

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**INTER-RELAÇÕES DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-
AÇÚCAR COM ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE UM
ARGISSOLO VERMELHO EUTRÓFICO DO NOROESTE
PAULISTA**

JOSÉ ALEXANDRE BRAGA
Engenheiro Agrônomo

ILHA SOLTEIRA
ESTADO DE SÃO PAULO
FEVEREIRO/2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

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

**INTER-RELAÇÕES DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-
AÇÚCAR COM ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE UM
ARGISSOLO VERMELHO EUTRÓFICO DO NOROESTE
PAULISTA**

JOSÉ ALEXANDRE BRAGA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho

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

Ilha Solteira–SP
Fevereiro/2011

FICHA CATALOGRÁFICA

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

B813i Braga, José Alexandre.
Inter-relações da produtividade de cana-de-açúcar com atributos físico-químicos de um argissolo vermelho eutrófico do noroeste paulista / José Alexandre Braga. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2011.
85 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistemas de Produção, 2011

Orientador: Morel de Passos e Carvalho
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar. 2. Solos – Manejo. 3. Solos - Conservação. 4. Agricultura de precisão. 5. Geologia – Métodos estatísticos. 6. Geoestatística.



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: INTER-RELAÇÕES DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR COM ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO VERMELHO EUTRÓFICO DO NOROESTE PAULISTA

AUTOR: JOSE ALEXANDRE BRAGA

ORIENTADOR: Prof. Dr. MOREL DE PASSOS E CARVALHO

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

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

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

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA
Departamento de Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 01 de março de 2011.

DEDICO

Aos meus pais ***José Braga da Silva*** e ***Miriam Nóbrega Braga*** por terem me dado a oportunidade de alcançar o primeiro degrau que foi minha Graduação.

A minha esposa ***Ilza Maria Bandeira de Melo Braga*** e minhas filhas ***Natália Karine*** e ***Marcela Lorena de Melo Braga*** que nos momentos de dificuldades sempre me incentivaram e me motivaram a continuar nesta busca do crescimento profissional e humano.

AGRADEÇO

A **Usina Vale do Paraná – Suzanápolis –SP**, empresa da qual faço parte e que tem como sócio proprietário **Dr. Luiz Zacaner** e como diretor **Joel Soares**, que sempre na medida do possível me incentivaram e, não economizaram esforços para ajudar-me na conclusão deste curso.

A **Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira UNESP**, pelo acolhimento e oportunidade de aprendizado, tão valioso no mundo contemporâneo e competitivo no qual nos encontramos.

Ao **Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho** pela paciência, compreensão, parceria e amizade que surgiu no decorrer do curso.

Não posso me esquecer de agradecer também a todos os professores que tive a oportunidade de freqüentar suas aulas em especial aos Professores Doutores: **Fernando Tadeu, Antônio Bolonhesi, Walter Valério e Marcelo Andreotti**.

Aos amigos que me incentivaram a entrar no curso da pós-graduação: **Luiz Vanzella e Ronaldo Cintra Lima**. Também aqueles que me ajudaram para a conclusão deste trabalho: **Máila Terra Gioia e Flávio Carlos Dalchiavon**.

Aos amigos que participaram das coletas de campo junto aos colaboradores da usina, meus agradecimentos.

A **Minha Família** pelo incentivo e força nas horas que mais precisei, pois dificuldades não faltaram nesta caminhada. **Obrigado, amo vocês!**

A **Deus** que esteve presente conosco durante todo este tempo nos protegendo, iluminado e dando forças para que pudéssemos chegar ao fim desta caminhada.

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

RESUMO

A cana-de-açúcar, principal fonte de matéria prima destinada à produção do etanol combustível utilizado na frota automobilística, desempenha imprescindível papel frente à matriz energética nacional. Assim, durante o ano agrícola 2008/09, na Fazenda Caiçara, pertencente à Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar (20°28'10" S; 50°49'20" W), no município de Suzanópolis (SP), foram estudadas as correlações, de Pearson e espaciais, da produtividade de cana-de-açúcar com atributos físico-químicos de um ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico (Tropustalf típico). O objetivo foi analisar aquela que melhor explicasse o aumento da referida produtividade agrícola. A variedade de cana-de-açúcar pesquisada foi a SP 79 1011, instalando-se uma rede geoestatística com 120 pontos amostrais, num talhão de 14,60 ha (418m x 349 m) e declive uniforme de 0,056 m m⁻¹. Os atributos pesquisados foram: a) da planta: produtividade de colmos por hectare (PRO), volume de colmos por hectare (VOL), população de plantas por metro quadrado (POP), açúcares totais recuperáveis (ATR), sólidos solúveis totais (BRI), sacarose (POL), pureza (PUR) e o teor de fibras (FIB); e b) do solo: resistência mecânica à penetração (RP), umidade gravimétrica (UG), P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, Al, S, T, V%, m%, K/T, Ca/T e Mg/T, coletados nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m. Pela análise das correlações diretas, da produtividade de cana-de-açúcar com a população de plantas e com o teor de matéria orgânica do solo, pôde-se concluir que deverá haver uma população de 14,6 plantas por metro quadrado, assim como, o teor de 23 g dm⁻³ de matéria orgânica, para que se obtenha a produtividade máxima de 104 t ha⁻¹. Por outro lado, a correlação negativa entre o teor de matéria orgânica e a resistência à penetração indicou a necessidade de se empregar um manejo do solo que proporcione o aumento desse colóide orgânico e, por conseguinte, mantenha um bom ambiente para o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Do ponto de vista espacial, o pH do solo apresentou-se como um potencial indicador de sua qualidade química. Também, visando-se auxiliar futuros trabalhos voltados à agricultura de precisão, os quais empreguem os mesmos atributos do solo e da planta que os do presente estudo, os alcances das dependências espaciais recomendados deverão estar compreendidos entre 55 e 288 metros.

Termos de indexação: *Saccharum spp*, manejo do solo, conservação do solo, agricultura de precisão, geoestatística

BRAGA, J. A. **Relationships between the sugar-cane productivity and physic-chemical attributes of a Typic Tropustalf of the Northwest Sao Paulo State, Brazil.** Ilha Solteira, 2011. 85p. Dissertation. (Master Degree of Systems of Production) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

ABSTRACT

The sugar-cane, principal source of **raw material** destined to ethylic alcohol fuel of the motor-cars fleet, it has an important role in the Brazilian energy power generation. The relationships (Pearson and spatial) between the sugar-cane productivity and physic-chemical attributes were analyzed, in the agriculture year 2008/09, in a Tropustalf Typic of the **Caiçara Farm** / Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar, in Suzanápolis County, Sao Paulo State, Brazil (20°28'10" S; 50°49'20" W). The purpose was to study that better **one** will explain the improve of the agricultural productivity. The sugar-cane variety analyzed was the SP 79 1011, in a geostatistical grid with 120 sampling points, in an area of 14.60 ha (418 m x 349 m) and homogeneous slope of 0.056 m m⁻¹. The researched attributes were: a) plant: productivity of stem per hectare (PRO), volume of stem per hectare (VOL), stand of plants per square meter (STP), recoverable total sugar (ATR), total soluble solid (BRI), sucrose (POL), pureness (PUR), and fibre contents (FIB); and b) soil: cone index (CON), gravimetric moisture (GRM), P, OM, pH, K, Ca, Mg, H+Al, Al, BS, CEC, V%, m%, K/CEC, Ca/CEC and Mg/CEC, collected in the soil layers of 0-0.20 m and 0.20-0.40 m. Through investigation of the direct relationships, among the sugar-cane productivity with the stand of plant and the soil organic matter, it was concluded that will must been a stand with 14.6 plants per square meter, and the organic matter content of 23 g dm⁻³, at to get the maximum productivity of 104 t ha⁻¹. Otherwise, the negative relationship between the organic matter and the cone index showed to be necessary to utilize a soil management that improve this organic clay fraction of soil and, thus, to preserve a good environmental to the sugar-cane. Spatially, the soil pH showed to be a potent indicator of its chemical quality. So, with the purpose to support future researches with respect to precision agriculture, that will use the same soil and plant attributes of this research, the range of the spatial dependence will be between 55 and 288 meters.

Index terms: *Saccharum spp*, soil management, soil conservation, precision agriculture, geostatistic

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de semivariograma experimental.....	20
Figura 2: Croqui da malha experimental de amostragem.....	26
Figura 3. Exemplos de semivariogramas: (a) não-estacionário e (b) estacionário.....	30
Figura 4: Equações de regressão entre atributos da cana-de-açúcar (VOL, ATR, POL e PUR) em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP).....	45
Figura 5: Equações de regressão entre atributos da cana-de-açúcar (PRO, VOL e POP) em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP).....	46
Figura 6: Equações de regressão de atributos da cana-de-açúcar em função de atributos físico-químicos (0-0,20 m) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)	47
Figura 7: Equações de regressão da população de plantas da cana-de-açúcar em função de atributos químicos (0-0,20 m) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)	48
Figura 8: Equações de regressão de atributos da cana-de-açúcar em função de atributos físico-químicos (0,20-0,40 m) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)	49
Figura 9: Equações de regressão de atributos da cana-de-açúcar em função de atributos químicos (0,20-0,40 m) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)	50
Figura 10: Semivariogramas simples da produtividade e de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)	58
Figura 11: Semivariogramas simples de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP).....	59
Figura 12: Semivariogramas simples de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m	60
Figura 13: Semivariogramas simples de atributos químicos (Ca, Mg, H+Al, Al, S e T) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m.....	61

Figura 14: Semivariogramas simples de atributos químicos (V%, m%, K/T, Ca/T e Mg/T) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m.....	62
Figura 15: Semivariogramas simples de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m	63
Figura 16: Semivariogramas simples de atributos químicos (Ca, Mg, H+Al, Al, S e T) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m.....	64
Figura 17: Semivariogramas simples de atributos químicos (V%, m%, K/T, Ca/T e Mg/T) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP) na profundidade de 0,20-0,40 m.....	65
Figura 18: Mapas de krigagem da produtividade e de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)	68
Figura 19: Mapas de krigagem de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m	69
Figura 20: Mapas de krigagem de atributos químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m.....	70
Figura 21: Mapas de krigagem de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m	71
Figura 22: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função da população de plantas em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP).....	74
Figura 23: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função do BRI em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)	75
Figura 24: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função da MO1 em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)	76
Figura 25: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função da UG1 em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Análise descritiva da produtividade e de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP).....	33
Quadro 2: Análise descritiva de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m	35
Quadro 3: Análise descritiva de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m	36
Quadro 4: Matriz de correlação dos atributos da produtividade e de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)	40
Quadro 5: Matriz de correlação entre atributos da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade 0-0,20 m	41
Quadro 6: Matriz de correlação entre atributos da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade 0,20-0,40 m	42
Quadro 7: Análise de variância da regressão da produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função dos atributos da planta em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)	52
Quadro 8: Análise de variância da regressão da produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função dos atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m	53
Quadro 9: Análise de variância da regressão da produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função dos atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m	53
Quadro 10: Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados de atributos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP).....	55
Quadro 11: Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados da produtividade da cana-de-açúcar com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m.....	56

Quadro 12: Parâmetros dos semivariogramas simples de alguns atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m.....	57
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Aspectos gerais da cultura da cana-de-açúcar	15
2.2 Atributos físicos do Solo	15
2.3 Atributos químicos do Solo	17
2.4 A geoestatística na pesquisa agrônômica	18
2.4.1 Semivariograma.....	18
2.4.2 Interpolação dos dados por krigagem ordinária	20
2.4.3 Semivariograma cruzado	21
2.4.4 Cokrigagem	22
2.4.5 Variabilidade espacial aplicada às culturas agrícolas e ao solo.....	22
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 Caracterização do local de origem dos dados.....	24
3.2 Implantação da cultura da cana-de-açúcar e da malha experimental de campo	24
3.3 Coleta dos dados e metodologia de determinação dos atributos pesquisados.....	25
3.4 Análise estatística e geoestatística dos atributos pesquisados	28
3.4.1 Exclusão da tendência quando da não-formação da estacionariedade	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1 Análise descritiva dos dados.....	32
4.1.1 Variabilidade dos atributos.....	32
4.1.1.1 Atributos da planta.....	32
4.1.1.2 Atributos do solo	34
4.1.2 Distribuição de frequência dos atributos	34
4.1.2.1 Atributos da planta.....	34
4.1.2.2 Atributos do solo	37
4.1.3 Valores médios dos atributos.....	37

4.1.3.1 Atributos da planta.....	37
4.1.3.2 Atributos do solo	38
4.2 Análise de regressão entre os atributos	39
4.2.1 Regressão linear simples	39
4.2.1.1 Matriz de correlação linear simples entre os atributos.....	39
4.2.1.1.1 Atributos da planta <i>versus</i> atributos da planta.....	39
4.2.1.1.2 Atributos da planta <i>versus</i> atributos do solo.....	39
4.2.1.1.3 Atributos do solo <i>versus</i> atributos do solo	43
4.2.1.2 Regressão linear simples entre os atributos.....	44
4.2.1.3 Regressão linear múltipla entre os atributos (<i>stepwise</i>).....	51
4.3 Análise geoestatística dos atributos.....	53
4.3.1 Análise semivariográfica simples.....	53
4.3.1.1 Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos	53
4.3.1.2 Validação cruzada dos semivariogramas simples ajustados para o atributos.....	66
4.3.1.3 Mapas de krigagem dos atributos	67
4.3.2 Análise semivariográfica cruzada.....	72
4.3.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem dos atributos.....	72
5 CONCLUSÕES.....	79
REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma planta semiperene da família *Poaceae*. A sua importância socioeconômica para o Brasil é inquestionável, sendo a principal matéria-prima para a produção do etanol utilizado pelos veículos automotores, além da sua destinação para a produção do açúcar, um dos principais produtos de exportação nacional. Metade da produção mundial de cana-de-açúcar é assegurada atualmente pelo Brasil, Cuba, México e Estados Unidos da América do Norte. De acordo com estimativa da CONAB (2010), na safra 2009/10, o setor sucroalcooleiro nacional processou 604,5 milhões de toneladas de colmos, tendo o estado de São Paulo como o maior produtor, participando com 54% desta (362,7 milhões de toneladas), numa área de 4,1 milhões de hectares, com a produtividade média em torno 87,5 t ha⁻¹.

O correto preparo do solo é etapa primordial à implantação da lavoura canavieira. Entretanto, muitas vezes, tal preparo é realizado sem levar em conta as condições físicas atuais do solo, como a sua umidade, a qual é um fator controlador da compactação do solo. Assim, as principais alterações são evidenciadas pela diminuição da taxa de infiltração de água no solo e aumento da resistência à penetração das raízes da cultura. Em consequência à degradação dos atributos do solo decorrente do manejo inadequado, há queda condicional da produção da cana-de-açúcar (UTSET; CID, 2001). Por outro lado, o manejo visando a manutenção e/ou adição de matéria orgânica no solo é uma prática muito importante, uma vez que, à exemplo da vinhaça, os benefícios são, principalmente, o aumento na resistência à erosão e na capacidade de armazenamento de água devido à sua atuação sobre a estrutura do solo, através do aumento da estabilidade dos agregados (FURTINI NETO et al., 2001), além da melhoria na fertilidade do solo.

