espacial entre esses atributos pela análise geoestatística, torna-se viável a estimação dos atributos de maior interesse agrônomo (atributo primário - da planta) e de maior dificuldade de obtenção, em função de um atributo secundário e independente (do solo) que seja de fácil e rápida obtenção.

4.3.2 Análise semivariográfica cruzada

4.3.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados, validações cruzadas e mapas de cokrigagem dos atributos

Dalchiavon (2010) ressalta que quando entre dois atributos quaisquer, for encontrado elevado e significativo coeficiente de correlação de Pearson, com ambos resultando em semivariogramas, a co-krigagem entre eles provavelmente existirá. Por outro lado, quando apresentarem baixo e não significativo coeficiente de correlação, se ambos apresentarem semivariograma, não é invalidado a hipótese da correlação espacial e, portanto da cokrigagem entre eles, conforme também concluído por Lima (2007). Assim, estão apresentados no Quadro

10 os parâmetros dos semivariogramas cruzados entre os atributos estudados da planta e do solo.

Quadro 10 - Parâmetros dos semivariogramas cruzados e das validações cruzadas ajustados entre atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar, e atributos do pH de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanópolis (SP).

Atributos ^(a)	Parâmetros do Ajuste									
	modelo ^(b)	C ₀	C ₀ +C	A ₀ (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)	validação cruzada		
							% classe	a	b	r
<i>γ(h) cruzado entre atributos (planta vs planta)</i>										
#TCH=f(ATR)	gau	-1,000.10 ⁻¹	-5,970.10 ⁻¹	248,2	0,795	1,250.10 ¹	99,8	-8,02	0,500	0,322
#TCH=f(BRI)	gau	-2,760	-1,390.10 ¹	277,0	0,976	2,610	80,1	-8,24	0,469	0,322
#TCH=f(POL)	gau	-2,700	-1,450.10 ¹	288,2	0,962	4,690	81,4	-8,19	0,477	0,302
#TCH=f(FIB)	esf	-1,010	-4,420	160,3	0,532	4,720	77,1	-8,07	0,480	0,305
ATR=f(BRI)	esf	7,440	2,993.10 ¹	248,0	0,895	4,070.10 ¹	75,1	4,18.10 ¹	0,697	0,527
POL=f(BRI)	esf	1,580	4,858	240,0	0,857	1,180	67,5	5,37	0,681	0,502
<i>γ(h) cruzado entre atributos (TCH vs solo)</i>										
#TCH=f(pHk2)	esf	1,000.10 ⁻³	9,540.10 ⁻¹	268,2	0,673	3,490.10 ⁻¹	99,9	-8,62	0,458	0,291
#TCH=f(pHc2)	gau	1,000.10 ⁻³	6,310.10 ⁻¹	247,7	0,827	1,250.10 ⁻¹	99,8	-7,36	0,511	0,327
#TCH=f(DpH3)	gau	6,000.10 ⁻³	1,177	148,2	0,799	2,280.10 ⁻¹	99,5	-6,99	0,573	0,369
<i>γ(h) cruzado entre atributos (ATR vs solo)</i>										
ATR=f(pHk2)	gau	-4,770.10 ⁻¹	-1,393	303,1	0,847	1,180.10 ⁻¹	65,8	5,44.10 ¹	0,605	0,460
ATR=f(pHc2)	esf	-3,610.10 ⁻¹	-8,690.10 ⁻¹	274,3	0,825	4,340.10 ⁻²	58,5	5,30.10 ¹	0,615	0,471
ATR=f(#pHc3)	esf	-9,600.10 ⁻²	-1,366	127,5	0,406	7,120.10 ⁻¹	93,0	4,89.10 ¹	0,646	0,493
ATR=f(pHa1)	esf	-8,000.10 ⁻²	-6,100.10 ⁻¹	177,1	0,842	2,590.10 ⁻²	86,9	5,11.10 ¹	0,629	0,480
ATR=f(pHa2)	gau	-2,000.10 ⁻¹	-6,910.10 ⁻¹	240,0	0,493	1,820.10 ⁻¹	71,1	5,04.10 ¹	0,636	0,496
ATR=f(#pHa3)	esf	-2,650.10 ⁻¹	-1,270	177,0	0,681	2,210.10 ⁻¹	79,1	4,78.10 ¹	0,655	0,506
ATR=f(DpH3)	gau	-1,000.10 ⁻⁴	-2,762.10 ⁻¹	102,5	0,854	7,642.10 ⁻³	85,4	5,35.10 ¹	0,612	0,469
<i>γ(h) cruzado entre atributos (POL vs solo)</i>										
POL=f(pHk1)	gau	-1,000.10 ⁻⁴	-1,292.10 ⁻¹	343,1	0,806	4,512.10 ⁻³	99,9	5,53	0,671	0,494
POL=f(pHk2)	gau	-6,790.10 ⁻²	-2,118.10 ⁻¹	237,1	0,737	5,788.10 ⁻³	67,9	7,64	0,545	0,404
POL=f(pHc2)	gau	-2,940.10 ⁻²	-1,118.10 ⁻¹	238,6	0,804	1,747.10 ⁻³	73,7	6,35	0,620	0,463
POL=f(#pHc3)	gau	-1,000.10 ⁻⁴	-2,182.10 ⁻¹	175,1	0,961	1,638.10 ⁻³	100,0	6,84	0,594	0,477
POL=f(pHa1)	gau	-4,450.10 ⁻²	-1,050.10 ⁻¹	254,8	0,931	1,760.10 ⁻⁴	57,6	6,48	0,613	0,452
POL=f(pHa2)	gau	-4,890.10 ⁻²	-1,338.10 ⁻¹	277,6	0,852	1,113.10 ⁻³	63,5	6,24	0,629	0,470
POL=f(#pHa3)	gau	-1,550.10 ⁻²	-1,810.10 ⁻¹	146,0	0,900	2,079.10 ⁻³	91,5	6,77	0,598	0,451
POL=f(DpH3)	gau	-1,000.10 ⁻⁴	-4,980.10 ⁻²	146,3	0,974	4,985.10 ⁻⁵	99,8	5,53	0,674	0,501
<i>γ(h) cruzado entre atributos (BRI vs solo)</i>										
BRI=f(pHk1)	gau	-2,600.10 ⁻²	-1,390.10 ⁻¹	323,8	0,895	1,082.10 ⁻³	81,3	3,75	0,811	0,610
BRI=f(pHk2)	esf	-5,810.10 ⁻²	-1,882.10 ⁻¹	236,7	0,613	6,497.10 ⁻³	69,1	4,93	0,751	0,569
BRI=f(pHa2)	gau	-4,320.10 ⁻²	-1,134.10 ⁻¹	245,6	0,883	4,270.10 ⁻⁴	61,9	3,03	0,847	0,646
BRI=f(#pHa3)	gau	-8,300.10 ⁻³	-1,446.10 ⁻¹	153,4	0,976	2,972.10 ⁻⁴	94,3	4,61	0,766	0,583
BRI=f(pHc2)	gau	-4,030.10 ⁻²	-1,096.10 ⁻¹	248,3	0,936	2,755.10 ⁻⁴	63,2	3,46	0,826	0,633
BRI=f(#pHc3)	gau	-1,000.10 ⁻⁴	-1,832.10 ⁻¹	148,7	0,868	3,310.10 ⁻³	99,9	2,74	0,863	0,663

^(a) TCH, ATR, BRI, POL e PUR são, respectivamente, a produtividade de colmos por hectare, açúcares totais recuperáveis, percentual de sólidos solúveis totais, percentual de sacarose e pureza; pHa, pHk, pHc e DpH são respectivamente atributos químicos da reação do solo nas respectivas camadas (1: 0-0,20m; 2: 0,20-0,40m; 3: 0,80-1,00m); atributos precedidos de “#” foram trabalhados com seus respectivos resíduos; ^(b) gau = gaussiano, esf = esférico; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial.