No Brasil, a partir do ano 2000, vem ocorrendo substancial modificação tecnológica no cultivo do solo, dada pela agricultura de precisão (AP). A AP permite ao agricultor buscar soluções para problemas levantados na propriedade agrícola, dados principalmente pela

adoção de um mapa de produtividade que possua elevada correlação espacial com os mapas de fertilidade e atributos físicos do solo. A partir desse fato, pode-se perfeitamente efetuar adubações a taxas variáveis, ou descompactação localizada, de forma que nos locais onde ocorrerem deficiência nutricional ou compactação, normalmente associadas às mais baixas produtividades agrícolas, deverão ser empregadas as técnicas para minimizar seus impactos na produtividade.

Em sistemas de cultivos altamente tecnificados, como na AP em cana-de-açúcar, é fundamental ter o conhecimento da variabilidade espacial de atributos do solo, o que poderá contribuir para redução de custos nos sistemas de produção. Neste sentido, a geoestatística, ferramenta essencial a AP, possibilita uma análise detalhada da variabilidade espacial dos atributos do solo que se relacionam com a produtividade agrícola, entre os quais os nutrientes, assim como aqueles voltados às melhores condições físico-biológicas, indicando alternativas de manejo para reduzir os seus efeitos sobre a produção das culturas (TRANGMAR et al., 1985).

Considerando o exposto, pesquisa relacionando a variabilidade espacial da produtividade da cultura da cana-de-açúcar com os atributos físico-químicos do solo se faz necessária, aliando produtividade às práticas agrícolas. Desta forma, considerando o atual e substancial avanço da cultura canavieira no Brasil, o estudo da produtividade de cana-de-açúcar com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico do noroeste paulista teve como objetivo analisar as correlações, lineares e espaciais, entre a de cana-de-açúcar com atributos pesquisados, visando determinar aquele(s) que melhor se relaciona(m) com a melhora dos atributos produtivos e tecnológicos da cultura em questão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais da cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é uma planta de ciclo semiperene, pertencente à família Gramineae (Poaceae), de climas tropicais e subtropicais (GOMES, 2006). É plantada no Brasil há quase 500 anos e hoje o país é o maior pólo sucroalcooleiro do planeta. Seu cultivo tem chamado à atenção do mundo, principalmente diante do impacto ambiental causado pela utilização de combustíveis fósseis, desde a revolução industrial, e pelo fato do álcool da cana-de-açúcar ser uma das biotecnologias mais acessíveis para a geração de energia limpa em substituição ao petróleo, caracterizando-se como a segunda cultura mais importante para o agronegócio brasileiro (VITTI; MAZZA, 2002).

A espécie *S. officinarum* L. é de grande importância para os programas de melhoramento visando características agrônômicas desejáveis, tais como alto teor de sacarose, boa pureza de caldo e teor de fibra adequado para moagem, no entanto, apresenta sérios problemas fitossanitários (CASTRO; KLUGE, 2001). Com a expansão da cultura em diferentes regiões do Brasil foi necessária a busca de variedades que se adaptassem as diferentes regiões, dessa forma hibridações interespecíficas foram realizadas com intuito de manter as boas características da espécie *S. officinarum* L incluindo características como resistência a seca, a pragas e a doenças e também visando características morfológicas adequadas, principalmente para a colheita mecanizada. Assim, as variedades de hoje utilizadas comercialmente são todos híbridos melhorados, e são chamados, na terminologia atual, de *Saccharum spp*. (FIGUEIREDO et al., 2008).

2.2 Atributos físicos do Solo

A resistência do solo à penetração constitui um dos principais atributos físicos considerados na avaliação da qualidade do solo, podendo apresentar grande variabilidade espacial. É fortemente influenciada pelo teor de água do solo e tem sido utilizada como indicador da compactação do solo em sistemas de manejo, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (MERCANTE et al., 2003).

A compactação do solo, pelo uso de práticas inadequadas de manejo, resulta em aumento na densidade do solo e, por consequência, em alterações na porosidade do solo, retenção de água, aeração e resistência do solo à penetração das raízes (SOUZA et al., 2004a), condicionando queda de produção da cana-de-açúcar (UTSET; CID, 2001). Quando ocasionada pelo tráfego excessivo de máquinas, por resultar em maiores valores de densidade do solo e resistência do solo à penetração e em menores valores de macroporosidade (WATANABE et al., 2002), impacta negativamente a produtividade das culturas que encontram dificuldade de desenvolvimento radicular e por consequência deficiência em absorver água e nutrientes da solução do solo, as modificações nos atributos físicos, dependerão da intensidade de preparo do solo.

Para se conhecer o estado atual de compactação, a avaliação da resistência do solo à penetração deve ser realizada concomitantemente à do teor da água no solo, uma vez que elas variam de forma inversamente proporcional (SOUZA et al., 2006). Diversos estudos demonstraram que a variabilidade da resistência do solo à penetração e o teor de água no solo não ocorreram ao acaso, mas apresentaram correlação ou dependência espacial (ABREU et al., 2003; MERCANTE et al., 2003).

De acordo com Genro Junior et al. (2004), a resistência do solo à penetração geralmente é aumentada com a compactação do solo devido ao decréscimo da umidade. Segundo Gonçalves et al. (1999), a umidade varia de modo espacial e temporal no solo. Desta forma, pesquisas da resistência do solo à penetração e do teor de água no solo tem mostrado influência sobre a produtividade vegetal (FREDDI et al., 2006; SOUZA et al., 2006).

Os níveis críticos de resistência mecânica para o crescimento radicular das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Assim, recomenda-se sua avaliação quando o teor de água do solo estiver próximo do valor da sua capacidade de campo (REICHERT et al., 2007). Entretanto, quando obtida no momento em que o teor de água no solo estiver ao redor de 2/3 da microporosidade (solo friável/macio), a maioria dos trabalhos tem adotado a seguinte classificação de resistência à penetração (RP), estabelecida por ARSHAD et al. (1996): a) extremamente baixa: $RP < 0,01$ MPa; b) muito baixa: $0,01 \leq RP <$

0,1 MPa; c) baixa: $0,1 \leq RP < 1,0$ MPa; d) moderada: $1,0 \leq RP < 2,0$ MPa; e) alta: $2,0 \leq RP < 4,0$ MPa; f) muito alta: $4,0 \leq RP < 8,0$ MPa e g) extremamente alta: $RP > 8,0$ MPa.

2.3 Atributos químicos do Solo

O fósforo é o macronutriente primário exigido em menores quantidades pelas plantas. Entretanto, é o nutriente mais usado na adubação das culturas agrícolas, pois sua carência é generalizada nos solos tropicais, além de haver forte fixação aos colóides do solo. As funções do fósforo nas plantas são, principalmente, na respiração, armazenamento e transferência de energia, divisão celular, crescimento das células e crescimento prematuro das raízes, no qual o seu suprimento adequado é importante para a formação dos primórdios das partes reprodutivas. Os fatores que afetam sua disponibilidade são: a) tipo e quantidade de argila, b) pH do solo e c) teor de matéria orgânica. Os níveis estabelecidos por Raij et al. (1997) para o fósforo extraído por resina foram os seguintes: a) baixo: $P < 15 \text{ mg dm}^{-3}$; b) médio: $16 \leq P \leq 40 \text{ mg dm}^{-3}$ e c) alto: $P > 40 \text{ mg dm}^{-3}$.

A matéria orgânica afeta as características químicas, físicas e biológicas do solo. Entre as características químicas, destacam-se principalmente a disponibilidade de nutrientes às culturas, a capacidade de troca catiônica e a complexação de elementos tóxicos e fonte de micronutrientes, fundamentais em solos tropicais, na sua maioria altamente intemperizados e ácidos. Já a principal característica física modificada é a agregação. A partir do seu efeito sobre a agregação do solo, indiretamente são afetadas as demais características físicas do solo, como sua densidade, porosidade, aeração, capacidade de retenção e a infiltração de água, que são fundamentais à sua capacidade produtiva. Em relação às características biológicas, a matéria orgânica as afeta diretamente, uma vez que atua como fonte de carbono, energia e nutrientes aos microrganismos (BAYER; MIELNICZUK, 2008). Os níveis críticos estabelecidos por Raij et al. (1997), para a matéria orgânica do solo (MO), foram: a) baixo: $MO < 25,0 \text{ g dm}^{-3}$; b) médio: $25,1 \leq MO \leq 50,0 \text{ g dm}^{-3}$; c) alto: $MO > 50,0 \text{ g dm}^{-3}$.

O pH do solo influencia as solubilidades dos nutrientes vegetais, concentrações na solução e as formas iônicas. Consequentemente, também são influenciadas a absorção e a utilização deles. A grande maioria dos solos brasileiros apresenta sérias restrições ao desenvolvimento das culturas agrícolas, decorrentes do efeito nocivo da acidez. O avanço da agricultura no Brasil tem sido feito principalmente nas áreas de Cerrado, que apresentam propriedades químicas inadequadas, como elevada acidez, toxidez por alumínio e deficiência generalizada de nutrientes, com destaque para o P, Ca e Mg. Solos dessa natureza, quando

corrigidos quimicamente, apresentam grande potencial para uma agricultura tecnificada e de elevada produtividade. O conhecimento da relação entre a acidez do solo e o crescimento e desenvolvimento das plantas é fundamental para o estabelecimento das práticas corretivas dessa acidez, que visem à maior eficiência, tanto dos sistemas de produção agrícola como do uso dos recursos naturais (SOUZA et al., 2007a). Para o pH (CaCl_2) adotam-se os seguintes limites de interpretação de classes (RAIJ et al., 1997): a) muito alta: até 4,3, b) alta: 4,4 – 5,0, c) média: 5,1 – 5,5, d) baixa: 5,6 – 6,0 e e) muito baixa: > 6,0.

Sendo uma gramínea, a cana-de-açúcar apresenta tolerância à acidez do solo. Contudo, a calagem proporciona-lhe importantíssimo papel pelo seu efeito nutricional, principalmente pelo fornecimento de cálcio e magnésio. Também tem possibilitado maior longevidade do canavial, proporcionando normalmente um corte a mais. Além de elevar os teores de cálcio e de magnésio do solo a níveis adequados para atender as necessidades da cultura, neutraliza os efeitos nocivos do alumínio. Para isso, é necessário utilizar tanto o corretivo quanto a dosagem correta, tomando-se por base a análise química do solo para fins de fertilidade (DIAS; ROSSETO, 2006).

2.4 A geoestatística na pesquisa agronômica

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

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

2.4.1 Semivariograma

Um dos métodos mais antigos de se estimar a dependência no espaço ou no tempo de amostras vizinhas é pelo uso da autocorrelação. Porém, quando as amostras são referenciadas

especialmente para a interpolação entre locais medidos será necessária para a construção de mapas de isolinhas, uma ferramenta mais adequada para medir a dependência espacial. Essa ferramenta é o semivariograma (VIEIRA et al., 1983). O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de mapeamento por krigagem, permitindo representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (EMBRAPA, 2004) ou no tempo, definido por três parâmetros: o efeito pepita (C_0), o patamar ($C_0 + C$) e o alcance (A_0). O semivariograma pode ser estimado por:

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

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

O efeito pepita (C_0) é representado por um valor da semivariância, diferente de zero, quando a distância entre pontos amostrais é nula. Assim, representa aquela variância que não pôde ser detectada pelo semivariograma, seja pela necessidade de coletas amostrais a distâncias menores, seja pela ocorrência de um erro qualquer em alguma etapa do trabalho. O patamar ($C_0 + C$) representa a distância na qual toda a semivariância da amostra é de influência aleatória, correspondendo à variância total, obtida pela estatística descritiva (TRANGMAR et al., 1985).

O alcance (A_0) da dependência espacial é o principal parâmetro fornecido pela geoestatística, representando a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são altamente iguais entre si. Assim, valores de um atributo, localizados dentro da área cujo raio é igual ao seu valor, possuem entre si extrema semelhança em magnitude. Contudo, passam a assumir valores diferentes, maiores ou menores, somente para as distâncias estabelecidas a partir do seu valor (VIEIRA et al., 1991).

Seu conhecimento é de extrema importância para a Agricultura de Precisão, uma vez que os programas computacionais o utilizam para, em função da inteligência artificial que o geoprocessamento desempenha via satélite, poder monitorar o trator agrícola, equipado com a semeadora/adubadora e, assim, poder efetuar a distribuição de um determinado insumo com taxas variáveis no terreno (VIEIRA et al., 1991).

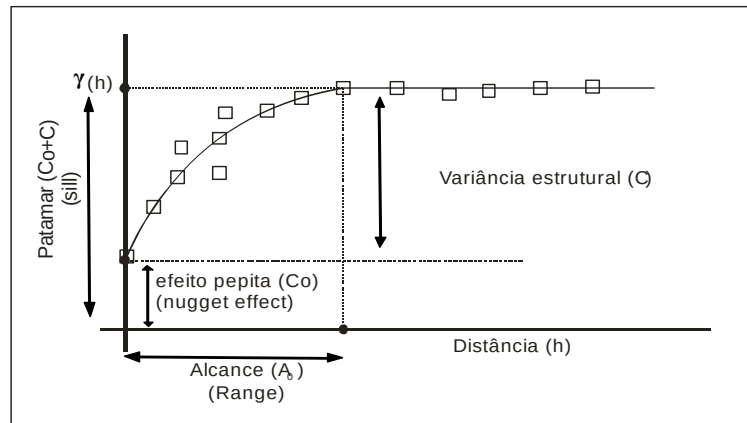


Figura 1: Exemplo de semivariograma experimental.

No ajuste dos modelos experimentais (linear, esférico, exponencial e gaussiano), que depende do atributo e da camada de solo analisada, são considerados: a) a menor soma dos quadrados dos desvios (**SQD**); b) o maior coeficiente de determinação (r^2) e c) o maior avaliador do grau da dependência espacial (**ADE**). O ajuste é validado pela técnica da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionará a melhor malha de krigagem. Para cada atributo é estimado o efeito pepita (C_0), o alcance (A_0) e o patamar (C_0+C). A classificação da dependência espacial (**ADE**) pode ser realizada mediante sugestões de Cambardella et al. (1994), modificadas pelo GS⁺ (2004), conforme a seguinte expressão:

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

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

A interpretação para o **ADE** é a seguinte: a) $\text{ADE} \leq 25\%$ indica variável espacial fracamente dependente; b) $25\% < \text{ADE} \leq 75\%$ moderadamente dependente, e c) $\text{ADE} > 75\%$ fortemente dependente. Por outro lado, sabe-se que a validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas que efetuam a krigagem. Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, são obtidos, por meio da interpolação por krigagem, os mapas de isolinhas para a interpretação e o detalhamento da variabilidade espacial dos atributos pesquisados.

2.4.2 Interpolação dos dados por krigagem ordinária

Existem diversos métodos de interpolação dos dados: método da triangulação, método dos polígonos, método do inverso da distância, método do vizinho mais próximo e método da

krigagem ordinária. Entretanto, a maioria desses métodos não fornece o algoritmo dos erros associados aos resultados obtidos, diferentemente do método geoestatístico da krigagem ordinária, segundo um modelo contínuo de variação espacial. Pelo método da krigagem ordinária, determinando-se o semivariograma da variável e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar linearmente valores em qualquer posição na área de estudo, sem tendência e com variância mínima. Este é o método de interpolação dos dados mais utilizado no mapeamento dos atributos do solo (SCHLOEDER et al., 2001).

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

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

em que: N é o número de valores medidos, $z(x_i)$, envolvidos na estimativa, e λ_i são os pesos associados a cada valor medido, $z(x_i)$. Os resultados do estudo podem ser expressos em forma de mapa de isolinhas ou de superfície tridimensional. Porém, a maneira mais utilizada para representar a variabilidade espacial dos atributos do solo em uma área é por meio de mapas de isolinhas (CORÁ; BERALDO, 2006).

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

2.4.3 Semivariograma cruzado

Em situações em que existe a correlação espacial entre duas propriedades, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas expressas no semivariograma

cruzado. Este método é chamado de cokrigagem, o qual pode ser mais preciso do que o da krigagem em si (VIEIRA, 2000).

2.4.4 Cokrigagem

A cokrigagem é uma técnica de avaliação geoestatística que permite estimar uma variável primária de interesse por intermédio de uma variável secundária. Para tanto, é necessário que exista a dependência espacial para cada uma e entre as variáveis Z_1 e Z_2 . Essa estimativa pode ser mais precisa do que a krigagem de uma variável simples (VAUCLIN et al., 1983), quando o semivariograma cruzado mostrar dependência entre as duas variáveis. A principal vantagem da cokrigagem é a sua utilização para estimar valores de uma propriedade do solo de difícil mensuração, como a condutividade hidráulica, com base em outra de mais fácil obtenção, tal como o teor de argila, desde que sejam correlacionadas espacialmente.

2.4.5 Variabilidade espacial aplicada às culturas agrícolas e ao solo

No Brasil vários trabalhos têm sido desenvolvidos buscando correlacionar a variabilidade espacial das propriedades do solo às produtividades das principais culturas agrícolas de interesse econômico. Assim, alguns são relatados.

A aplicação da geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos (arado, grade e plantio direto), demonstrou os seguintes resultados: somente o pH apresentou baixa variabilidade nos três sistemas de preparo e nas duas profundidades estudadas (0 - 0,05 m e 0,05 - 0,20 m), as variáveis P e K apresentaram dependência espacial para a profundidade de 0 - 0,05 m, independentemente do sistema de preparo, entretanto, tais resultados não se repetiram na profundidade 0,05 - 0,20 m, o que indica que a dependência espacial varia conforme a profundidade de coleta da amostra de solo (CARVALHO et al., 2002).

Na análise da variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente no município de Planaltina-GO, pesquisadores concluíram que os atributos do solo apresentaram de baixa a alta variabilidade e que o manejo da matéria orgânica do solo foi fundamental para melhorar a produtividade dos cultivos (MONTEZANO et al., 2006).

Em Campos Novos Paulista-SP, foi relatada a variação espacial na produtividade do milho safrinha devido aos macronutrientes e à população de plantas. Observou-se que a

população de plantas normais e os teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e a saturação por bases no solo tiveram efeito significativo sobre a produtividade de grãos (MOLIN et al., 2007).

O presente trabalho tem o intuito de acrescentar à literatura dados da variabilidade espacial dos componentes produtivos da cultura. Até o momento poucos trabalhos foram realizados com a cultura em questão visando correlacionar atributos do solo com atributos de planta (SOUZA et al., 2006; SOUZA et al. 2007b; SOUZA et al., 2008a; SOUZA et al., 2010 a,b)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local de origem dos dados

O trabalho foi desenvolvido durante o ano agrícola 2008/09, na Fazenda Caiçara, pertencente à Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar, no município de Suzanópolis (SP) no noroeste do estado de São Paulo, cujas coordenadas 20°28'10" S; 50°49'20" W. A precipitação média anual é de 1300 mm, enquanto que a temperatura média do ar é de 23,7 °C. O tipo climático é o Aw, segundo preceitos de Köeppen referidos por Vianello e Alves (2004), caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O solo no qual a malha experimental foi instalada foi classificado como ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico típico textura arenosa/média, A moderado, mesoeutrófico, meso-epieutrófico, endodêmico, epicompactado, muito profundo, moderadamente ácido (ALVES et al., 2009).

3.2 Implantação da cultura da cana-de-açúcar e da malha experimental de campo

Para a implantação da cana-de-açúcar (variedade SP 79 1011) sob área que estava sob pastagem (braquiária) á 10 anos, essa foi dessecada com Roundup WG (glifosato) 2,5 kg/ha do produto comercial. Para o preparo do solo foi realizado uma gradagem pesada com uma grade modelo SGAC 18 (Civemasa), duas gradagens intermediárias com uma grade modelo SIC 28 (Civemasa). Aplicou-se a lanço 2,0 t/ha de calcário dolomítico e para sua incorporação, a 0,35 m de profundidade do solo, utilizou-se um arado de aivecas (4 aivecas). Para finalizar o preparo do solo utilizou-se uma grade niveladora modelo GNP 40 (Civemasa).

O plantio foi realizado no dia 20 de junho de 2006, utilizando-se para abertura do sulco de plantio um sulcador de duas linhas, no espaçamento de 1,50 m. No momento da sulcação utilizou-se 500 kg/ha da fórmula 6-30-24 e para cobertura dos toletes no sulco de plantio, foi aplicado Regent 800 WG (fipronil) 250 g/ha do produto comercial visando o controle de pragas de solo, principalmente cupins. Após o primeiro corte da cultura em setembro de 2007 (colheita mecanizada) foi aplicada 1 t/ha de gesso. Para adubação da soqueira foi utilizado 500 kg/ha da fórmula 18-00-27. Para a coleta de dados, a cultura encontrava-se no segundo corte e bisada, ou seja, estava com 24 meses em campo, assim realizou-se a colheita manual das amostras após queima da cana-de-açúcar (maio de 2009).

Na alocação da malha experimental foram definidas as direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas, sendo constituída de 120 pontos amostrais, distribuídos numa área de 14,53 ha⁻¹ (418,46 m x 349,00 m). O espaçamento utilizado entre os pontos na grande malha foi de 42 m x 43 m, enquanto que na malha de refinamento, construída com a finalidade de detectar alcances da dependência espacial para espaçamentos menores do que 40 m, composta por 3 pontos adjacentes ao ponto central, no espaçamento de 9 m (Figura 2).

3.3 Coleta dos dados e metodologia de determinação dos atributos pesquisados

As avaliações foram realizadas em maio de 2009, sendo pesquisados atributos físico-químicos do solo como também da planta, individualmente coletados no entorno de cada ponto amostral da malha experimental. Os atributos físicos do solo pesquisados foram a resistência do solo à penetração (RP) e a umidade gravimétrica (UG). Já os atributos químicos avaliados foram os teores de fósforo (P) e matéria orgânica (MO), valor de pH em CaCl₂ (pH), teores de K⁺ (K), Ca⁺² (Ca), Mg⁺² (Mg), H⁺+Al⁺³ (H+Al), e Al⁺³ (Al), valores de soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (T), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), relações K/T (K/T), Ca/T (Ca/T) e Mg/T (Mg/T). As amostras simples foram coletadas na entrelinha de plantio da cana-de-açúcar, nas profundidades: 1) 0 - 0,20 m e 2) 0,20 - 0,40 m, utilizando para tal finalidade um trado de caneca, com diâmetro interno de 0,08 m e altura de 0,20 m, constituindo um volume de 1,005.10 m⁻³. O solo foi seco ao ar (terra fina seca ao ar – TFSA), posteriormente passado por uma peneira com malha de 2,0 mm, sendo as análises químicas realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira.

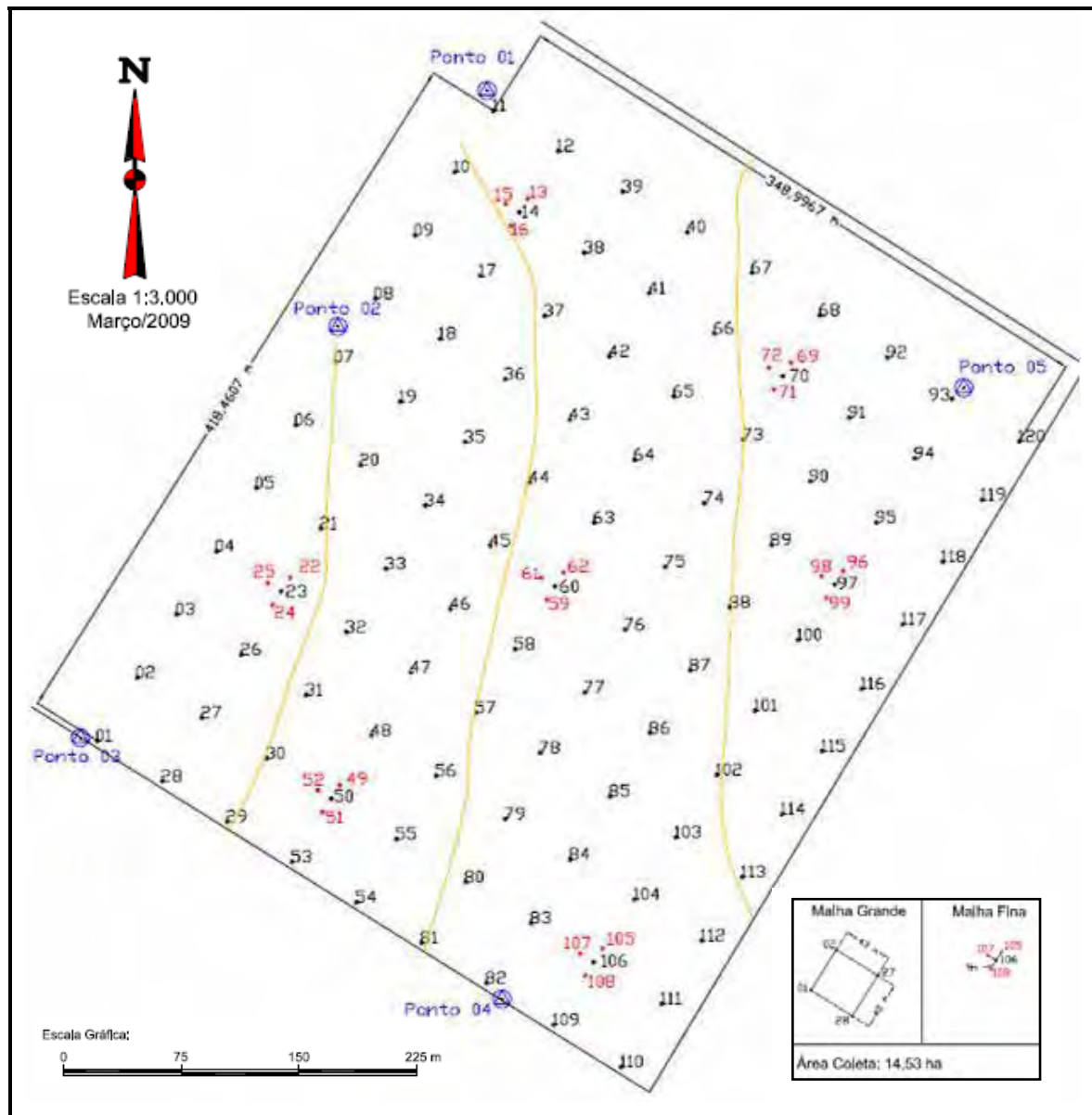


Figura 2: Croqui da malha experimental de amostragem

A RP foi avaliada com o penetrômetro de impactos (STOLF, 1991) e calculada segundo a seguinte expressão (ROSA FILHO et al., 2009):

$$\mathbf{RP} = \{5,581 + 6,891 \cdot [\mathbf{N}/(\mathbf{P}-\mathbf{A}) \cdot 10]\} \cdot 0,0981 \dots \dots \dots (4)$$

onde: **RP** é a resistência mecânica do solo à penetração (MPa), **N** é o número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para a obtenção da leitura no sabre, **A** e **P** são, respectivamente, as leituras de penetração no solo antes e depois da realização dos impactos (cm).

Para a determinação da UG, expressa em kg kg^{-1} , foram coletadas amostras deformadas de solo com trado de caneca, realizada conforme Embrapa (1997). O **pH** foi determinado potenciométricamente em solução de CaCl_2 0,01M (EMBRAPA, 1979) e, o carbono orgânico pelo método da combustão úmida, via colorimétrica, resultando no teor de matéria orgânica do solo à partir da seguinte expressão (RAIJ et al., 2001)

$$\mathbf{MO} = \mathbf{C} \times 1,724 \times 10 \dots \dots \dots (5)$$

onde: **MO** é o teor de matéria orgânica (g dm^{-3}) e **C** é o teor de carbono orgânico.

Os demais atributos químicos do solo também foram determinados conforme Raij et al. (2001). Os teores de **P** (mg dm^{-3}), **Ca**, **Mg** e **K** ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) disponíveis no solo foram quantificados através do método de extração pela resina trocadora de íons. A acidez potencial ($\mathbf{H}^+ + \mathbf{Al}^{+3}$) determinada através do extrator acetato de cálcio 1 N, dada em $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e os valores da **S**, **T**, **V%** e **m%** foram quantificados indiretamente através das seguintes expressões:

$$\mathbf{S} = \mathbf{Ca}^{+2} + \mathbf{Mg}^{+2} + \mathbf{K}^{+} \dots \dots \dots (6)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{S} + (\mathbf{H}^+ + \mathbf{Al}^{+3}) \dots \dots \dots (7)$$

$$\mathbf{V\%} = (\mathbf{S}/\mathbf{T}) \times 100 \dots \dots \dots (8)$$

$$\mathbf{m\%} = (\mathbf{Al}^{+3} / \mathbf{Al}^{+3} + \mathbf{S}) \times 100 \dots \dots \dots (9)$$

onde: **S** é a soma de bases trocáveis e **T** é a capacidade de troca catiônica, ambos expressos em $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e **V%** e **m%** são, respectivamente, a saturação por bases e a saturação por alumínio, expressas em porcentagem (%). Desta maneira, foram analisados 34 atributos do solo, a saber: a) profundidade 1: RP1, UG1, P1, MO1, pH1, K1, Ca1, Mg1, H+Al1, Al1, S1, T1, V%1, m%1, K/T1, Ca/T1, e Mg/T1; e b) profundidade 2: RP2, UG2, P2, MO2, pH2, K2, Ca2, Mg2, H+Al2, Al2, S2, T2, V%2, m%2, K/T2, Ca/T2, e Mg/T2.

Em relação aos atributos da planta, a produtividade de colmos (PRO), expressa em t ha^{-1} , foi obtida pela pesagem dos colmos contidos numa área útil de 9 m^2 , sendo duas linhas de 3 m (3m x 3m) por ponto amostral. Para o volume (VOL), expresso em $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$, foram coletadas cinco colmos por ponto amostral, sendo medidos seus comprimentos e

diâmetros da base, do meio e do ápice do colmo para a obtenção dos diâmetros médios para o cálculo final do VOL, considerando a população de plantas (POP) do ponto amostral, com área útil de 9 m², onde seus valores foram expressos em plantas por metro quadrado. Os atributos tecnológicos, açúcares totais recuperáveis (ATR), percentual de sólidos solúveis totais (BRI), percentual de sacarose (POL), percentual de pureza (PUR) e percentual de fibra (FIB), foram determinados no laboratório da Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar, unidade Suzanópolis-SP, (PCTS - Pagamento da Cana-de-açúcar pelo Teor de Sacarose) conforme metodologia proposta pelo Consecana (2003).

3.4 Análise estatística e geoestatística dos atributos pesquisados

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

Na sequência, com o auxílio da planilha de cálculos Excel, foi montada a matriz de correlação, para posteriormente modelar as regressões de interesse para as combinações, duas a duas, entre os atributos estudados. Por outro lado, utilizando-se do pacote computacional SAS, foram efetuadas as regressões lineares múltiplas entre: 1) a PRO (variável dependente) em função dos atributos da planta da cana-de-açúcar (variáveis independentes), e 2) a PRO (variável dependente) em função dos atributos físico-químicos pesquisados (variáveis independentes) para cada camada de solo estudada, no intuito de selecionar aqueles atributos que, nos devidos casos, proporcionariam as melhores equações para estimar a PRO, por intermédio do *stepwise*, a 10% de probabilidade para a inclusão e exclusão de variáveis no modelo. O desempenho das equações foi analisado pelo coeficiente de determinação (R^2).