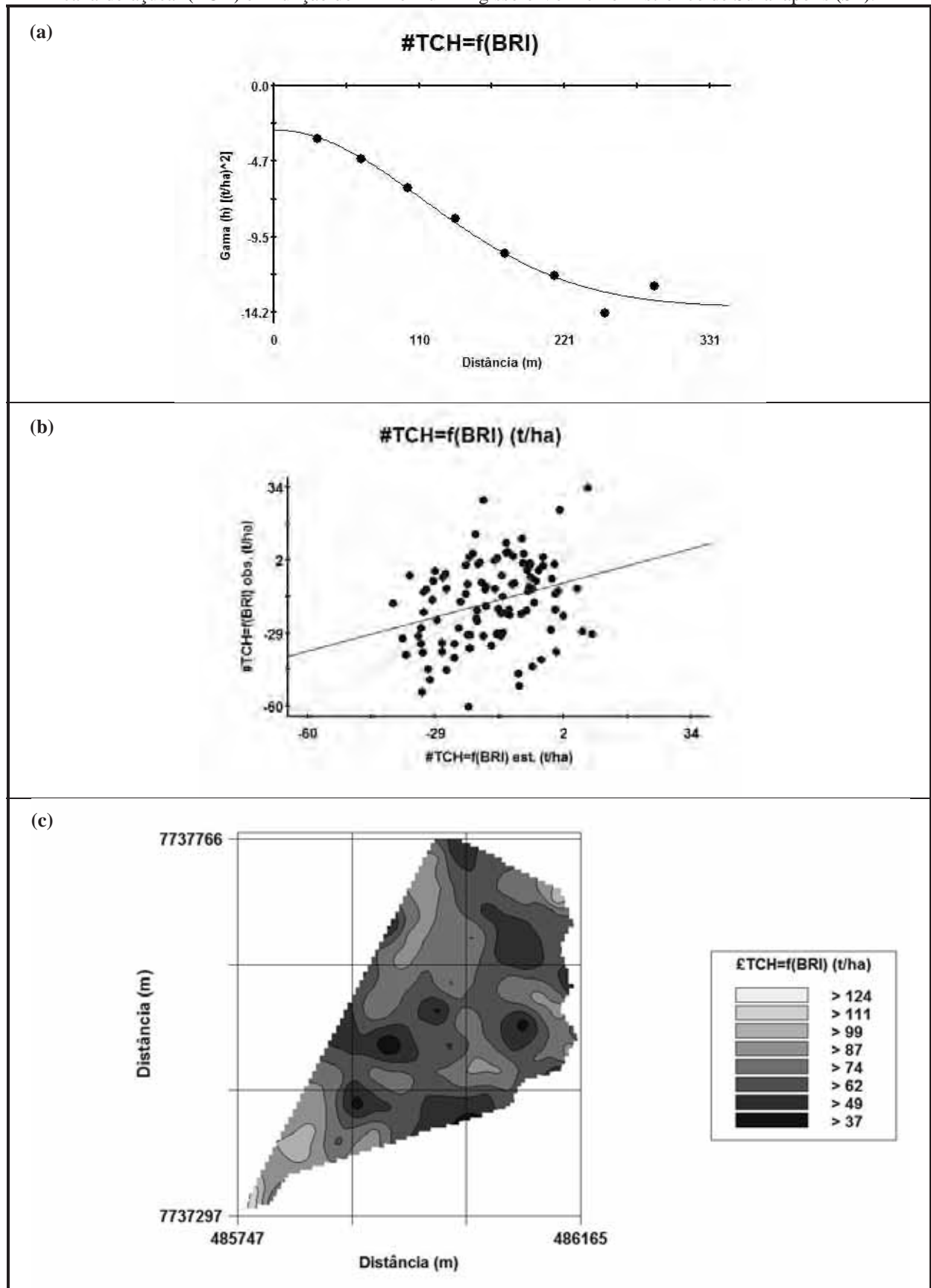
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na análise foram observados apreciáveis ajustes entre os atributos da planta, atestado pelos parâmetros dos semivariogramas cruzados (Quadro 10). Foram verificados ajustes do tipo gaussiano: [#TCH=f(ATR); #TCH=f(BRI); #TCH=f(POL)] e esférico [#TCH=f(FIB); ATR=f(BRI); POL=f(BRI)], com alcances entre 160,3m [#TCH=f(FIB)] a 288,2 m [#TCH=f(POL)]. Ainda o coeficiente de determinação espacial (r^2) variou de 0,532 a 0,976 com avaliadores da dependência espacial (ADE) entre alto e muito alto. Deste modo, ficou comprovado que todas cokrigagens entre TCH vs os demais atributos tecnológicos da planta [#TCH=f(ATR), #TCH=f(BRI), #TCH=f(POL) e #TCH=f(FIB)] apresentaram dependência espacial de modo indireto entre causa e efeito, indicando que nas áreas dos menores valores de ATR, BRI, POL e FIB, serão às áreas onde o TCH apresentará seus maiores valores e vice-versa. Tornando-se possível estimar a variabilidade espacial da produtividade da cana (TCH) por meio dos atributos ATR, BRI, POL e até mesmo da FIB. Porém, sendo o BRI o atributo que possibilitou o melhor ajuste com TCH (esférico) apresentando um alcance de 277m e um avaliador da dependência muito alto (ADE=80,1), configurando-o como o melhor estimador espacial da TCH, com uma precisão de 97,6% de acerto por meio da co-krigagem #TCH=f(BRI). Por outro lado, o ATR=f(BRI) e o POL=f(BRI) também apresentaram dependência espacial. Assim na avaliação dos atributos tecnológicos, tanto ATR como POL podem ser espacialmente estimados por meio do BRI que é um atributo de mais fácil de obtenção em campo.

Nas Figuras 27-32 estão contidos os ajustes semivariográficos cruzados (a), validações cruzadas (b), e mapas de cokrigagens (c), entre TCH e os demais atributos da planta. Deste modo, tendo sido a co-krigagem #TCH=f(BRI) (Figura 27) aquela que apresentou o melhor desempenho na estimação da produtividade (97,6% de precisão estimativa), no âmbito espacial quando o Brix apresentar valores da ordem de 17,4-19,9% a TCH será de 87-124 t ha⁻¹, ao passo que quando o Brix apresentar valores entre 20,7-23,1% a TCH estará em torno de 37-74 t ha⁻¹. Por outro lado, tendo sido excelente as co-krigagens observadas entre ATR=f(BRI) e POL=f(BRI), no âmbito espacial quando Brix apresentar valores entre 17,4-19,9% o ATR será de 124-138 kg t⁻¹ enquanto que o POL será de 14,3-16,6%, ao passo que quando o Brix estiver entre 20,7-23,1% o ATR apresentará valores entre 142-156 kg t⁻¹ e o POL valores entre 17,3-19,6% (Figuras 31 e 32).

Já nas co-krigagens testadas entre atributos da planta vs do solo (Quadro 10), a maioria dos atributos avaliados apresentou correlação e dependência espacial entre si. A exceção ficou para FIB o qual não apresentou nenhuma correlação com os demais atributos (planta e solo). Convém ressaltar o apreciável desempenho geral dos atributos do pH do solo quando cruzados

Figura 27 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do Brix em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 28 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do ATR em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).

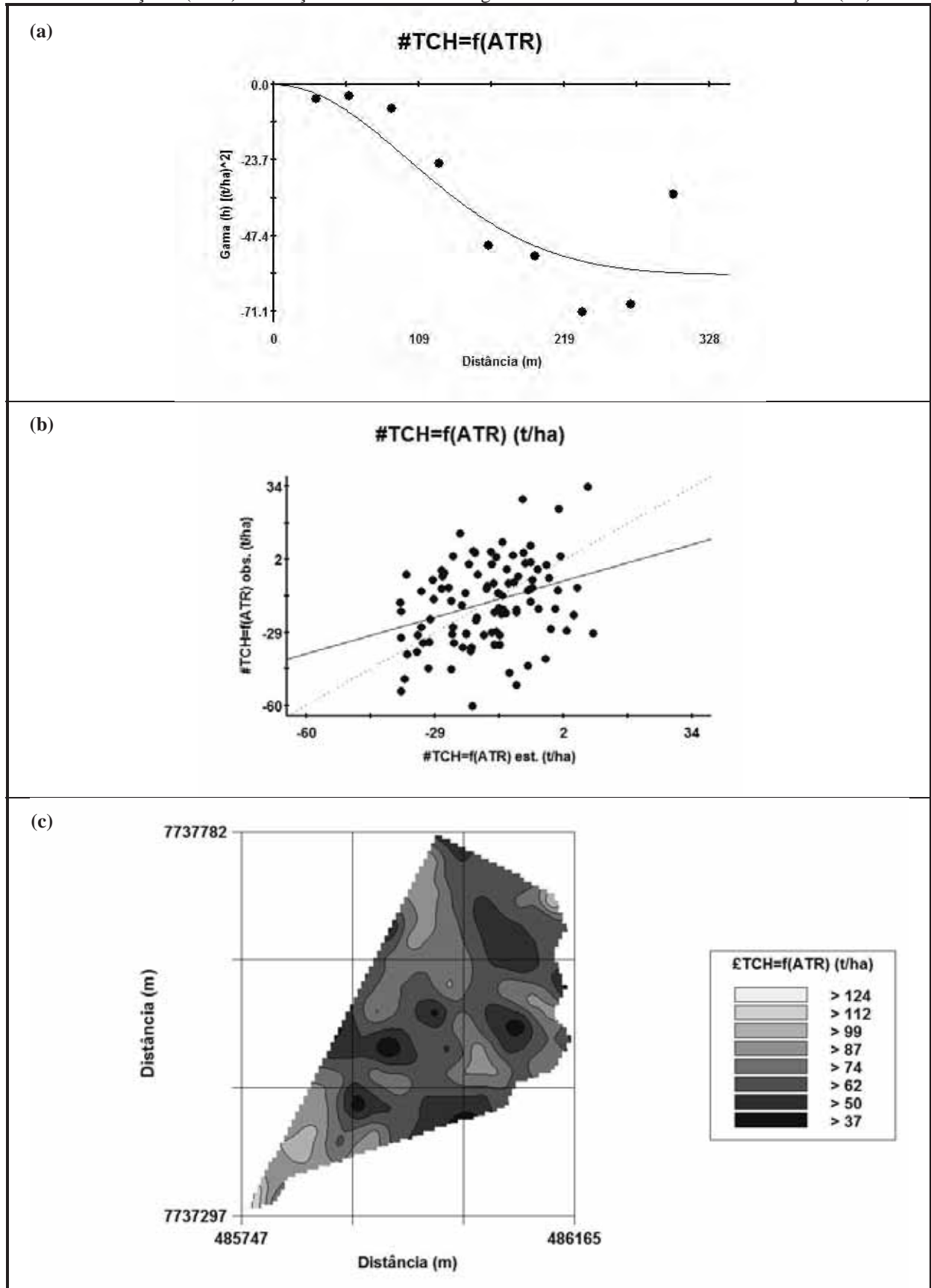
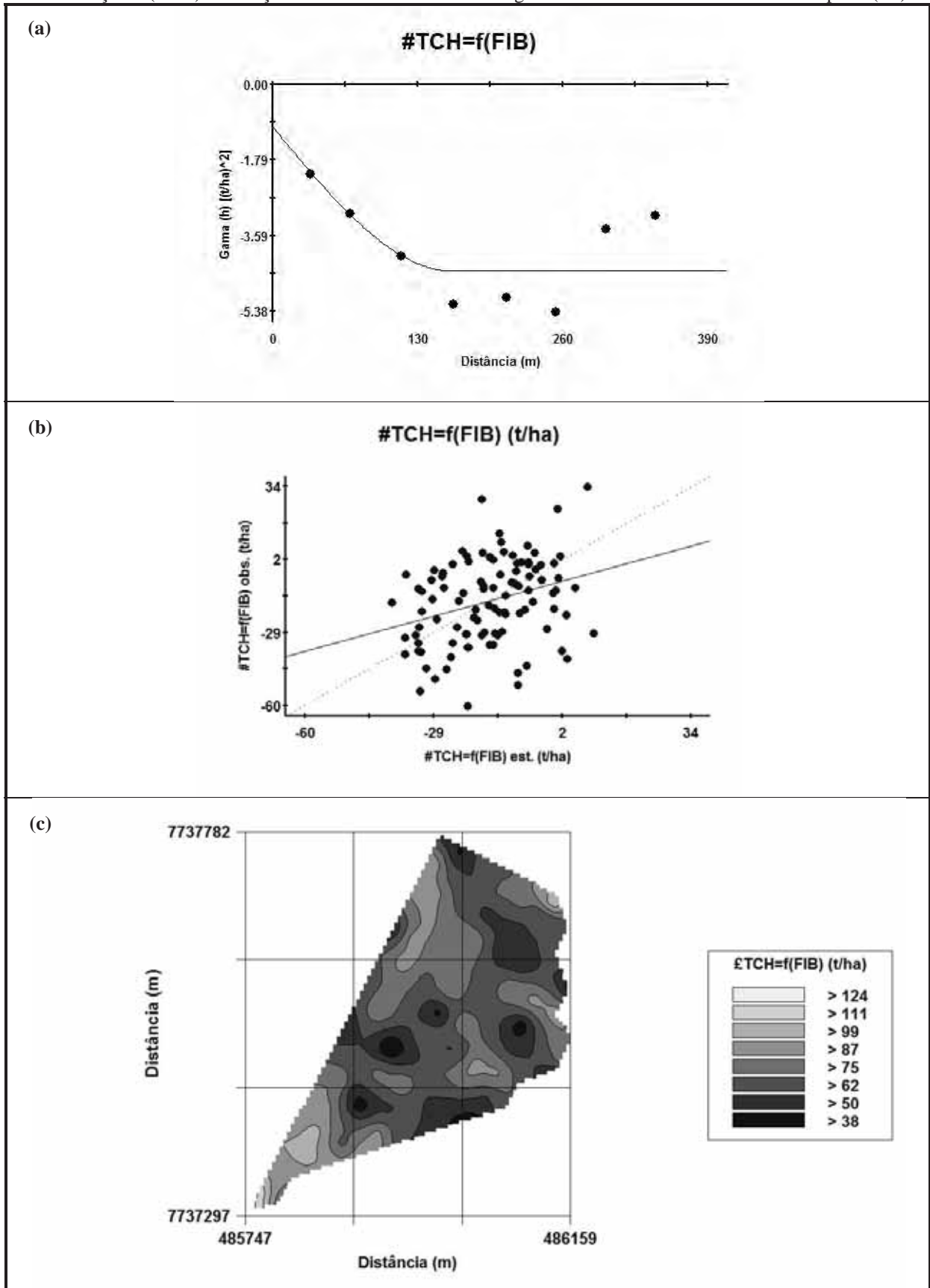


Figura 29 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do teor de Fibras em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 30 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do Pol em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).