Para cada atributo 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 7.0* (GS⁺, 2004). Os ajustes dos semivariogramas (krigagem e cokrigagem), em função de seus modelos (linear, esférico,

exponencial e gaussiano), foram efetuados pela seleção inicial de: 1) a menor soma dos quadrados dos desvios (**RSS**); 2) o maior coeficiente de determinação (**r²**), 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 (**C₀**), o patamar (**C₀+C**) e o alcance (**A₀**). A análise do avaliador da dependência espacial (**ADE**) foi conforme sugestões de Cambardella et al. (1994), modificada por GS⁺ (2004) conforme a seguinte expressão:

$$\text{ADE} = [C/(C+C_0)].100.....(10)$$

onde: **ADE** é o avaliador da dependência espacial; **C** é a variância estrutural; **C+C₀** é o patamar. No entanto, a interpretação proposta para o **ADE** foi a seguinte: a) **ADE** < 20% = variável espacial de muito baixa dependência (MB); b) 20% ≤ **ADE** < 40% = baixa dependência (BA); c) 40% ≤ **ADE** < 60% = média dependência (ME); d) 60% ≤ **ADE** < 80% = alta dependência (AL), e e) 80% ≤ **ADE** < 100% = muito alta dependência (MA). Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação por krigagem, os mapas para a interpretação e o detalhamento da variabilidade espacial dos atributos pesquisados.

3.4.1 Exclusão da tendência quando da não-formação da estacionariedade

No caso da não-estacionariedade de um atributo qualquer, pode-se efetuar a retirada da tendência dos dados pela técnica da regressão múltipla polinomial. A geoestatística é a ciência que trata da aplicação da teoria das variáveis regionalizadas, utilizada na estimativa de fenômenos geológicos. Dessa forma, uma variável **Z**, que é distribuída ordenadamente no espaço **s**, é tida como variável regionalizada **Z(s)**. Portanto, pode ser representada espacialmente pelo semivariograma, partindo-se do pressuposto de que seja intrínseca, isto é, de que seus incrementos sejam estacionários. Entretanto, em muitos casos ela não satisfaz essa condição, de forma a caracterizar o fenômeno por exibir uma tendência, isto é, de não ser intrínseca e, portanto, não-estacionária. A Figura 3 ilustra tipicamente o semivariograma não-estacionário e o estacionário.

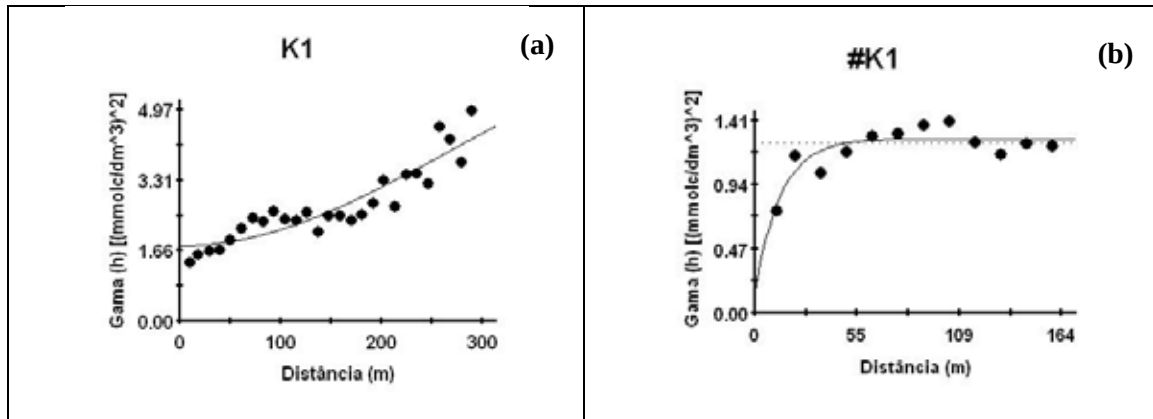


Figura 3. Exemplos de semivariogramas: (a) não-estacionário e (b) estacionário.

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

$$Z(s) = t(s) + R(s) \dots \dots \dots (11)$$

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

Segundo Davis (1986), a tendência $t(s)$ da variável $Z(s)$, que depende exclusivamente da localização geográfica (coordenadas cartesianas x 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 $t(s)$ é obtida em função dos valores das coordenadas cartesianas (x , y) do ponto. As expressões testadas são a linear, quadrática e a cúbica, relacionadas respectivamente nas equações a seguir:

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y \dots \dots \dots (12)$$

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy \dots \dots \dots (13)$$

$$t(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy + a_6.x^3 + a_7.y^3 + a_8.x^2y + a_9.y^2x \dots \dots \dots (14)$$

Dessa forma, a eleição da tendência $t(s)$, efetuada pelo ajuste dos mínimos quadrados para cada modelo, é obtida pela escolha daquele que apresentar o maior coeficiente de determinação (r^2). Definido o modelo, pode-se calcular o resíduo $R(x,y)$, a partir da equação 15, efetuando-se:

$$R(x,y) = Z(x,y) - t(x,y) \dots \dots \dots (15)$$

Portanto, com tais resíduos poderão ser efetuados os tratamentos necessários aos dados, tais como o ajuste do semivariograma e sua validação. Finalmente, a soma dos resíduos aos respectivos desvios resultará na estimativa da variável $Z^*(x,y)$, com a qual poderá ser efetuada a krigagem, conforme a equação 16:

$$Z^*(x,y) = t^*(x,y) + R^*(x,y) \dots \dots \dots (16)$$

onde: $Z^*(x,y)$ é a estimativa da variável não-estacionária $Z(s)$, $t^*(x,y)$ é a tendência da variável $t(s)$, e $R^*(x,y)$ é a estimativa do resíduo resultante da krigagem. Assim, calcula-se novamente o semivariograma, com os resíduos obtidos deste procedimento, e a designação dos atributos aos quais foi extraída a tendência é #atributo.

Portanto, na interpretação dos mapas de krigagem, para os atributos que apresentaram tendência e indicam na legenda do mapa de krigagem valores variando entre positivos e negativos, devido tais valores serem os resíduos, para que na legenda do mapa de krigagem possam aparecer os valores originais do atributo que se está estudando, efetua-se a interpolação do mapa de krigagem com os valores dos resíduos. Assim, quando é realizado este cálculo pelo programa GS⁺ (2004), é gerado um arquivo Excel, que possui todas as interpolações calculadas para o número de vizinhos estipulado anteriormente.

A partir do número ideal de vizinhos, estipulado pela validação cruzada prévia, pode-se calcular o $R^*(x,y)$. Seguidamente, pode-se calcular a $t^*(x,y)$ pelo uso dos coeficientes adjuntos calculados pela expressão ajustada anteriormente. A partir do conhecimento do $R^*(x,y)$ e da $t^*(x,y)$ podem ser calculados os valores do atributo retrotransformados pelo uso da equação 16. Com isso, retorna-se ao GS⁺ e efetua-se a krigagem com tais valores retrotransformados ($\pounds$ 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 (#ATR). Já quando referidos no mapa de krigagem e/ou cokrigagem ficaram precedidos por $\pounds$ ($\pounds$ ATR).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise descritiva dos dados

4.1.1 Variabilidade dos atributos

4.1.1.1 Atributos da planta

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), classificando-o como baixo ($CV \leq 10\%$), médio ($10\% < CV \leq 20\%$), alto ($20\% < CV \leq 30\%$) e muito alto ($CV > 30\%$). Desta forma, no Quadro 1 está contida a análise descritiva dos atributos pesquisados da planta.

Portanto, a pureza (PUR) e o percentual de fibra (FIB) apresentaram baixa variabilidade nos dados, com coeficiente de variação (CV) de 8,9% e 7,9%, respectivamente (Quadro 1), para esses CVs baixos infere-se: para a PUR, a coleta dos feixes manual e carregamento sem o uso de carregadeiras acarretou em menos impurezas nas amostras, para FIB infere-se ser uma característica varietal e estágio fenológico no momento da colheita. Para a população de plantas por metro quadrado (POP), os açúcares totais recuperáveis (ATR), o percentual de sólidos solúveis totais (BRI) e o percentual de sacarose (POL), a variabilidade verificada foi média, com CVs entre 12,7% e 19,9%. Por outro lado, os CVs da produtividade de colmos por hectare (PRO) e do volume de colmos por hectare (VOL) foram altos, sendo respectivamente de 27,3% e 26,3%. Para a variabilidade nos dados de PRO, houve discordância com aquela relatada por Souza et al. (2010b), que constataram CV médio para esse atributo sob as condições de um Argissolo Vermelho Amarelo, cultivado com cana-de-açúcar a mais de 35 anos.

Quadro 1: Análise descritiva da produtividade e de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente				
			Máximo	Mínimo		Variação (%)	Curtose	Assimetria		
									Pr<w	DF
PRO (t ha ⁻¹)	89,2	90,0	11,2	142,2	24,4	27,3	0,677	-0,401	0,108	NO
VOL (m³ ha ⁻¹)	159,5	155,6	41,5	269,7	41,94	26,3	0,170	0,193	0,403	NO
POP (pl. m ⁻²)	10,5	10,5	5,0	15,9	2,10	19,9	0,486	-0,045	0,306	NO
ATR (kg t ⁻¹)	103,46	104,65	64,20	141,30	17,23	16,7	-0,691	-0,302	0,012	TN
BRI (%)	15,25	15,63	10,60	19,85	1,93	12,7	-0,527	-0,224	0,087	NO
POL (%)	10,1	10,2	5,3	14,4	1,99	19,8	-0,632	-0,339	0,018	TN
PUR (%)	78,7	79,3	60,4	91,8	6,96	8,9	-0,243	-0,608	0,002	ND
FIB (%)	12,6	12,6	10,3	15,8	1,00	7,9	0,834	0,378	0,066	NO

^(a) PRO, VOL, POP, ATR, BRI, POL, PUR e FIB são, respectivamente, a produtividade de colmos por hectare, volume de colmos por hectare, população de plantas por metro quadrado, açúcares totais recuperáveis, percentual de sólidos solúveis totais, percentual de sacarose, pureza e percentual de fibra; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, TN e ND, respectivamente, do tipo normal, tendendo à normal e não determinada.

4.1.1.2 Atributos do solo

Analisando os Quadros 2 e 3, onde constam a análise descritiva dos atributos físico-químicos do solo nas profundidades de 0 - 0,20 m e 0,20 - 0,40 m, verifica-se que a variabilidade nos dados de pH1 e pH2 foi baixa, com CVs de 7,9% e 7,8%, respectivamente. Já a UG1, UG2, P1, MO1, H+Al1, T1, T2 e V%1 apresentaram média variabilidade nos dados, com CVs oscilando entre 11,1% a 19,5%. Alta variabilidade para os atributos Ca/T1, RP2, P2, MO2, H+Al2, V%2, Ca/T2 e Mg/T2, com os CVs ficando entre 20,3% a 29,6%, e muito alta, com CVs variando entre 30,4% a 189,2%, para RP1, K1, Ca1, Mg1, Al1, S1, m%1, K/T1, Mg/T1, K2, Ca2, Mg2, Al2, S2, m%2 e K/T2.

No geral, os dados apresentaram variabilidades semelhantes aos de Souza et al. (2006), Souza et al. (2007b) e Carvalho et al. (2008). A elevada variabilidade dos dados de Al e m% foi devido à elevada frequência observada de valores nulos. Por se tratar de uma área cultivada, existem outras fontes de variabilidade no solo devidas ao manejo agrícola, como o cultivo em linhas e a consequente aplicação localizada de fertilizantes, conforme já havia sido relatado por Souza et al. (2004b). Por outro lado, sabe-se que a variabilidade nos atributos físico-químicos do solo são conseqüências também de complexas interações dos fatores e processos de sua formação, com impacto principalmente nas camadas superficiais do solo (CORÁ, 1997; HOERBE, 2009).

O conhecimento da variação de atributos físico-químicos é importante para o manejo do solo, planejamento de esquemas de amostragem e gerenciamento de práticas agrícolas.

4.1.2 Distribuição de frequência dos atributos

4.1.2.1 Atributos da planta

Para os atributos estudados PRO, VOL, POP, BRI e FIB, a distribuição de frequência foi do tipo normal (Quadro 1). Seus coeficientes de assimetria positiva ficaram entre 0,193 (VOL) e 0,378 (FIB) e a negativa entre -0,401 (PRO) e -0,045 (POP). Para os coeficientes de curtose positiva os valores ficaram entre 0,170 (VOL) e 0,834 (FIB), e a negativa foi de -0,527 (BRI). Desta forma, todos os atributos analisados foram significativos pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que seus valores oscilaram entre 0,066 e 0,403.

Quadro 2: Análise descritiva de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente				
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
RP1 (MPa)	1,066	1,092	0,349	1,907	0,324	30,4	-0,335	0,132	0,664	NO
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,114	0,115	0,074	0,143	0,014	12,2	-0,031	-0,252	0,652	NO
P1 (mg dm ⁻³)	4,3	4,0	3,0	7,0	0,80	18,7	0,032	0,091	10 ⁻⁴	ND
MO1 (g dm ⁻³)	15,5	15,0	10,0	23,0	2,87	18,5	0,003	0,212	0,012	TN
pH1	5,1	5,1	4,3	6,3	0,40	7,9	0,221	0,345	0,015	TL
K1 (mmol _c dm ⁻³)	1,42	1,25	0,20	3,80	0,81	57,1	-0,065	-0,287	0,256	LN
Ca1 (mmol _c dm ⁻³)	13,9	13,0	6,0	33,0	5,32	38,4	-0,082	0,395	0,073	LN
Mg1 (mmol _c dm ⁻³)	7,3	7,0	1,0	18,0	3,26	44,4	0,651	0,815	2.10 ⁻⁴	ND
H+Al1 (mmol _c dm ⁻³)	16,6	16,0	9,0	25,0	2,91	17,6	0,028	-0,127	0,036	TN
Al1 (mmol _c dm ⁻³)	0,7	0	0	5,0	1,05	161,6	3,244	1,807	10 ⁻⁴	ND
S1 (mmol _c dm ⁻³)	22,62	21,00	10,00	51,00	8,37	37,0	-0,293	0,378	0,117	LN
T1 (mmol _c dm ⁻³)	39,20	37,85	27,70	62,80	7,15	18,2	0,243	0,581	0,012	TL
V%1 (%)	56,2	55,0	33,0	84,0	10,93	19,5	-0,393	0,006	0,255	LN
m%1 (%)	3,8	0	0	30,0	6,33	166,6	4,444	2,021	10 ⁻⁴	ND
K/T1 (%)	3,6	3,4	0,5	10,3	1,81	50,7	0,530	-0,557	0,073	LN
Ca/T1 (%)	34,5	33,8	18,5	54,8	7,59	22,0	-0,139	0,052	0,428	LN
Mg/T1 (%)	18,1	18,4	3,5	32,4	5,56	30,7	0,082	0,058	0,966	NO

^(a) RP1, UG1, P1, MO1, pH1, K1, Ca1, Mg1, H+Al1, Al1, S1, T1, V%1, m%1, K/T1, Ca/T1 e Mg/T1 são, respectivamente, a resistência do solo à penetração, umidade gravimétrica, fósforo, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, potássio, cálcio, magnésio, acidez potencial, alumínio trocável, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases, saturação por alumínio, relação potássio capacidade de troca catiônica, relação cálcio capacidade de troca catiônica e relação magnésio capacidade de troca catiônica, analisados na camada 0-0,20 m; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, LN, TN, TL e ND, respectivamente, do tipo normal, lognormal, tendendo à normal, tendendo à lognormal e não determinada.