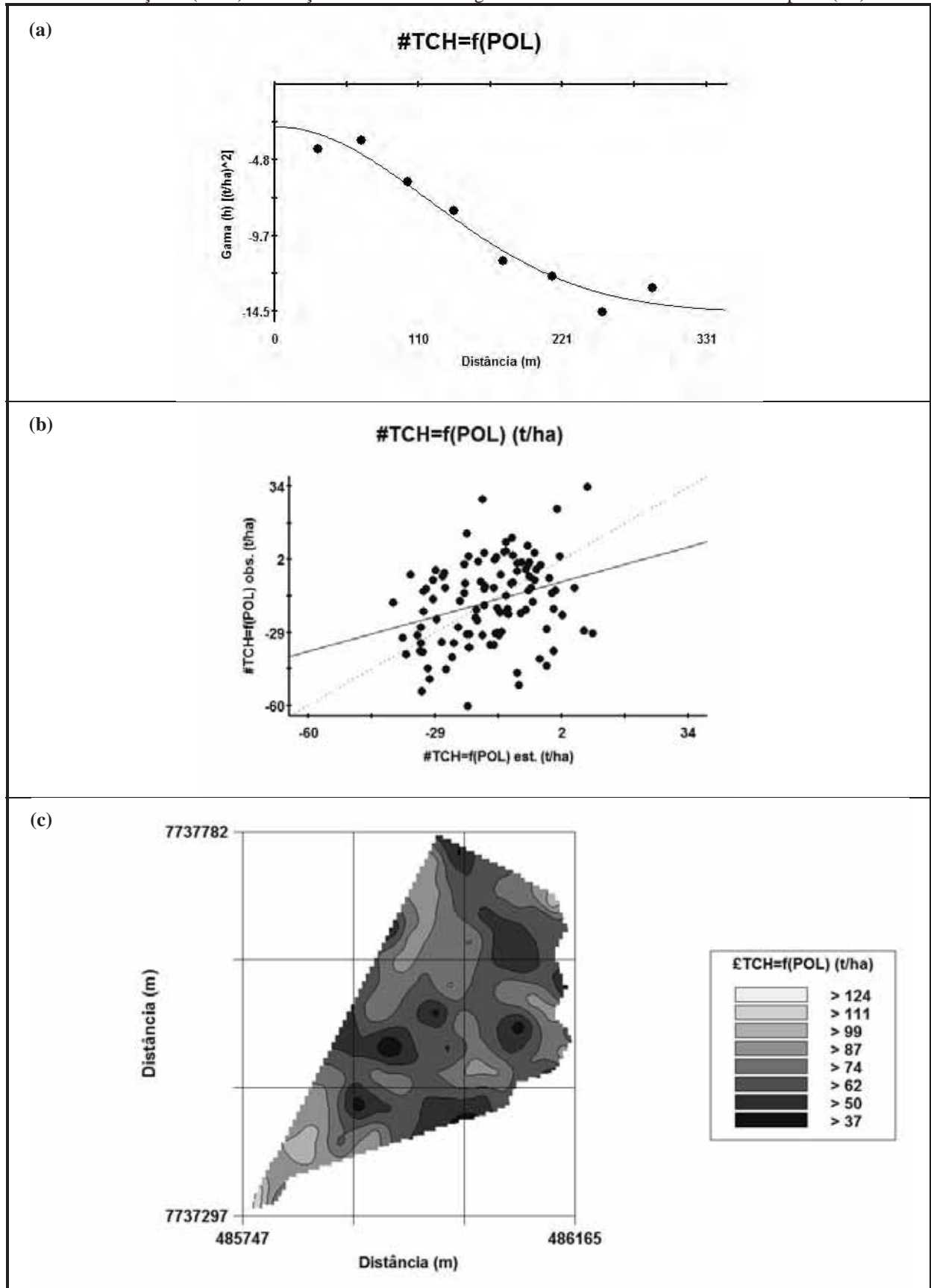
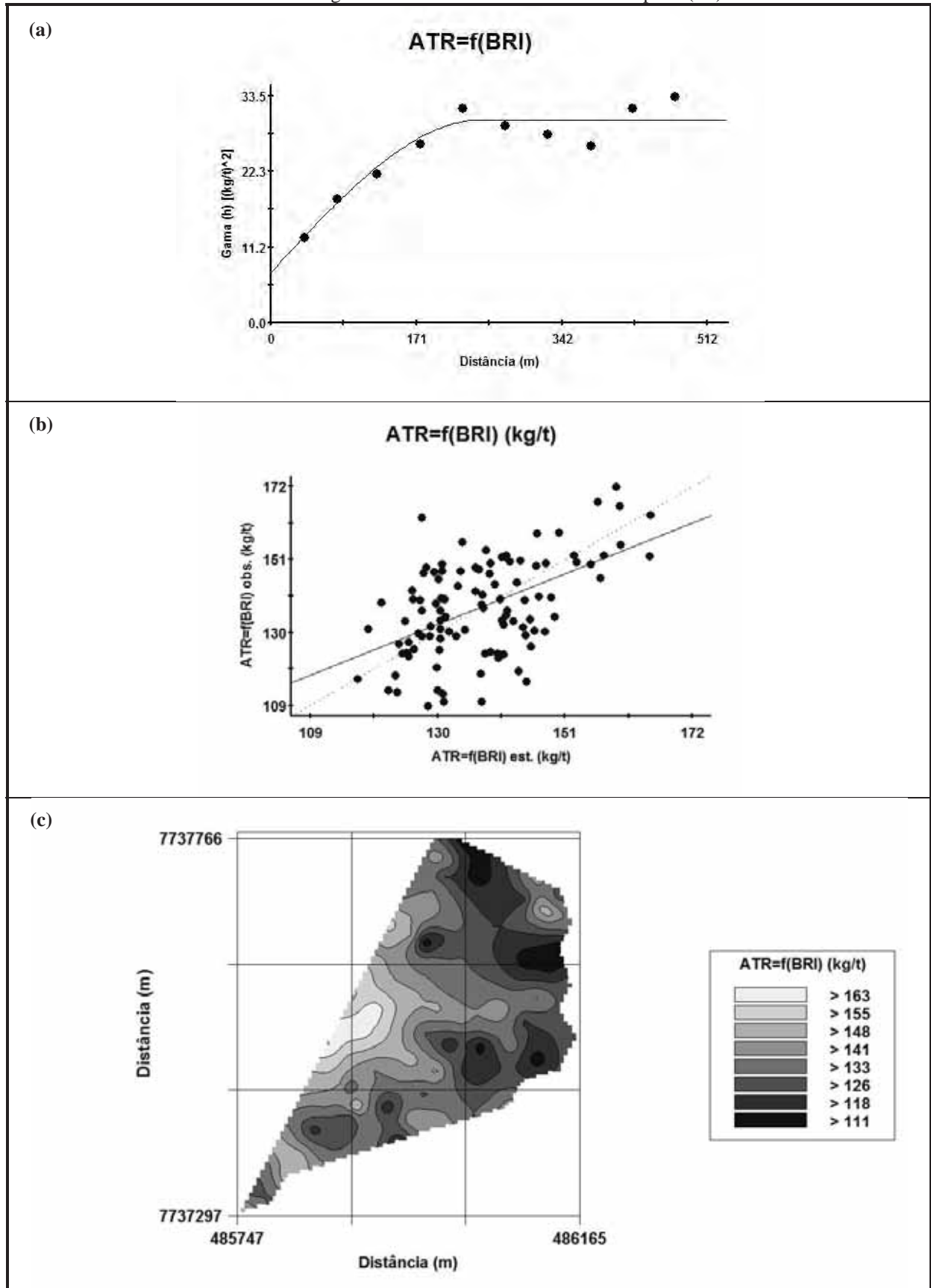
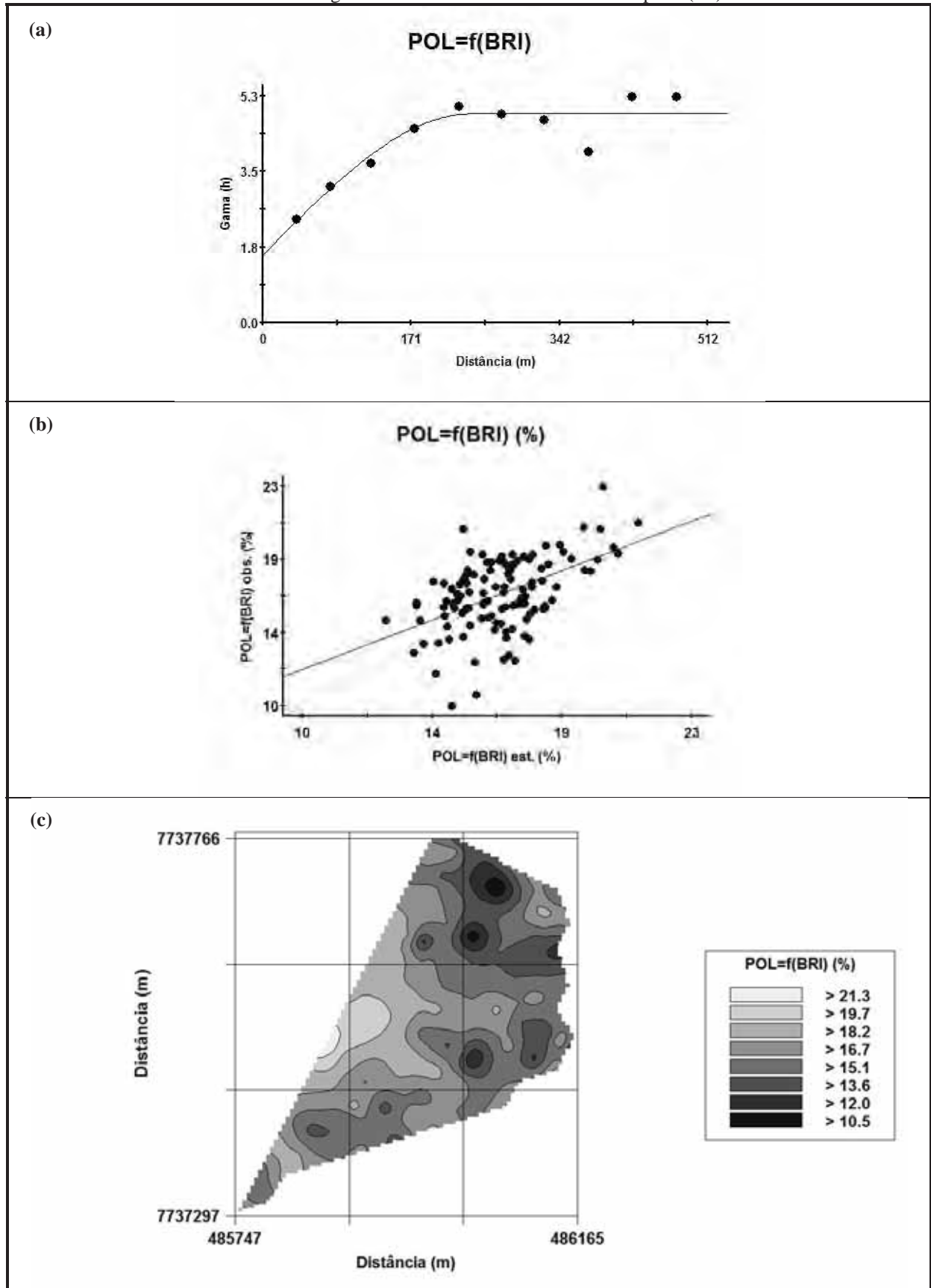


Figura 31 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) do ATR em função do Brix em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 32 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) do Pol em função do Brix em um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).