Quadro 3: Análise descritiva de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente				
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
RP2 (MPa)	1,629	1,543	0,746	2,857	0,428	26,3	-0,049	-0,030	0,109	LN
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,114	0,113	0,086	0,147	0,013	11,1	0,268	0,437	0,044	TN
P2 (mg dm ⁻³)	4,1	4,0	3,0	8,0	0,95	23,2	2,349	1,123	10 ⁻⁴	ND
MO2 (g dm ⁻³)	14,4	14,0	7,0	23,0	3,00	20,9	0,126	-0,241	0,013	TL
pH2	5,2	5,1	4,4	6,3	0,40	7,8	0,066	0,488	0,019	TN
K2 (mmol _c dm ⁻³)	0,91	0,75	0,20	2,6	0,51	55,9	-0,001	0,145	0,041	TL
Ca2 (mmol _c dm ⁻³)	12,5	12,0	5,0	25,0	4,17	33,3	0,165	-0,187	0,076	LN
Mg2 (mmol _c dm ⁻³)	7,6	7,0	2,0	16,0	2,77	36,5	0,436	0,772	10 ⁻⁴	ND
H+Al2 (mmol _c dm ⁻³)	16,4	16,0	9,0	28,0	3,44	21,0	0,657	-0,143	0,012	TL
Al2 (mmol _c dm ⁻³)	0,7	0	0	5,0	1,17	177,8	2,818	1,881	10 ⁻⁴	ND
S2 (mmol _c dm ⁻³)	21,13	19,65	8,20	43,50	6,84	32,4	0,482	-0,021	0,379	LN
T2 (mmol _c dm ⁻³)	37,57	36,65	25,20	53,40	5,79	15,4	-0,042	0,290	0,208	LN
V%2 (%)	55,7	55,0	29,0	85,0	11,27	20,3	0,063	0,244	0,208	NO
m%2 (%)	3,9	0	0	35,0	7,41	189,2	4,686	2,232	10 ⁻⁴	ND
K/T2 (%)	2,4	2,0	1,0	7,0	1,37	56,5	-0,160	0,191	0,528	LN
Ca/T2 (%)	33,0	32,0	15,0	54,0	7,61	23,1	0,200	0,315	0,117	NO
Mg/T2 (%)	20,1	19,0	3,0	36,0	5,95	29,6	0,155	0,089	0,096	NO

^(a) RP2, UG2, P2, MO2, pH2, K2, Ca2, Mg2, H+Al2, Al2, S2, T2, V%2, m%2, K/T2, Ca/T2 e Mg/T2 são, respectivamente, a resistência mecânica à penetração, umidade gravimétrica, fósforo, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, potássio, cálcio, magnésio, acidez potencial, alumínio trocável, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases, saturação por alumínio, relação potássio capacidade de troca catiônica, relação cálcio capacidade de troca catiônica e relação magnésio capacidade de troca catiônica, analisados na camada 0,20-0,40 m; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO, LN, TN, TL e ND, respectivamente, do tipo normal, lognormal, tendendo à normal, tendendo à lognormal e não determinada.

4.1.2.2 Atributos do solo

Somente os atributos RP1, UG1, Mg/T1, V%2, Ca/T2 e Mg/T2 apresentaram distribuição de frequência do tipo normal (Quadros 2 e 3), com coeficientes de assimetria negativa de -0,252 (UG1) e positiva entre 0,058 (Mg/T1) e 0,315 (Ca/T2). Os coeficientes de curtose ficaram entre -0,335 (RP1) e 0,200 (Ca/T2), sendo esses coeficientes significativos pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965), uma vez que os valores de probabilidade observados ficaram entre 0,096 (Mg/T2) e 0,996 (Mg/T1).

Para os demais atributos físico-químicos (Quadros 2 e 3), as distribuições de frequência foram do tipo não determinada (P1, Mg1, Al1, m%1, P2, Mg2 e m%2), tendendo a normal (MO1, H+Al1, UG2 e pH2), tendendo a lognormal (pH1, T1, MO2, K2, H+Al2) e lognormal (K1, Ca1, S1, V%1, K/T1, Ca/T1, RP2, Ca2, S2, T2 e K/T2).

4.1.3 Valores médios dos atributos

4.1.3.1 Atributos da planta

A produtividade média de colmos por hectare (PRO) foi de 89,2 t ha⁻¹ (Quadro 1), ficando de acordo com a produtividade média brasileira (UNICA, 2009), porém por se tratar de uma cana bisada pode-se deduzir que sua produtividade foi baixa visto que, para um mesmo ambiente de produção da local pesquisado, no mesmo período foram observadas produtividades para cana bisada superiores a 150 t/ha. Entretanto, foi 13,5% superior a produtividade obtida por Souza et al. (2008a) e inferior a de Watanabe et al. (2004), que relataram valor médio de 100 t ha⁻¹ para cana de terceiro corte num Latossolo Vermelho distroférico, com a variedade RB 85-5536. O VOL apresentou média de 159,5 m³ ha⁻¹ para uma população de 10,5 pl. m⁻², quando a população ideal para o espaçamento utilizado deveria ser de pelo menos 14,0 pl. m⁻², fator que deve ter influenciado a evidente queda da PRO.

Em relação aos atributos tecnológicos BRI, POL e PUR puderam ser observados respectivamente valores de médios de 15,25%; 10,1% e 79,3%. Esses valores são considerados baixos tendo em vista que a cana-de-açúcar era bisada. Portanto, provavelmente houve a inversão da sacarose e o consumo dos açúcares redutores para a retomada do crescimento vegetativo, resultando em baixos valores desses atributos, componentes para a obtenção do ATR. Dessa forma, pode-se observar que o valor do ATR de 103,46 kg ha⁻¹ ficou

abaixo do valor mínimo tido como referência ($121,97 \text{ kg ha}^{-1}$) pelo Consecana (2003). Para o valor do FIB (12,6%), tal valor ficou adequado aos padrões UNICA (2009).

4.1.3.2 Atributos do solo

Em relação aos atributos do solo, verificou-se que a RP apresentou aumento dos valores médios em profundidade (Quadros 2 e 3), de $1,066 \text{ MPa}$ (RP1) para $1,543 \text{ MPa}$ (RP2), valores esses moderados, entre $1,0 \leq \text{RP} < 2,0 \text{ MPa}$, conforme Arshad et al. (1996).

Uma vez que a microporosidade média desse solo é de $0,306 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e a densidade média de $1,565 \text{ kg dm}^{-3}$ (ALVES et al., 2009) e, no momento da avaliação da RP a UG média das duas profundidades foi de $0,114 \text{ kg kg}^{-1}$, isso resultou na umidade volumétrica de $0,178 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Como esse valor ($0,178 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) representou 58,2% da microporosidade total ($0,306 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), pôde-se confirmar que os dados de RP foram coletados num teor de água ideal do solo, que é de $2/3$ da microporosidade total e que, portanto, seus valores podem perfeitamente ser comparados aos da literatura. Dados observados para a RP (Souza et al., 2006), constatados num Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa, foram altos ($2,0 \leq \text{RP} < 4,0 \text{ MPa}$), com conteúdo de água no solo no momento da realização da leitura em torno de $0,200 \text{ kg kg}^{-1}$.

Em relação aos atributos químicos do solo, os que apresentaram redução de teores em profundidade foram a MO, K, Ca, S, T, K/T e Mg/T (Quadros 2 e 3). Costa et al. (2007) também verificaram reduções dos valores de K, Ca e Mg em profundidade, ocorridas em função de que o efeito da calagem é menos intenso em profundidade. Portanto, há menores teores de bases trocáveis nessas regiões. Por outro lado, os atributos químicos que apresentaram elevação de valores em profundidade foram o pH e o Mg/T, ficando os demais atributos (P, Mg, H+Al, Al, V% e m%) com valores praticamente inalterados quando consideradas ambas as camadas de solo pesquisadas.

Quando considerados os limites de interpretação dos principais atributos químicos do solo propostos por Raij et al. (1997), nota-se que estes estavam em teores muito baixos (P1, P2 e K2), baixos (MO1, MO2 e K1), médios (Mg1, Mg2, V%1 e V%2) e altos (Ca1 e Ca2), conforme os Quadros 2 e 3. Para a MO, os teores observados neste estudo estão de acordo com aqueles constatados por Souza et al. (2010a), que pesquisaram os atributos de um Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa, cultivado com cana-de-açúcar a mais de trinta anos, sob manejo convencional, por ocasião do quinto corte.

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

Estão apresentadas, nos Quadros 4, 5 e 6, as matrizes de correlação linear de Pearson entre os atributos da cultura da cana-de-açúcar (PRO, VOL, POP, ATR, BRI, POL e PUR) e os atributos físico-químicos do solo (RP, UG, P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, Al, S, T, V%, m%, K/T, Ca/T e Mg/T).

4.2.1.1.1 Atributos da planta *versus* atributos da planta

Dentre as correlações dos atributos da planta (Quadro 4), foram significativos os pares PRO x VOL ($r = 0,31^{**}$), PRO x POP ($r = 0,43^{**}$), VOL x POP ($r = 0,73^{**}$), VOL x ATR ($r = -0,18^{**}$), VOL x POL ($r = -0,19^{**}$), VOL x PUR ($r = -0,24^{**}$), ATR x BRI ($r = 0,92^{**}$), ATR x POL ($r = 0,99^{**}$), ATR x PUR ($r = 0,84^{**}$), BRI x POL ($r = 0,90^{**}$), BRI x PUR ($r = 0,67^{**}$) e POL x PUR ($r = 0,86^{**}$). Portanto, ficou evidenciado que o POP foi o componente da produção que proporcionou o maior incremento da PRO. Sabe-se que o número de indivíduos é fator determinante para definir a melhor produtividade da cultura em questão. Assim, a população ideal, segundo Silva (2008), está em torno de 10 a 12 plantas por metro linear de plantio.

4.2.1.1.2 Atributos da planta *versus* atributos do solo

Considerando os atributos do solo (Quadros 5 e 6), a PRO firmou correlações positivas e significativas com a RP1 ($r = 0,18^{*}$), a MO1 ($r = 0,24^{**}$) e a UG2 ($r = 0,24^{**}$). Esses se assemelharam com os obtidos por Souza et al. (2008a). A PRO x RP1 apresentou uma correlação linear significativa e positiva, distinta dos autores citados, que encontraram uma correlação negativa em um Latossolo Vermelho-Amarelo. Para os demais atributos do solo, a PRO apresentou correlação baixa e não significativa, estando de acordo com Souza et al. (2010b).

Já em relação aos outros atributos da planta, foi constatada correlação significativa entre VOL x K1 ($r = 0,27^{**}$), VOL x T1 ($r = 0,18^{*}$), VOL x K/T1 ($r = 0,23^{**}$) e VOL x T2 ($r = 0,19^{**}$).

Quadro 4: Matriz de correlação dos atributos da produtividade e de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)						
	PRO	VOL	POP	ATR	BRI	POL	PUR
VOL	0,31**						
POP	0,43**	0,73**					
ATR	0,15	-0,18**	-0,12				
BRI	0,12	-0,10	-0,07	0,92**			
POL	0,15	-0,19**	-0,13	0,99**	0,90**		
PUR	0,16	-0,24**	-0,16	0,84**	0,67**	0,86**	
FIB	-0,03	0,10	0,04	-0,02	0,06	-0,01	-0,01

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

Quadro 5: Matriz de correlação entre atributos da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade 0-0,20 m

Atributos ^(a)		Atributos/coeficiente de correlação ^(b)																							
		PRO	VOL	POP	ATR	BRI	POL	PUR	FIB	RP1	UG1	P1	MO1	pH1	K1	Ca1	Mg1	H+Al1	Al1	S1	T1	V%1	m%1	K/T1	Ca/T1
RP1	0,18*	-0,07	-0,10	0,13	0,10	0,13	0,12	0,03																	
UG1	0,17	-0,06	0,09	0,05	0,05	0,05	0,08	0,06	-0,05																
P1	0,03	0,08	0,19**	-0,09	0,02	0,10	0,09	0,02	0,22**	0,07															
MO1	0,24**	0,16	0,25**	-0,13	0,10	0,13	0,12	0,04	0,26**	0,12	0,58**														
pH1	-0,01	0,15	0,02	0,03	0,07	0,03	0,03	0,07	0,01	-0,01	0,03	0,21**													
K1	0,07	0,27**	0,36**	-0,13	0,07	0,13	0,11	0,01	0,28**	0,31**	0,16	0,18*	0,09												
Ca1	-0,05	0,17	0,11	-0,01	0,07	0,02	0,04	0,04	-0,16	0,01	0,13	0,06	0,80**	0,27**											
Mg1	-0,04	0,11	0,07	-0,03	0,03	0,03	0	0,03	-0,16	0,08	0,20**	0,08	0,76**	0,21**	0,78**										
HAl1	0,03	-0,07	0,11	-0,06	0,07	0,06	0,07	0,01	-0,14	0,09	0,19**	0,42**	0,84**	0,12	0,58**	0,53**									
Al1	-0,06	-0,14	-0,05	0,12	0,10	0,12	0,11	0	0,09	-0,01	0,19**	0,01	0,71**	-0,02	0,51**	0,57**	0,56**								
S1	-0,04	0,18	0,14	-0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,19**	0,07	0,17	0,09	0,82**	0,35**	0,96**	0,90**	0,56**	0,55**	0,94**						
T1	-0,04	0,18*	0,20**	-0,05	0	0,06	0,07	0,04	0,28**	0,12	0,28**	0,28**	0,61**	0,46**	0,89**	0,85**	0,25**	0,41**	-	0,93**	0,77**				
V%1	-0,02	0,16	0,06	-0,02	0	0,03	0,02	0	-0,10	0,01	0,11	-0,04	0,93**	0,21**	0,90**	0,87**	0,78**	0,70**	0,93**	0,56**	0,44**	-	0,70**		
m%1	-0,05	-0,14	-0,06	0,15	0,12	0,15	0,13	0,02	0,13	0	0,21**	-0,02	0,70**	-0,06	0,52**	0,58**	0,52**	0,99**	0,56**	0,15	0,15	-0,05	0,10		
K/T1	0,06	0,23**	0,31	-0,12	0,09	0,12	0,09	0	0,22**	0,29**	0,07	0,09	-0,13	0,94	-0,03	-0,05	0,23**	0,14	0,05	0,15	0,15	0,15	0,10		
CaT1	-0,03	0,14	0,03	0,02	0,08	0,01	0,02	0,01	-0,04	-0,09	0,02	-0,07	0,84**	0,04	0,91**	0,58**	0,75**	0,58**	0,81**	0,64**	0,88**	-	0,58**	0,20**	
MgT1	-0,02	0,06	-0,02	-0,03	0,07	0,03	0,02	0,01	-0,07	0,05	0,16	-0,01	0,73**	0,04	0,55**	0,92**	0,58**	0,62**	0,71**	0,60**	0,78**	-	0,62**	-0,15	0,43**

^(a) Vide Quadros 1 e 2; ^(b) ** significativo a 1%; * significativo a 5%.

Quadro 6: Matriz de correlação entre atributos da cana-de-açúcar e atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade 0,20-0,40 m

Atributos (a)		Atributos/coeficiente de correlação (b)																							
		PRO	VOL	POP	ATR	BRI	POL	PUR	FIB	RP2	UG2	P2	MO2	pH2	K2	Ca2	Mg2	H+Al2	Al2	S2	T2	V%2	m%2	K/T2	Ca/T2
RP2	0,04	0,07	0,08	0,13	0,15	0,13	0,07	0,02																	
UG2	0,24**	0,06	0,18	0,01	0,04	0	-0,04	0,02	0,01																
P2	-0,05	-0,01	0,15	-0,04	-0,01	-0,05	-0,08	-0,01	-0,13	0,09															
MO2	0	0,08	0,20**	-0,08	-0,08	-0,09	-0,13	-0,04	-0,27**	0,14	0,66**														
pH2	-0,05	0,05	0,01	-0,05	-0,04	-0,05	-0,02	-0,07	-0,08	-0,05	0,02	-0,05													
K2	0,08	0,17	0,26**	-0,14	-0,08	-0,14	-0,15	0,05	0,06	0,30**	0,19**	0,20**	-0,11												
Ca2	0,02	0,11	0,13	0	0,01	-0,01	-0,04	-0,07	-0,07	0,05	0,16	0,15	0,76**	0,15	0,71**										
Mg2	-0,04	0,11	0,12	-0,10	-0,09	-0,10	-0,05	-0,02	-0,06	0,06	0,19**	0,15	0,74**	0,07	0,71**	-0,50**	-0,53**								
H+Al2	0	0,05	0,18*	-0,01	0,01	-0,01	-0,08	0,16	0,05	0,12	0,17	0,36**	-0,81**	0,26**	-0,50**	-0,53**									
Al2	-0,07	0,02	0,04	0,14	0,18	0,14	0,08	0,22**	0,09	0,01	-0,08	-0,09	-0,70**	0,11	-0,54**	-0,52**	0,60**								
S2	0,01	0,12	0,15	-0,06	-0,05	-0,07	-0,06	-0,02	-0,07	0,08	0,18*	0,15	0,80**	0,17	0,95**	0,86**	-0,53**	-0,54**							
T2	0	0,19**	0,29**	-0,09	-0,06	-0,09	-0,13	0,07	-0,06	0,15	0,33**	0,41**	0,50**	0,36**	0,83**	0,70**	-0,05	-0,29**	0,87**						
V%2	-0,04	0,07	0,01	-0,08	-0,08	-0,08	-0,04	-0,10	-0,08	-0,03	0,09	0,01	0,95**	0	0,84**	0,79**	-0,80**	-0,69**	0,87**	0,59**					
m%2	-0,05	0	0,04	0,17	0,20**	0,17	0,10	0,18*	0,09	0	-0,10	-0,13	-0,68**	0,05	-0,56**	-0,53**	0,54**	0,98**	-0,56**	-0,35**	-0,70**				
K/T2	0,10	0,13	0,23**	-0,05	-0,01	-0,05	-0,05	0,07	0,13	0,21**	0,05	0,01	-0,16	0,78**	0,04	0,02	0,24**	0,16	0,10	0,24**	-0,07	0,12			
Ca/T2	-0,02	0,05	-0,01	0,03	0,03	0,03	0	-0,16	-0,08	-0,08	0,05	0,01	0,83**	-0,05	0,87**	0,53**	-0,71**	-0,65**	0,75**	0,49**	0,88**	-0,65**	-0,15		
Mg/T2	-0,09	0,04	-0,02	-0,16	-0,17	-0,15	-0,05	0,01	-0,07	-0,02	0,12	0,03	0,79**	-0,14	0,49**	0,83**	-0,67**	-0,53**	0,68**	0,44**	0,79**	-0,52**	-0,18*	0,44**	

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

Essas correlações estão relacionadas entre si, pois o K faz parte da T e a relação K/T1 atesta a importância deste nutriente, para a cana-de-açúcar, em aumentar seu volume de colmos. Como podem ser observadas, tais correlações apresentaram comportamento direto, indicando que com o aumento dos teores dos nutrientes principalmente no solo (causa), haverá um incremento do volume de colmos produzidos (efeito).

As demais correlações apresentaram o mesmo comportamento: POP x P1 ($r = 0,19^{**}$), POP x MO1 ($r = 0,25^{**}$), POP x K1 ($r = 0,36^{**}$), POP x T1 ($r = 0,20^{**}$), POP x MO2 ($r = 0,20^{**}$), POP x K2 ($r = 0,26^{**}$), POP x H+Al2 ($r = 0,18^{*}$), POP x T2 ($r = 0,29^{**}$), POP x K/T2 ($r = 0,23^{**}$), BRI x m%2 ($r = 0,20^{**}$), FIB x Al2 ($r = 0,22^{**}$) e FIB x m%2 ($r = 0,18^{*}$) (Quadros 5 e 6).

4.2.1.1.3 Atributos do solo *versus* atributos do solo

Dentre as correlações significativas entre os atributos do solo (Quadros 5 e 6), as principais foram da RP1 x MO1 ($r = -0,26^{**}$), RP1 x T1 ($r = -0,28^{**}$), P1 x MO1 ($r = 0,58^{**}$), MO1 x pH1 ($r = -0,21^{**}$), MO1 x K1 ($r = 0,18^{*}$), MO1 x T1 ($r = 0,28^{**}$), pH1 x Ca1 ($r = 0,80^{**}$), pH1 x Mg1 ($r = 0,76^{**}$), pH1 x H+Al1 ($r = -0,84^{**}$), pH1 x T1 ($r = 0,61^{**}$), RP2 x MO2 ($r = -0,27^{**}$), P2 x MO2 ($r = 0,66^{**}$), MO2 x K2 ($r = 0,20^{**}$), MO2 x T2 ($r = 0,41^{**}$), pH2 x Ca2 ($r = 0,76^{**}$), pH2 x Mg2 ($r = 0,74^{**}$), pH1 x H+Al1 ($r = -0,81^{**}$) e pH1 x T1 ($r = 0,50^{**}$).

Para a correlação linear simples entre RP1 e MO1, e entre RP2 e MO2, observaram-se correlações negativas e altamente significativas, dados esses corroborados por Souza et al. (2008a), que constataram correlação negativa entre a RP e a MO, levando-se a inferir que o aumento da MO no perfil do solo reduz a RP. Em contrapartida, outras correlações também indicaram que com o aumento da MO ocorreu elevação dos teores de K e de P do solo (Quadros 5 e 6), uma vez que a MO é fonte de nutrientes e eleva a T do solo, concordando, dessa forma, com Montezano et al. (2006), que verificaram correlação significativa entre MO x T ($r = 0,88^{**}$), e Almeida Júnior (2010) que obteve correlação direta entre MO x K ($r = 0,59^{**}$).

As correlações diretas entre o pH e as bases trocáveis do solo indicaram que com a elevação do pH houve maior disponibilidade dessas bases no complexo de troca do solo. Contudo, as correlações inversas com a H+Al sugeriram que com o aumento do pH houve uma diminuição da H+Al, do Al e, por consequência, da m% (Quadros 5 e 6), sendo o inverso verdadeiro. Pode-se inferir que a diminuição da H+Al e do Al pode ter sido fortemente

influenciada pela calagem realizada no preparo da área antes da implantação da cultura. Montezano et al. (2006) também descreveram correlações positivas entre pH x Ca ($r = 0,35^{**}$), pH x Mg ($r = 0,53^{**}$), pH x S ($r = 0,44^{**}$), pH x V% ($r = 0,75^{**}$), e inversa entre pH x H+Al ($r = -0,57^{**}$). A correlação inversa obtida entre pH x Al é amplamente discutida em literaturas específicas, uma vez que o cátion Al compete e tem preferência, em função de sua trivalência, pelo sítio de adsorção nas cargas negativas dos colóides minerais e/ou orgânicos em relação a outros cátions como o K^+ , o Ca^{+2} e o Mg^{+2} , o que pode ser verificado pelas correlações obtidas neste trabalho entre tais elementos.

Em relação às bases trocáveis K1, Ca1 e Mg1, estas se correlacionaram diretamente com a S1, com a T1 e com a V%1 (Quadros 5 e 6), o que era esperado, pois o aumento das bases trocáveis tende a elevar a S, a T e a V% pela estreita relação de dependência co-existente. No entanto, o K2 não se correlacionou significativamente com S2 e V%2 tendo como causa os baixos valores obtidos para esse elemento. Santos et al. (2010) também relataram correlações positivas e significativas entre Ca x T ($r = 0,82^*$), Mg x T ($r = 0,55^*$), Ca x V% ($r = 0,40^*$) e Mg x V% ($r = 0,50^*$), corroborado no presente este estudo.

4.2.1.2 Regressão linear simples entre os atributos

No âmbito das regressões entre os atributos da planta, foi constatada relação linear entre o VOL e a POP (Figura 5c; $r = 0,728^{**}$), quadrática entre a PRO e o VOL (Figura 5a; $R^2 = 0,134^{**}$), PRO e a POP (Figura 5b; $R^2 = 0,210^{**}$) e uma relação potencial entre o ATR e o VOL (Figura 4a; $r = 0,196^*$), POL e o VOL (Figura 4b; $r = 0,199^*$) e a PUR e o VOL (Figura 4c; $r = 0,256^{**}$). Considerando-se os atributos da planta e os atributos físico-químicos do solo, relações lineares foram obtidas entre a PRO e a MO1 (Figura 6b; $r = 0,236^{**}$), POP e o P1 (Figura 6c; $r = 0,191^*$), POP e a MO1 (Figura 7a; $r = 0,250^{**}$), POP e o K1 (Figura 7b; $r = 0,357^{**}$), POP e a MO2 (Figura 8b; $r = 0,197^*$), POP e o K2 (Figura 8c; $r = 0,258^{**}$), FIB e o Al2 (Figura 9b; $r = 0,218^*$), FIB e a m%2 (Figura 9c; $r = 0,182^*$), quadrática entre a POP e a H+Al2 (Figura 9a; $R^2 = 0,079^{**}$), potencial entre a PRO e a RP1 (Figura 6a; $r = 0,212^*$) e por fim relação exponencial entre a PRO e a UG2 (Figura 8a; $r = 0,237^{**}$). As duas últimas correlações (PRO x RP1 e PRO x UG2) podem ser explicadas, da seguinte maneira: a RP1 se apresentou de forma moderada, que por sua vez provavelmente aumentou/beneficiou o contato solo-raiz, por isso sua correlação positiva; no caso da UG2 a correlação foi positiva levando-se a inferir que houve benefício da absorção de nutrientes localizados na solução do solo.

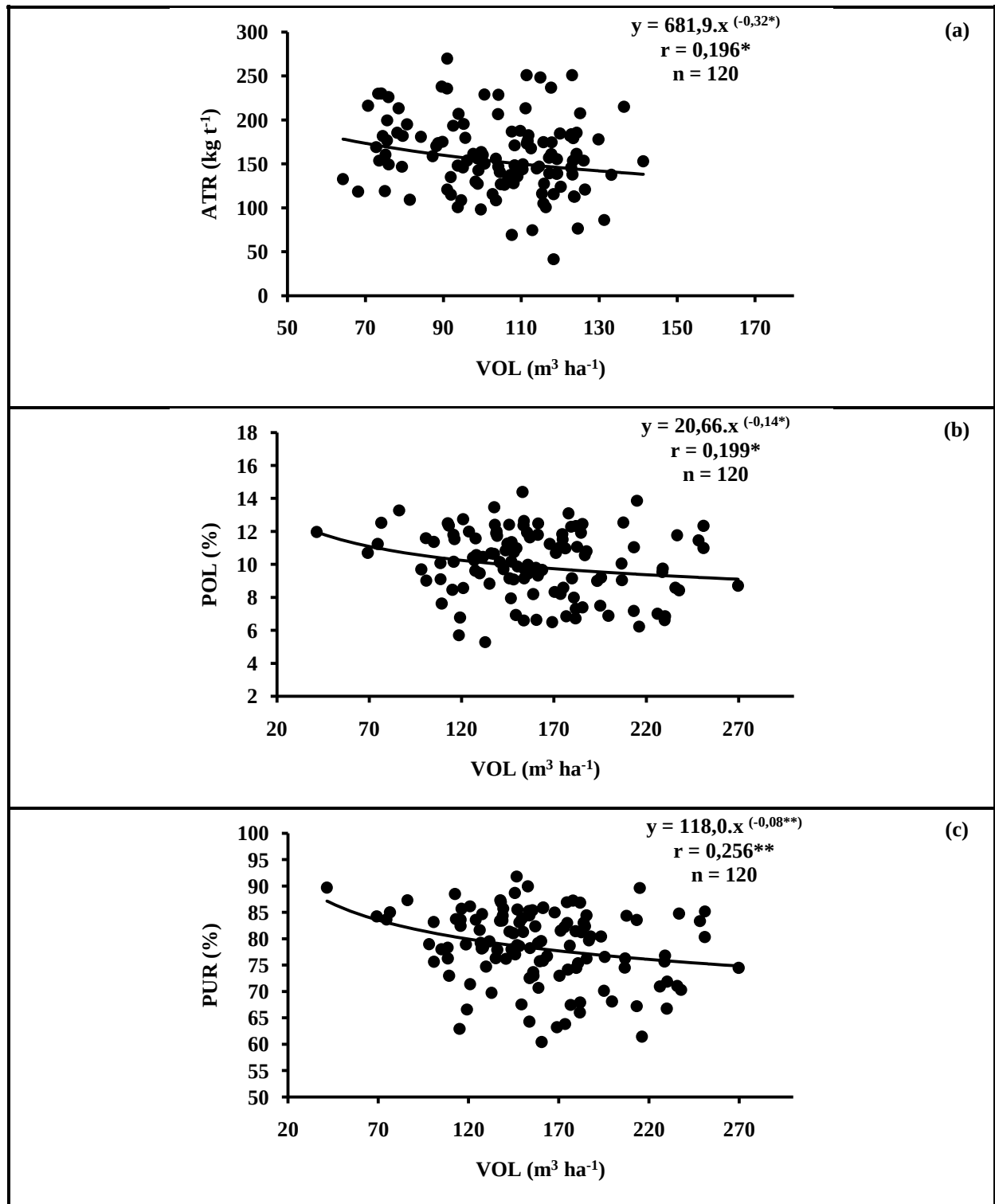


Figura 4: Equações de regressão entre atributos da cana-de-açúcar (VOL, ATR, POL e PUR) em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)