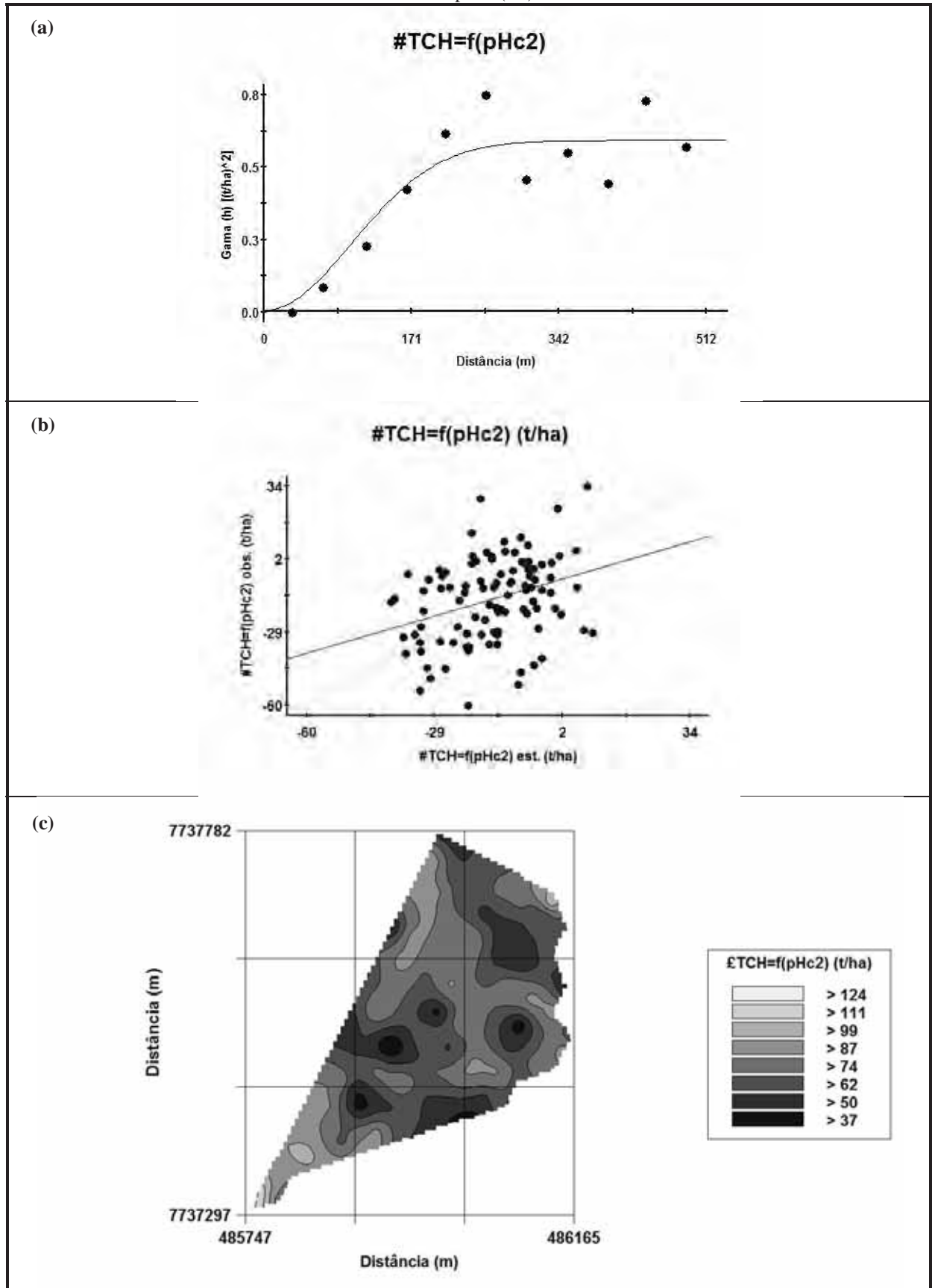


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

com os atributos da planta, uma vez que em todas as profundidades, houve correlação na maioria dos testes realizados, mostrando que o pH é um importante indicador da qualidade química do solo, tanto quando avaliado no âmbito linear quanto espacial, independentemente da metodologia utilizada em sua determinação. Também, o Delta pH, atributo pouco trabalhado como referência na correlação com atributos da planta, apresentou bom desempenho de seus semivariogramas cruzados com os atributos da cana-de-açúcar. Assim, do ponto de vista prático agrônomo, tendo o maior interesse residido nas correlações estabelecidas entre atributos do solo com a produtividade de colmos (TCH) e com os atributos tecnológicos considerados os mais importantes da cana-de-açúcar (ATR e POL), classifica-se a seguinte ordem de grandeza apontada pelo coeficiente de determinação (r^2) no (Quadro 10): com TCH [#TCH=f(pHc2) (0,827); #TCH=f(DpH3) (0,799); #TCH=f(pHk2) (0,673)]; com ATR [ATR=f(DpH3)]; e com POL [POL=f(DpH3)].

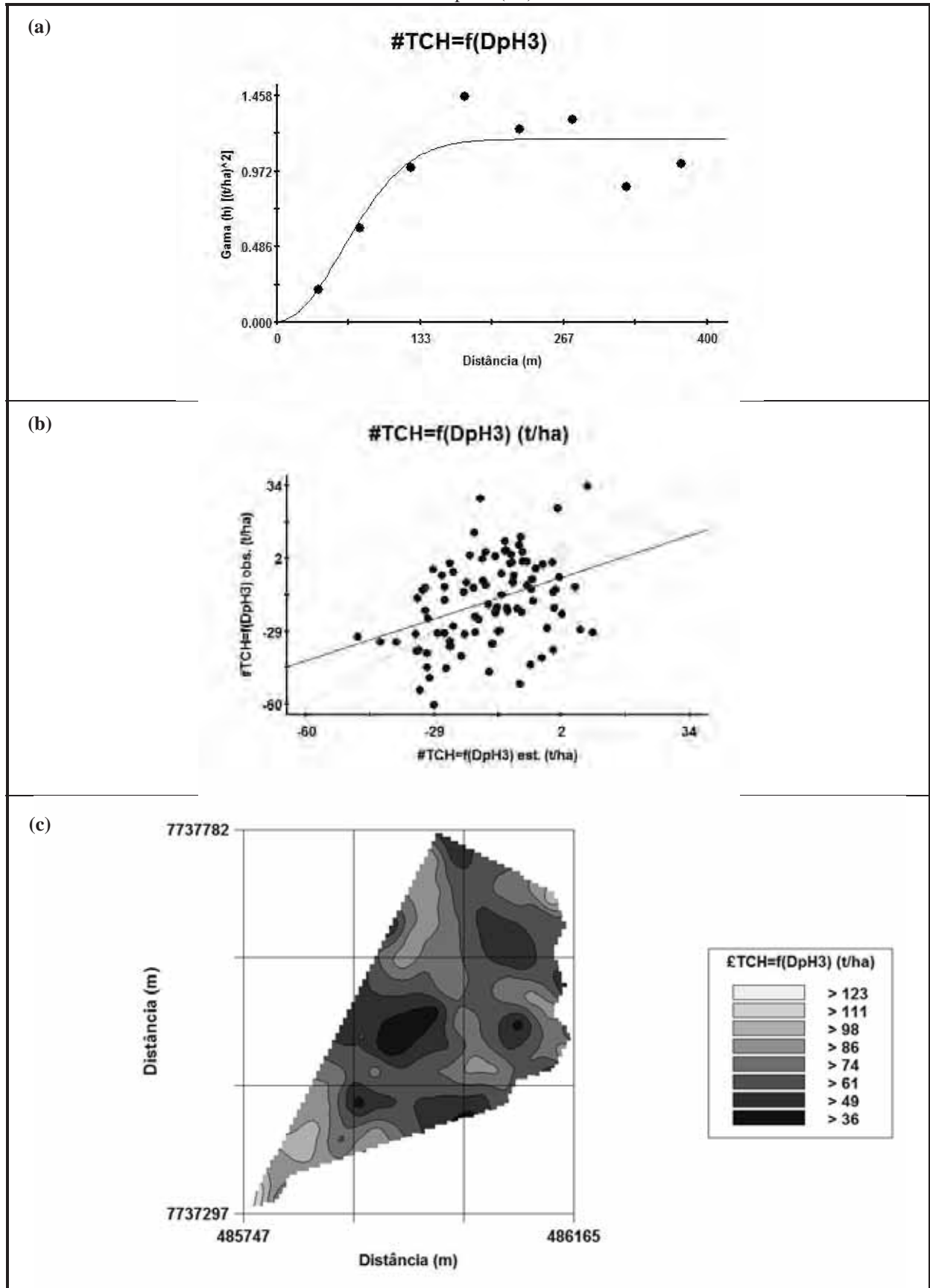
Nas Figuras 33-35, estão contidos os ajustes semivariográficos cruzados (a), as validações cruzadas (b) e os mapas de co-krigagens (c) válidos entre TCH vs atributos do pH do solo. Ao passo que nas Figuras 36-37, estão os ajustes entre os atributos tecnológicos da cana (ATR e POL) com o Delta pH do solo. Assim, das co-krigagens atestadas pelo coeficiente de determinação espacial (r^2), seguiram a seqüência de melhor desempenho: 1) #TCH=f(pHc2) que apresentou ajuste semivariográfico do tipo esférico, de modo direto entre causa e efeito (Quadro 10, Figura 33), cujo o alcance da dependência espacial foi de 247,7m e dependência muito alta (ADE=99,8%). Miguel (2010) trabalhando em um Nitossolo Vermelho também constatou co-krigagem de modo direto entre causa e efeito entre a produtividade da cana e o pH do solo, sendo ajustado o modelo gaussiano com alcance de 178,4m e um grau de dependência espacial muito alto. Deste modo, foi constatado que a variabilidade espacial da TCH pode ser determinada espacialmente por meio do pH em CaCl_2 , na camada de 0,20-0,40m, com uma precisão estimativa de 82,7%. Portanto, do ponto de vista espacial, para área estudada, nos locais amostrados onde o pHc2 apresentar valores da ordem de 4,5-4,7, a TCH esperada da cana-de-açúcar, RB 855453, será de 37-74 t ha⁻¹. Por outro lado, naqueles sítios onde o pHc2 estiver entre 4,8-5,0 a TCH estará entre 87-124 t ha⁻¹; 2) #TCH=f(DpH3) com ajuste semivariográfico do tipo gaussiano, sendo direto entre causa e efeito (Quadro 10, Figura 34). O alcance atingiu 148,2m e a dependência espacial foi muito alta (ADE=99,5%). Deste modo a variabilidade espacial da TCH pode ser estimada por meio do Delta pH do solo na camada de 0,80-1,00m com precisão da estimativa de 89,9%. Assim, no âmbito espacial, para a área estudada, nos locais onde o DpH3 apresentar valores da ordem de -1,16 a -0,87 (valores menos negativos), a TCH esperada será de 87-124 t ha⁻¹, bem como,

Figura 33 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do pH em CaCl_2 (0,20-0,40m) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