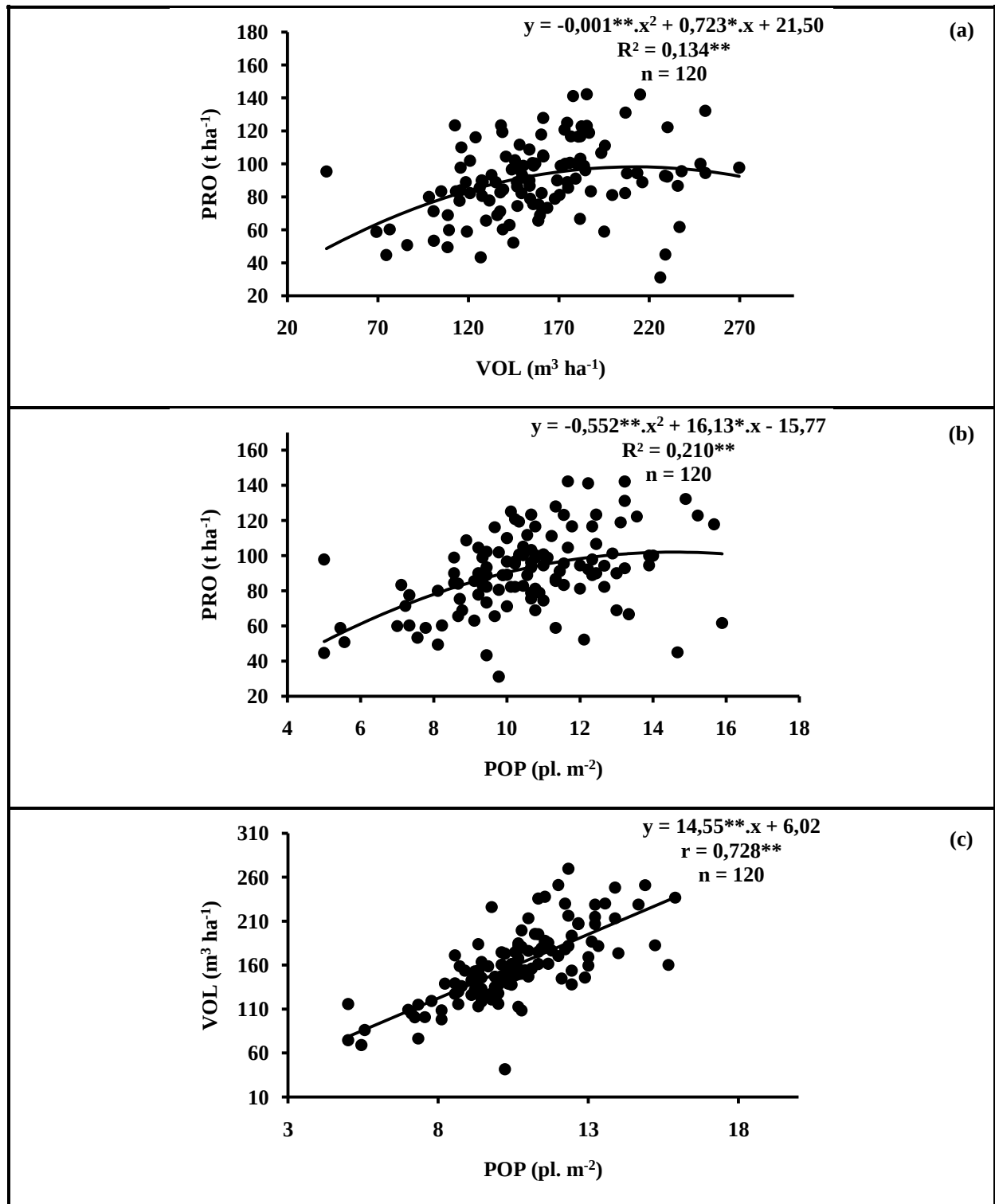


Figura 5: Equações de regressão entre atributos da cana-de-açúcar (PRO, VOL e POP) em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

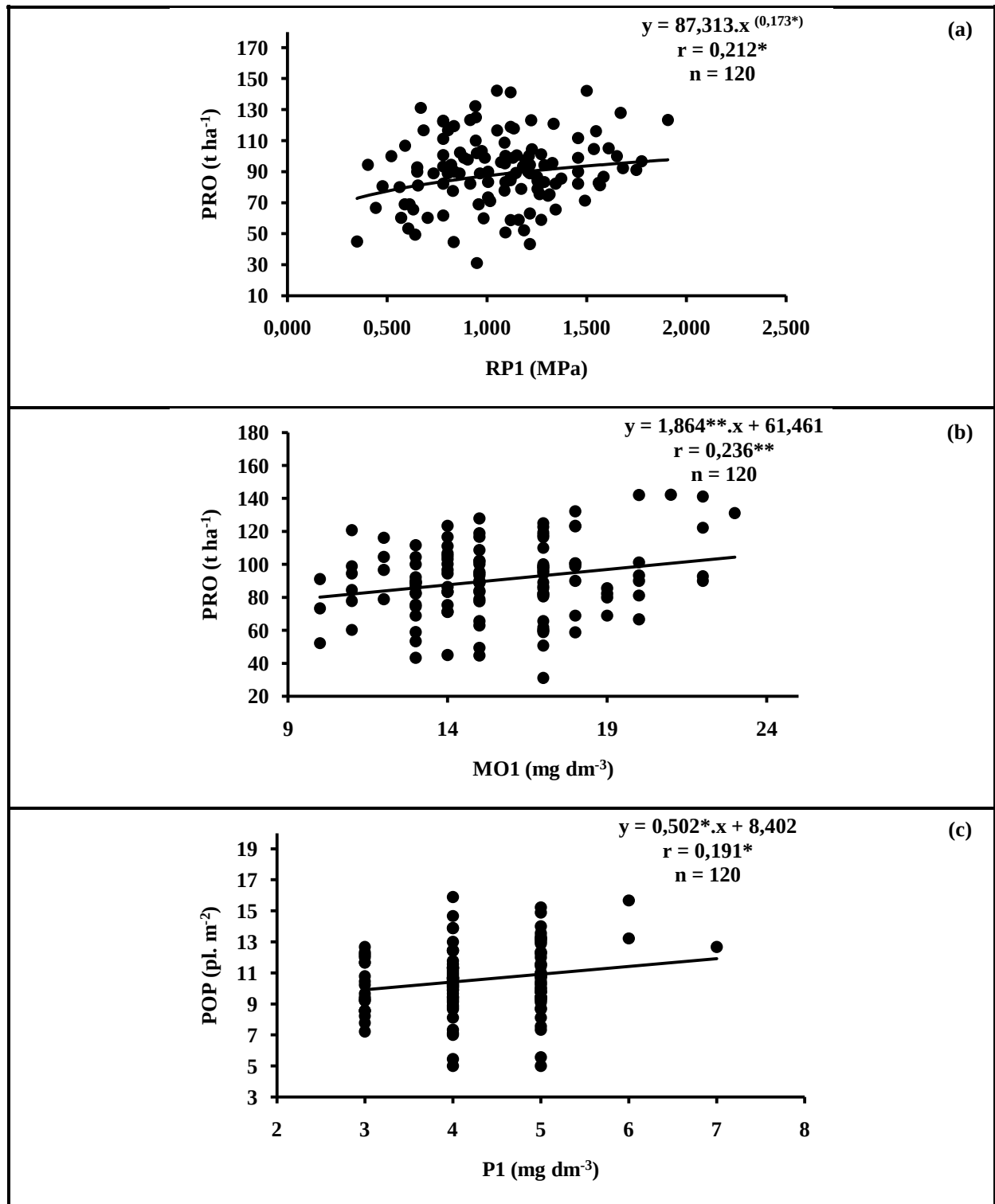


Figura 6: Equações de regressão de atributos da cana-de-açúcar em função de atributos físico-químicos (0-0,20 m) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

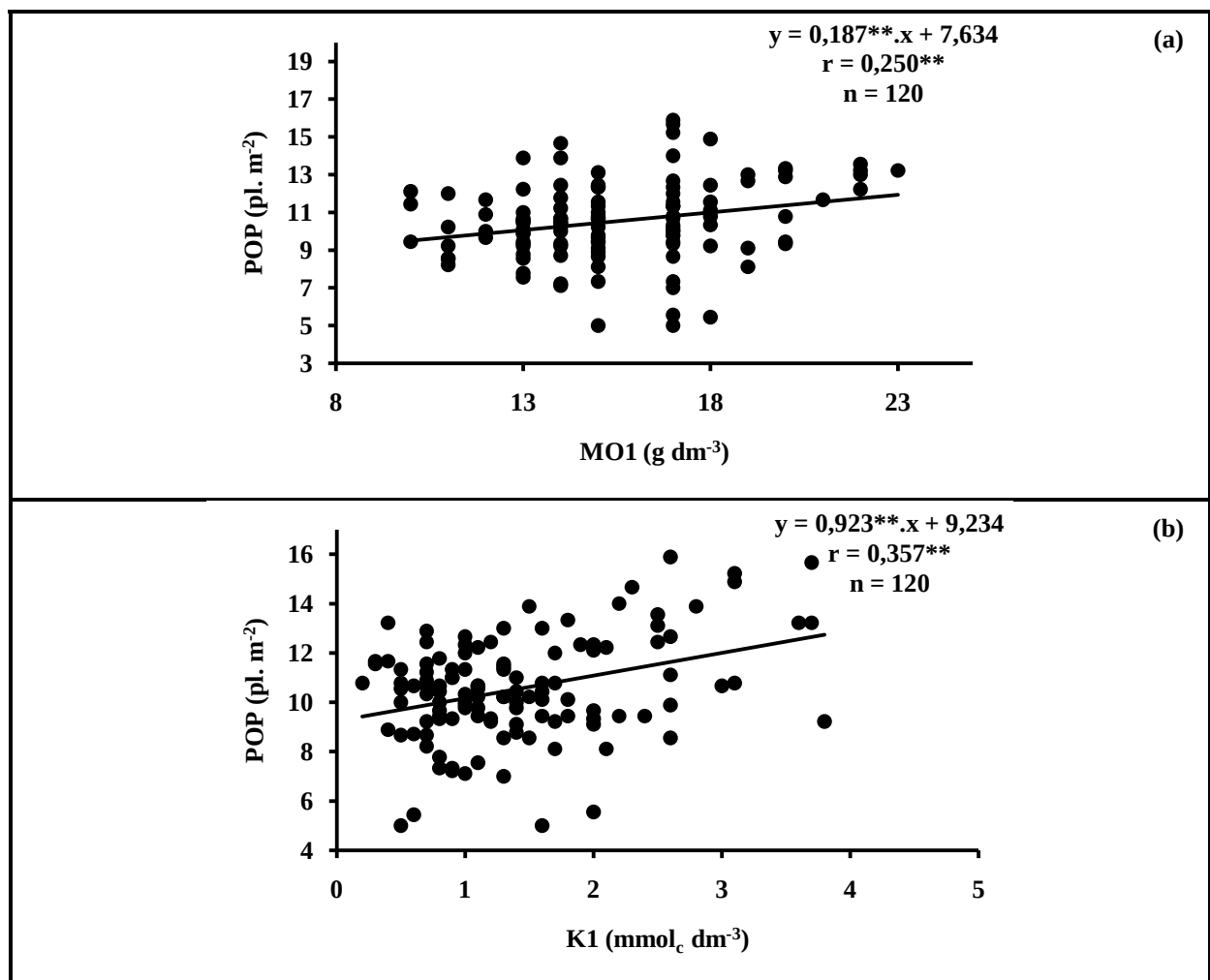


Figura 7: Equações de regressão da população de plantas da cana-de-açúcar em função de atributos químicos (0-0,20 m) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)

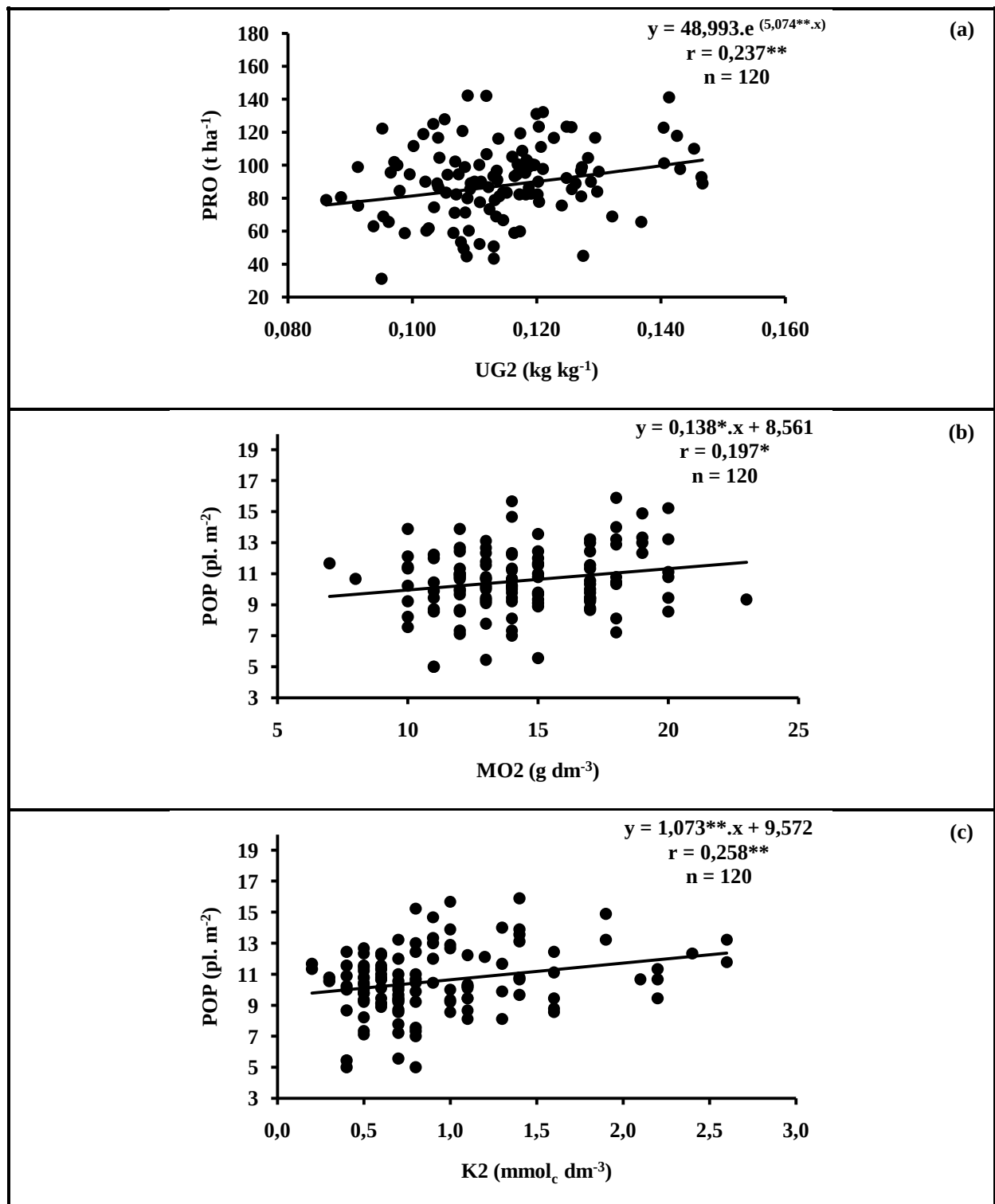


Figura 8: Equações de regressão de atributos da cana-de-açúcar em função de atributos físico-químicos (0,20-0,40 m) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