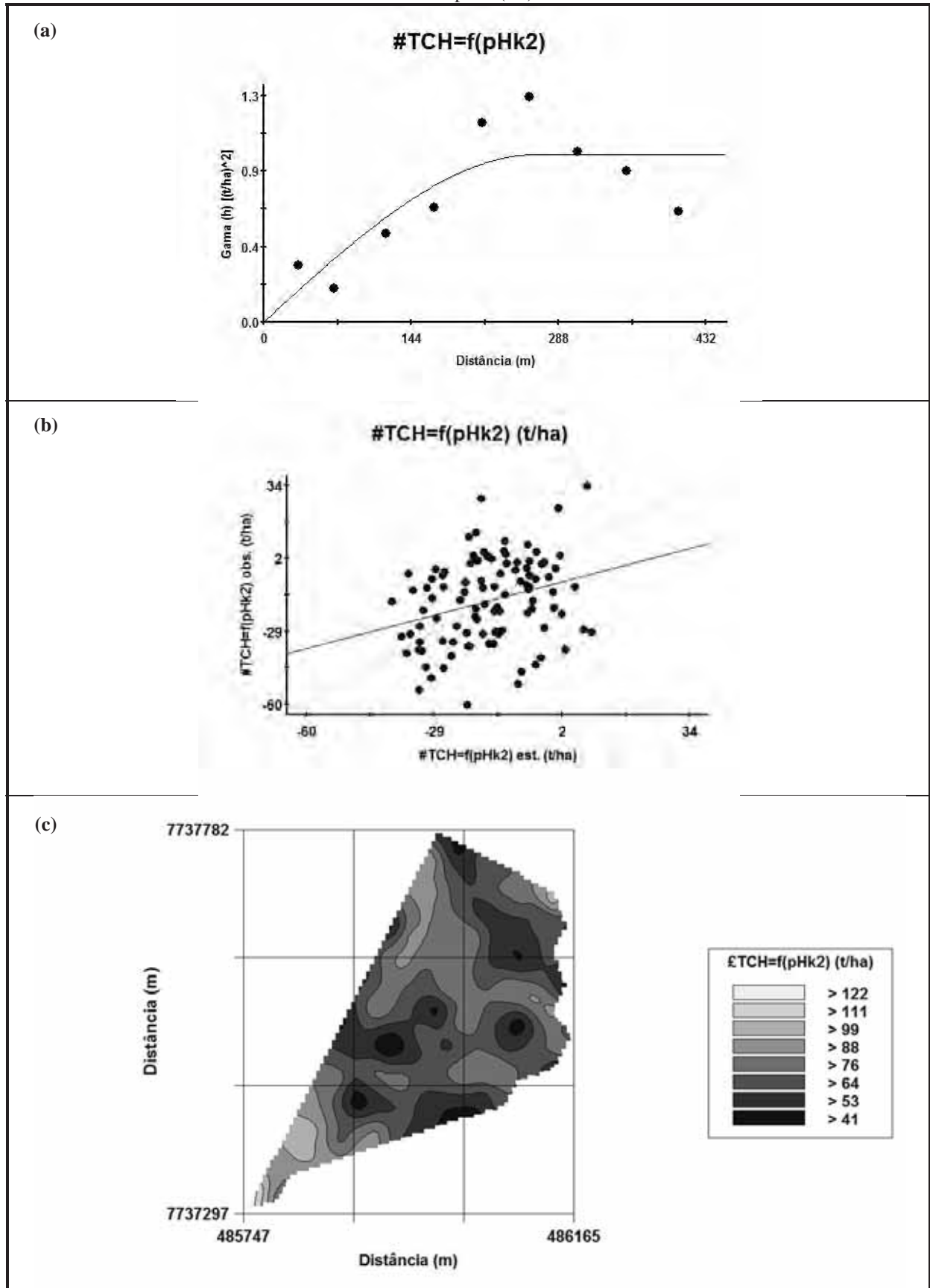
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 34 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do Delta pH (0,80-1,00m) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



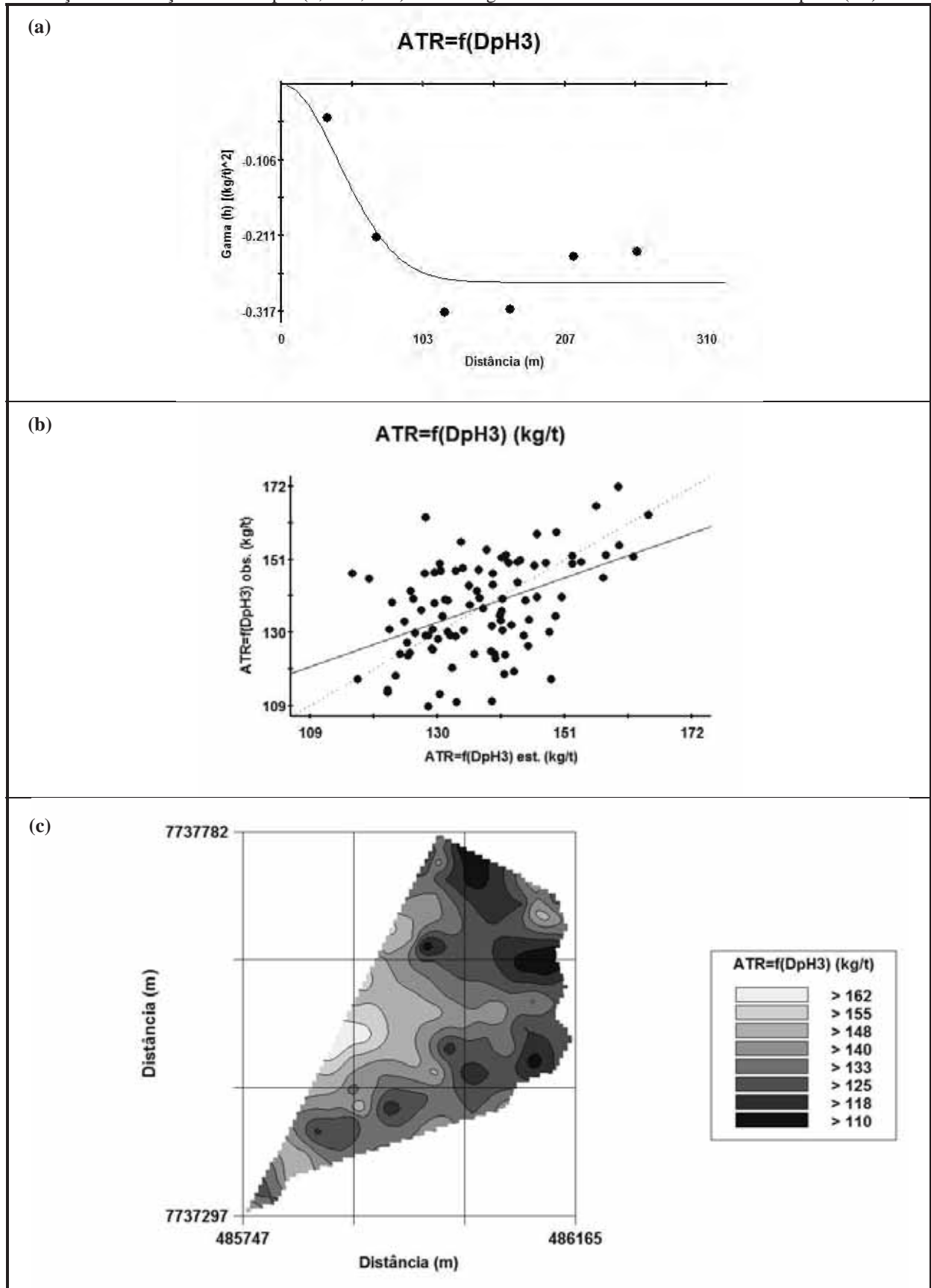
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 35 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) da produtividade da cana-de-açúcar (TCH) em função do pH em KCl (0,20-0,40m) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



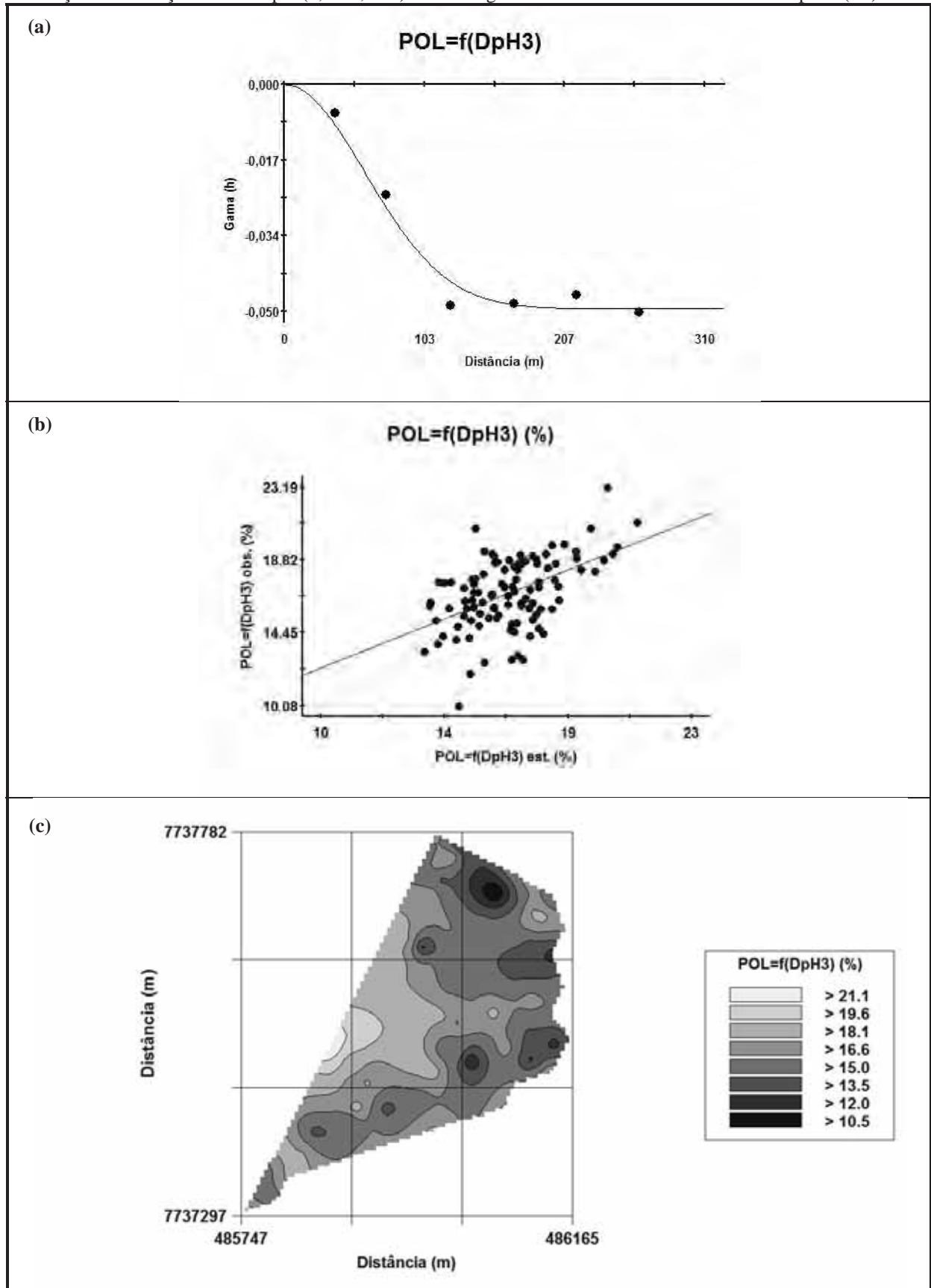
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 36 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) do ATR da cana-de-açúcar em função do Delta pH (0,80-1,00m) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 37 - Semivariograma cruzado (a), validação cruzada (b) e mapa de cokrigagem (c) do POL da cana-de-açúcar em função do Delta pH (0,80-1,00m) de um Argissolo Vermelho Distrófico de Suzanápolis (SP).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

naqueles locais onde o DpH_3 variar de -1,25 a -1,54 (valores mais negativos) a TCH apresentará valores da ordem de 37–74 t ha⁻¹; e 3) #TCH=f(pHk2), com ajuste esférico, positivo, com alcance da dependência de 268,2m e ADE=99,9% (Quadro 10, Figura 35).

Em caráter espacial, ao se avaliar os parâmetros semivariográficos cruzados (Quadro 10) o que se pode inferir sobre os resultados encontrados, no que condiz ao pH do solo na segunda camada estudada, muito provavelmente, a planta teste (cana-de-açúcar variedade RB855453) apesar de tolerante à solos mais acidificados encontrou um melhor ambiente químico quanto à valores de pH mais elevados na camada de 0,20-0,40m.

Já o DpH_3 não denotou resposta favorável, do ponto de vista do manejo agrícola, uma vez que apontou que o aumento das cargas negativas do solo (> CTC) não proporcionou incremento direto da produtividade de colmos (TCH). Por outro lado ao avaliarmos o DpH_3 com os atributos tecnológicos da planta, principalmente o ATR e POL (Quadro 10; Figuras 36 e 37), os resultados denotaram que o incremento de cargas negativas (> CTC) na camada mais profunda do solo estudada (0,80-1,00m) proporcionou melhor qualidade do produto industrializável, ou seja, nos sítios onde o Delta pH apresentou valores mais negativos, os valores de ATR e POL foram substancialmente maiores e vice versa. Assim, sendo de grande importância agrônômica para estes dois atributos, uma vez que, o ATR é determinante do preço pago pela indústria e o POL importante na decisão do ponto ideal para o início da colheita da cultura. Deste modo, em relação ao Delta pH da terceira camada, à medida que se tem um solo melhor do ponto de vista agrônômico (>CTC), tem-se uma melhor resposta dos atributos tecnológicos da planta. De modo contrário, áreas com menor Delta pH sugeriram uma maior produtividade da cultura. Porém, este fato não pode ser exclusivamente apontado como fator desta resposta, uma vez que outros parâmetros químicos do solo não foram avaliados.

No geral, a análise espacial permitiu observar para a área estudada, que os atributos do pH do solo, apresentaram-se como atributos preponderantes para a tomada de decisão do manejo do solo, demonstrando exercer forte influência no comportamento dos atributos da planta. Assim, considerando a produtividade da cana-de-açúcar (TCH) tendo variado de 37-74 t ha⁻¹ a 74–87 t ha⁻¹, do mesmo modo que os atributos tecnológicos, principalmente o ATR, este tendo variado de 110-133 kg t⁻¹ a 140-162 kg t⁻¹, e ambos se correlacionando espacialmente com os atributos do solo, tendo variado segundo padrões apresentados pela heterogeneidade espacial destes mesmos atributos do solo, tem-se uma real necessidade em trabalhar com áreas específicas de manejo a fim de reduzir tal heterogeneidade dos sítios de interação com os menores valores de TCH e/ou ATR, otimizando assim a produção agrícola, seja pelo incremento da produtividade ou pelo ganho qualitativo no produto industrializável final.

5 CONCLUSÕES

- 1) Apesar da correlação linear entre a produtividade da cana-de-açúcar (TCH) com o pH do solo ter sido baixa, foi altamente significativa, principalmente na camada de 0,80-1,00m;
- 2) Do ponto de vista espacial houve resposta entre a produtividade de colmos (TCH) com o pH do solo na camada de 0,20-0,40m, permitindo inferir que o manejo químico de áreas específicas de maior acidez proporcionará incremento da produtividade de colmos da cana soca; O Delta pH do solo na camada de 0,80-1,00m apresentou interação com os atributos tecnológicos, de modo que melhor qualidade química naquela camada proporcionou melhoria na qualidade do produto industrializável, com POL e ATR mais elevados, porém, com uma menor produtividade de colmos;
- 3) O estudo do solo na camada de 0,80-1,00m permitiu concluir ser válido seu conhecimento, uma vez que demonstrou interação tanto com a produtividade de colmos (linear e espacialmente) quanto com os atributos tecnológicos da cana (espacialmente) permitindo a recomendação de manejo de áreas específicas para o local estudado, e
- 4) Por fim, tanto o pH em KCl na camada de 0,80-1,00m, quanto o pH determinado em CaCl_2 na camada de 0,20-0,40m e o Delta pH da camada de 0,80-1,00m destacaram-se como os melhores indicadores da qualidade do solo avaliado, sendo o primeiro pelo desempenho linear com TCH, e o segundo e terceiro pelo apreciável desempenho espacial, respectivamente para TCH e para ATR.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A.; ARGENTON, J.; BAYER, C.; WILDNER, L. P.; KUNTZE, M. A. G. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 415-424, 2005.

ALVES, M. C.; CARVALHO, M. P.; LIMA, R. C.; VANZELA, S. L. Ambiente de produção para a cana-de-açúcar cultivada nas propriedades agrícolas da Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar. In: ALVES, M. C. et al. **Estudo agrotécnico da Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar – Suzanápolis (SP)**. Ilha Solteira: [s.n.], 2009. v. 3, 107 p.

ARMESTO, M. V. **Variabilidade espacial e temporal da erosión en solos de cultivo**. 1999. 118 f. Tese (Doutorado) – Facultad de Ciências, Universidade de La Coruña, Coruña, 1999.

BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 645-653, 2008.

BEZERRA, C. R. F. **Variabilidade espacial da produtividade de forragem de milho safrinha em função de atributos químicos do solo**. 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

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. A. **Cana-de-Açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação – IAC, 2008. p. 821-838.

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) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

CAMARA, G. M. S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G. M. S. **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 1993. p. 31-64.

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.

CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; AMARAL, N. M. B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto alegre: Gênese, 1999. p. 69-90.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, 2002.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA - CEPAGRI. **Centro de pesquisas meteorológicas e climáticas aplicadas à agricultura: clima dos municípios paulistas – Pereira Barreto**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_424.html>. Acesso em: 01 dez. 2011.

CERRI, D. G. P. **Agricultura de precisão em cana-de-açúcar: instrumentação de uma colhedora, mapeamento da produtividade e de atributos do solo**. 2005. 173 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

CESAR, M. A. A.; DELGADO, A. A.; CAMARGO, A. P.; BISSOLI, B. M. A.; SILVA, F. C. Capacidade de fosfatos naturais e artificiais em elevar o teor de fósforo no caldo de cana-de-açúcar (cana-planta), visando o processo industrial. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 6, p. 32-38, 1987.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar. safra 2011/2012 - segundo levantamento**. Brasília: Conab, 2011. 21 p.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA DE AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CONSECAN. **Manual de instruções**. Piracicaba: Consecana, 2006. 116 p.

CORÁ, J. E. **The potential for site-specific management of soil and yield variability induced by tillage**. 1997. 104 f. Thesis (Doctor Degree) - Michigan State University, East Lansing, 1997.

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, M. J. **Manejo do solo e efeito residual da gessagem sobre atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho distroférrico e no desenvolvimento da soja.** 2006. 50 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Dourados, 2006.

DALCHIAVON, F. C. **Aspectos da produtividade do arroz de terras altas irrigado com atributos químicos do solo sob plantio direto.** 2010. 113 f. 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.

DEUBER, R. Maturação da cana-de-açúcar na região sudeste do Brasil. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA DA COPERSUCAR, 1988. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1988.

DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R. Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: SEGATTO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: ESALQ/USP, 2006. p. 107-119.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

FAHL, J. I.; CAMARGO, M. B. P.; PIZZINATTO, M. A.; BETTI, J. A.; MELO, A. M. T.; DE MARIA, I. C.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas:** boletim 200. 6. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1998. 396 p.

FEARNSIDE, P. M.; LEAL FILHO, N. **Solo e desenvolvimento na amazônia:** lições do projeto dinâmica biológica de fragmentos florestais. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 2002. 48p.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na Agroindústria da cana de açúcar.** Piracicaba: Açúcar, Alcool e Subprodutos - STAB, 2000. 193 p.

FIGUEIREDO P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do instituto agrônomo no seu estabelecimento In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar.** Campinas: Instituto Agrônomo & Fundação - IAC, 2008. p. 31 - 44.

FRANCO, A. **Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto e vinhaça: nitrogênio no sistema solo-planta, produtividade e características tecnológicas.** 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2003.

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

- FROGBROOK, Z. L.; OLIVER, M. A.; SALAH, M.; ELLIS, R. H. Exploring the spatial relations between cereal yield and soil chemical properties and the implications for sampling. **Soil Use and Management**, Oxon, v. 18, n. 1, p. 1-9, 2002.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A. Spatial variability of some biometric attributes of sugarcane plants (variety IAC SP93-3046) and its relation to physical and chemical soil attributes. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 107-119, 2010. Suplemento.
- GROSSI, S. F.; NÓBREGA, J. C. M. Cana forrageira: aspectos da produção e alimentação animal. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Orgs.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livrocere, 2006. p. 387-393.
- GUEDES FILHO, O. **Variabilidade espacial e temporal de mapas de colheita e atributos do solo em um sistema de semeadura direta**. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2009.
- GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia: Ufu - Núcleo de Estudos Estatísticos e Biomédicos, 2004. 77p.
- HOFFMANN, H. P.; SANTOS, E. G. D.; BASSINELLO, A. I.; VIEIRA, M. A. S. **Variedades RB de cana-de-açúcar**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2008. 30p.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 561 p.
- KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P.; LIMA, C. G. R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 361-369, 2007.
- KÖEPPEN, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la Tierra. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p.
- KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 1, n. 92, p. 75-83, 2000.
- LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R.; MONTEIRO, R. C. **Exemplos de aplicação da cokrigagem**. Rio Claro: DGA – IGCE/UNESP, Lab. Geomatemática, 2002. 17 p. (Texto Didático, 9). Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 05 jan. 2011.
- LIMA, C. G. R. **Correlação linear e espacial da produtividade de forragem de milho com atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico**. 2007, 107 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.
- LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; NARIMATSU, K. C. P.; SILVA, M. G.; QUEIROZ, H. A. Atributos físico-químicos de um latossolo do cerrado brasileiro e sua relação com características dendrométricas do eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 1, p. 163-173, 2010.

MARIN, F. R. **Variiedades**: agência de informação Embrapa – cana-de-açúcar. Campinas: Embrapa/CNPTIA, 2011. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/contag01_42_1110200717570.html>. Acesso em: 1 out. 2011.

MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 8, n. 1, 143-152, 2008.

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

MELLO, F. A. F.; BRASIL SOBRINHO, M. O. C.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R. I.; COBRA NETTO, A.; KIEHL, J. C. **Fertilidade do solo**. São Paulo: Nobel, 1983. 400 p.

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

MIGUEL, F. R. M. **Variabilidade espacial de atributos do solo e produtividade em área cultivada com cana-de-açúcar**. 2010. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2010.

MIGUEL, F. R. M.; VIEIRA, S. R.; CHIBA, M. K.; GREGO, R.; SIQUEIRA, G. M. Correlação espacial entre a produtividade da cana-de-açúcar e atributos químicos do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO - ConBAP, 2010, Ribeirão Preto. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2010.

MIGUEL, F. R. M.; VIEIRA, S. R.; CHIBA, M. K. Relacionamento espacial entre a produtividade da cana-de-açúcar e a topografia do solo. In: SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2009, Botucatu. **Anais...** Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2009.

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) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MONTANARI, R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PAZETOU, R. J.; CAMARGO, L. A. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo e Argissolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 5, p. 1266-1272, 2008.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E. NÓBREGA, J. C. M. (Orgs.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. 415 p.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. **Revista de Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 6, n. 1, p. 97-111, 2004.

OLIVEIRA, M. W.; OLIVEIRA, M. W.; BARBOSA, M. H. P.; MURILO, C.; ANDRADE, M. B. M.; MENDES, L. C. Análise quantitativa do crescimento da variedade de cana-de-açúcar RB 72454. In: ENCONTRO DE BOTÂNICOS DE MG, BA, e ES, 23., 2001, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: UFV/SBB, 2001. v. 1, p. 89-89.

OLIVEIRA, R. H. **Variabilidade espacial de atributos do solo em uma área comercial de produção de cana-de-açúcar no estado de São Paulo.** 2002. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

PIMENTEL-GOMEZ, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos.** Piracicaba: Fealq, 2002. 309 p.

PONTES, J. M. **A geoestatística: aplicações em experimento de campo.** 2002. 82 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

PRADO, H.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Relação entre balanço de cargas elétricas, matéria orgânica e soma de bases em perfis de Latossolos Ácricos do Brasil.** [S.l.: s.n., 2011]. Disponível em: <http://www.pedologiafacil.com.br/artig_8.php>. Acesso em: 15 out. 2011.

QUAGGIO, J. A. **Critérios para calagem em solos no estado de São Paulo.** 1983. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1983.

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 Cargil, 1987. 170 p.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação.** Piracicaba: Ceres/Potafos, 1991. 343 p.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. 285 p.

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análises de solo para fins de fertilidade.** Campinas: IAC, 1983. 31 p. (Boletim Técnico, 81).

RAPASSI, R. M. A. **Avaliação técnica e econômica de sistemas de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) convencional e orgânica na região oeste do Estado de São Paulo.** 2008. 146 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo.** 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

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

RODRIGUES, J. B. T. **Variabilidade espacial e correlações entre atributos do solo e produtividade na agricultura de precisão**. 2002. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 115-122, 1998.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 489-495, 2005.

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

SEGATO, S. V.; ALONSO, O.; LAROSA, G. Terminologias no setor sucroalcooleiro. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livrocere, 2006b. p. 399-400.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livrocere, 2006a. 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.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2000. 209 p.

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

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1763-1771, 2004.

SOUZA, D. M. G. S.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. V. A acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo: a acidez do solo e sua correção**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007a. p. 205-274.

SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CAMPOS, M. C. C. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo na aplicação de insumos para cultura de cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 2, p. 371-377, 2007b.

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, 2010.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. G.; CAMPOS, M. C. C. Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 8, n. 2, p. 183-190, 2008.

STAUT, L. A. **Condições dos solos para o cultivo de cana-de-açúcar**. Campinas: Infobibos, 2006. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/CanaSolo/index.htm>. Acesso em: 03 maio 2011.

STUPIELLO, J. P. A Filha da matéria prima. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 21, n. 2, p. 12, 2002.

TASSO JÚNIOR, L. C. **Caracterização agrotecnológica de cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) na região centro-norte do Estado de São Paulo**. 2007. 167 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

TAUPIER, L. O. G.; RODRÍGUEZ, G. G. A cana-de-açúcar. In: INSTITUTO CUBANO DE PESQUISA DOS DERIVADOS DA CANA-DE-AÇÚCAR – ICIDCA. **Manual dos derivados da cana-de-açúcar, diversificação, matéria-prima, derivados do bagaço, derivados do melaço, outros derivados, resíduos e energia**. Brasília: ABIPTI, 1999. 129 p.

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.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – ÚNICA. **Produção de cana-de-açúcar no Brasil**. São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadoscotacao/estatistica/>>. Acesso em: 28 set. 2009.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP. **Dados agrometeorológicos**. Ilha Solteira: UNESP/Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solo, 2009-2010. Disponível em: <<http://www.agr.feis.unesp.br/marinodados.php>>. Acesso em: 20 abr. 2011.

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

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas. **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 1, p. 181-190, 1997.

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, G. C.; MAZZA, J. A. **Planejamento, estratégias de manejo e nutrição de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Potafós, 2002. 16 p. (Informações Agronômicas, 97).

WUTKE, A. C. P.; CAMARGO, O. A. Adsorção e troca iônica. In: MONIZ, A. C. (Org.). **Elementos de pedologia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. p. 125-147.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; LANA, R. G. Q.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidades de amostragem num latossolo vermelho sob semeadura direta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 4, p. 1000-1007, 2007.