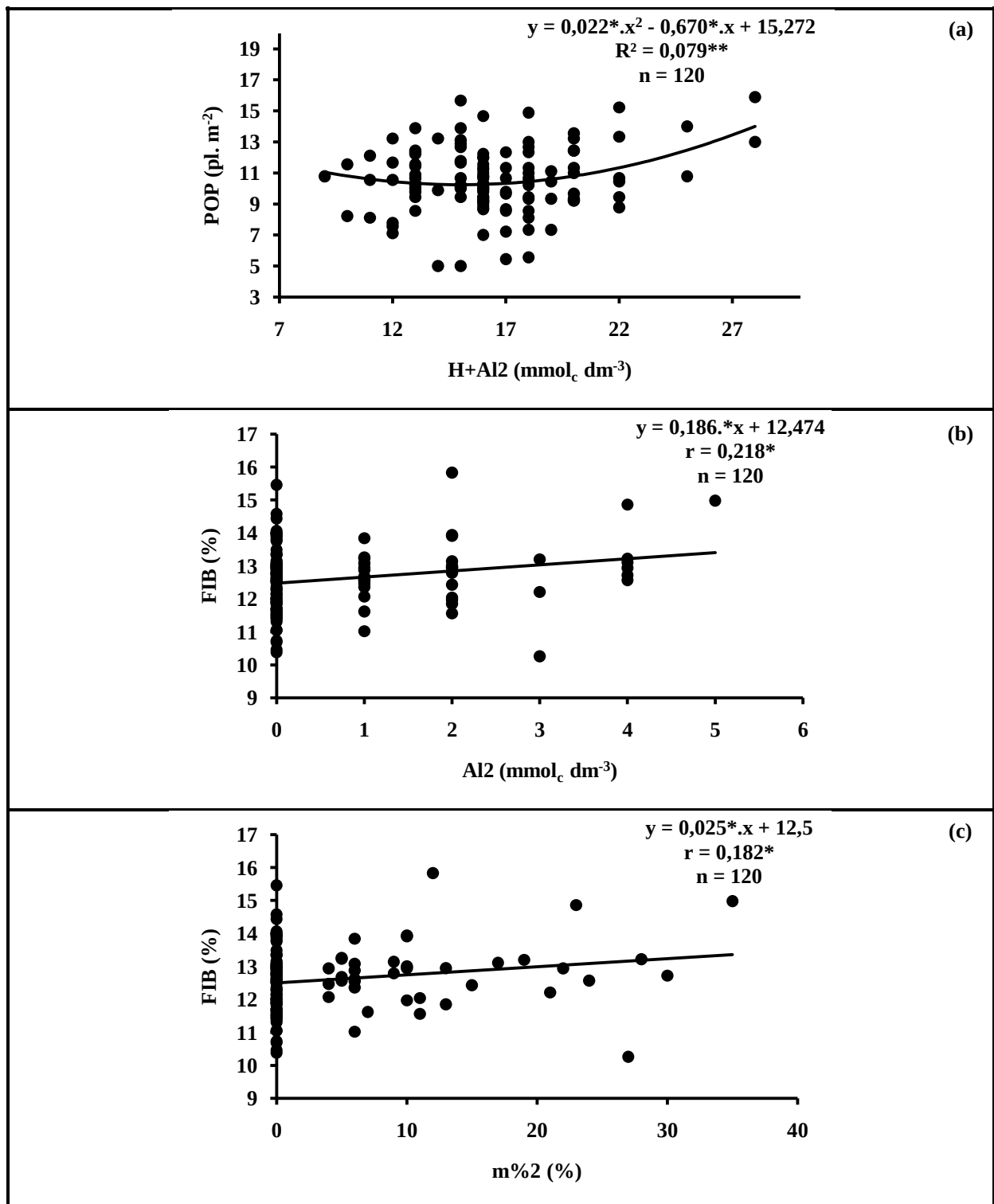


Figura 9: Equações de regressão de atributos da cana-de-açúcar em função de atributos químicos (0,20-0,40 m) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

Dentre as regressões modeladas, destacam-se as principais, sendo a da produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função da população de plantas por metro quadrado (*planta x planta*) e a da produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função do teor de matéria orgânica do solo (*planta x solo*) em virtude de sua importância agronômica. Desta forma, a relação quadrática entre a PRO e a POP (Figura 5b), com o modelo matemático: $y = 0,552^{**} \cdot x^2 + 16,130^{*} \cdot x - 15,770$ ($R^2 = 0,210^{**}$), indicou que quando a POP variou entre 5,0 e 15,9 pl. m⁻², a PRO ficou entre 51,1 e 101,1 t ha⁻¹. O ponto de máximo da referida função é 14,6 pl. m⁻², equivalente a 21,9 plantas por metro linear, aludindo a uma PRO máxima de 102,1 t ha⁻¹. Portanto, esses valores representam a população ideal para a variedade SP 79 1011 quando plantada no solo em questão. A determinação da população ideal é um fator de extrema importância fitotécnica por apresentar estreita relação com a produção de colmos.

A regressão da PRO em função da MO1 apresentou relação linear positiva (Figura 4b), com o modelo matemático: $y = 1,864^{*} \cdot x + 61,461$ ($r = 0,236^{**}$; $n = 120$), indicando que a variação dos teores da MO1, entre 10 e 23 g dm⁻³, implicou numa variação de produtividade da cultura compreendida entre 80,1 e 104,3 t ha⁻¹, ao passo que para o teor médio da MO1 (15,5 g dm⁻³) ocorreu uma PRO estimada em 90,4 t ha⁻¹. Contudo, tal equação destina-se às estimativas da produtividade apenas para essa amplitude de valores, aproximando-se muito da equação obtida por Vitti et al. (2008), que também verificaram uma relação linear positiva entre tais variáveis, sendo: $y = 50,9 \cdot x + 23,4$ ($r = 0,934^{**}$), com valores da MO trabalhados em %. Assim, considerando o teor médio para a variável independente (MO) obtido neste estudo, pela equação dos referidos autores seria possível estimar uma PRO média de 102,3 t ha⁻¹, ou seja, 11,9 t ha⁻¹ a mais que a primeira equação. Tais equações possuem relevância no âmbito do manejo e conservação do solo, uma vez que a MO influencia substancialmente suas propriedades químicas, físicas e biológicas, principalmente em um solo com horizonte A arenoso como no caso presente.

4.2.1.3 Regressão linear múltipla entre os atributos (*stepwise*)

Na análise da regressão linear múltipla da PRO (variável dependente) em função dos demais atributos da planta (variáveis independentes), o modelo testado (Equação 17) explicou aproximadamente 23,6% da variação da produtividade de colmos de cana-de-açúcar ($R^2 = 0,2355^{***}$). Os coeficientes das variáveis independentes POP e PUR foram significativos a 1% (***), conforme análise de variância expressa no Quadro 7.

$$\text{PRO (t ha}^{-1}\text{)} = - 21,1120 + 4,9216.\text{POP}^{***} + 0,7593.\text{PUR}^{***} \dots\dots\dots(17)$$

Quadro 7: Análise de variância da regressão da produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função dos atributos da planta em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

Causas de variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Modelo	2	13979	6989,631	18,02	< 0,0001
Erro	117	45383	387,887		
Total	119	59362			

Por outro lado, a regressão linear múltipla da PRO em função dos atributos físico-químicos do solo, na profundidade de 0-0,20 m, revelou que o modelo testado (Equação 18) explicou apenas 14,4% da variação da produtividade de colmos de cana-de-açúcar ($R^2 = 0,1438^{***}$), cujos coeficientes das variáveis independentes RP1 e MO1 foram significativos a 1% (***), enquanto que a UG1 a 10% (*) (Quadro 8).

$$\text{PRO (t ha}^{-1}\text{)} = 7,6374 + 18,5830.\text{RP1}^{***} + 241,4200.\text{UG1}^* + 2,2823.\text{MO1}^{***} \dots\dots\dots(18)$$

Por fim, a regressão linear múltipla da PRO em função dos atributos físico-químicos do solo na profundidade de 0,20-0,40 m (Equação 19) revelou que o modelo testado explicou somente 5,53% da variação da produtividade de colmos de cana-de-açúcar ($R^2 = 0,0553^{***}$). O coeficiente da variável independente UG2 foi significativo a 1% (***) (Quadro 9).

$$\text{PRO (t ha}^{-1}\text{)} = 43,149 + 414,390.\text{UG2}^{***} \dots\dots\dots(19)$$

As demais influências na PRO ficaram por conta de outros fatores que não entraram nos modelos por não serem significativos a 10% de probabilidade. Assim, esta explicação proposta com base na regressão linear múltipla demonstrou a implicação de cada atributo pesquisado na produtividade de colmos de cana-de-açúcar, levando em consideração os valores destes nas análises físico-químicas do solo, bem como dos atributos da planta avaliados. Deve-se ressaltar que a UG, nas duas profundidades, resultou significância nos

modelos ajustados provavelmente pelo fato de ter facilitado os processos de absorção dos nutrientes do solo pela planta.

Quadro 8: Análise de variância da regressão da produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função dos atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m

Causas de variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Modelo	3	8534,273	2844,758	6,49	0,0004
Erro	116	50828	438,170		
Total	119	59362			

Quadro 9: Análise de variância da regressão da produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função dos atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m

Causas de variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Modelo	1	3280,267	3280,267	6,90	0,0098
Erro	118	56082	475,269		
Total	119	59362			

4.3 Análise geoestatística dos atributos

4.3.1 Análise semivariográfica simples

4.3.1.1 Ajuste dos semivariogramas simples dos atributos

Apesar de a normalidade dos dados ser uma das pressuposições da estatística clássica, ela não chega a ser uma exigência da geoestatística. Mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes na área de estudo (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Assim, nos Quadros 10, 11 e 12 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos da planta bem como para os atributos físico-químicos do solo no qual o

experimento foi instalado. Da mesma forma, nas Figuras de 10 a 17, estão relacionados seus respectivos semivariogramas.

Com exceção da FIB, #K1, #K/T1, UG2, P2, MO2, pH2, #K2, Al2, m%2, #K/T2 e Mg/T2, que apresentaram efeito pepita puro, todos os demais atributos apresentaram dependência espacial (Quadros 10, 11 e 12), evidenciando que suas distribuições no espaço não foram aleatórias. Verifica-se, nos semivariogramas simples, que o coeficiente de determinação espacial (r^2) decresceu na seguinte ordem: (1) #pH1 (0,972); (2) S2 (0,966); (3) Ca2 (0,963); (4) Mg2 (0,958); (5) RP1 (0,947); (6) m%1 (0,940); (7) H+Al2 (0,939); (8) #ATR (0,933); (9) #PUR (0,917); (10) BRI (0,916); (11) RP2 (0,898); (12) #T2 (0,896); (13) #S1 (0,890); (14) H+Al1 (0,885); (15) #Mg/T1 (0,875); (16) P1 (0,875); (17) UG1 (0,872); (18) VOL (0,858); (19) PRO (0,854); (20) Ca/T2 (0,835); (21) V%1 (0,835); (22) #Mg1 (0,824); (23) #POL (0,810); (24) Ca/T1 (0,781); (25) #T1 (0,771); (26) Al1 (0,754); (27) #POP (0,710); (28) #MO1 (0,709); (29) #Ca1 (0,700) e (30) V%2 (0,615).

Assim, em relação aos dois primeiros, que tiveram os mais elevados coeficientes de determinação espacial (Quadros 11 e 12), observou-se o seguinte: #pH1, seu r^2 (0,972) indicou ser o atributo de melhor ajuste semivariográfico, apresentando ADE alto (71,3%), com alcance de 69,5 metros e modelo gaussiano, diferindo de Souza et al. (2007b), que ajustaram modelo esférico, com alcance de 345 m e ADE médio. Já, o coeficiente de determinação espacial do S2 ($r^2 = 0,966$) indicou ser este o segundo atributo de melhor ajuste semivariográfico, cujo o ADE observado (89,6%) foi muito alto, com o alcance de 70,8 metros e um ajuste gaussiano, diferentemente daqueles obtidos por Souza et al. (2010b).

Nos atributos da planta, a PRO ($r^2 = 0,854$) apresentou um ADE médio (59,4%) e alcance da dependência espacial para o semivariograma gaussiano de 72,0 m (Quadro 10), também diferindo de Souza et al. (2010b), quando num Argissolo Vermelho-Amarelo.

Nos Quadros 10, 11 e 12 podem ser observados ainda os valores dos alcances dos atributos pesquisados, cuja relação decrescente foi: (1) BRI (288,3 m); (2) #POP (258,3 m); (3) Al1 (248,7 m); (4) H+Al1 (240,0 m); (5) #MO1 (182,7 m); (6) VOL (158,1 m), (7) RP1 (144,0 m); (8) UG1 (135,6 m); (9) P1 (125,0 m); (10) Ca/T1 (107,1 m); (11) #PUR (100,0 m); (12) #Mg/T1 (86,1 m); (13) H+Al2 (84,1); (14) m%1 (77,8 m); (15) #POL (73,0 m); (16) PRO (72,0 m); (17) S2 (70,8 m); (18) #Mg1 (70,5 m); (19) #V%1 (70,0 m); (20) #pH1 (69,5 m); (21) #ATR (69,0 m); (22) Mg2 (67,2 m); (23) Ca/T2 (66,5 m); (24) #T2 (64,0 m); (25) Ca2 (61,7 m); (26) #T1 (61,5 m); (27) #S1 (60,5 m); (28) RP2 (60,0 m); (29) V%2 (60,0 m) e (30) #Ca1 (55,0 m).

Quadro 10: Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados de atributos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)

Atributos ^(a)	Parâmetros do ajuste										
	Modelo ^(b)	C _o	C _o +C	A _o (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
<i>γ(h) simples</i>											
PRO	gau (57)	1,97.10 ⁻²	4,86.10 ⁻²	72,0	0,854	7,82.10 ³	59,4	ME	6,51.10	0,281	0,122
VOL	exp (50)	6,21.10 ²	1,24.10 ³	158,1	0,858	2,74.10 ⁴	50,0	ME	3,09.10	0,808	0,322
#POP	exp (155)	1,73	3,46	258,3	0,710	4,68.10 ⁻¹	50,0	ME	2,00.10 ⁻²	0,897	0,338
#ATR	gau (51)	9,35.10	2,05.10 ²	69,0	0,933	5,77.10 ²	54,4	ME	9,00.10 ⁻²	0,599	0,239
BRI	exp (222)	2,05	4,10	288,3	0,916	1,76.10 ⁻¹	50,0	ME	2,82	0,815	0,390
#POL	gau (59)	1,87	3,04	73,0	0,810	2,12.10 ⁻¹	38,5	BA	0,00	0,440	0,155
#PUR	exp (71)	1,26.10	3,03.10	100,0	0,917	5,95	58,3	ME	2,00.10 ⁻²	0,577	0,212
FIB	epp	9,92.10 ⁻¹	9,92.10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>γ(h) cruzado</i>											
PRO=f(#POP)	exp (126)	1,26.10	2,51.10	357,3	0,781	2,34.10	50,0	ME	6,70.10	0,263	0,173
PRO=f(BRI)	gau (72)	1,79	4,92	73,0	0,234	1,29.10	63,6	AL	7,05.10	0,220	0,145

^(a) Vide Quadro 1; # trabalhado com o resíduo do atributo; parênteses sucedendo o modelo significa o número de pares no primeiro lag; ^(b) gau = gaussiano, exp = exponencial, epp = efeito pepita puro; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial, sendo BA = baixa, ME = média e AL = alta.

Quadro 11: Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados da produtividade da cana-de-açúcar com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m

Atributos ^(a)	Parâmetros do ajuste										
	Modelo ^(b)	C _o	C _o +C	A _o (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
<i>γ(h) simples – solo</i>											
RP1	exp (72)	1,35.10 ⁻²	6,16.10 ⁻²	144,0	0,947	1,24.10 ⁻⁴	85,3	MA	4,80.10 ⁻¹	0,555	0,318
UG1	exp (64)	1,03.10 ⁻⁴	2,07.10 ⁻⁴	135,6	0,872	6,13.10 ⁻⁴⁰	50,2	ME	5.00.10 ⁻²	0,556	0,192
P1	gau (226)	3,6.10 ⁻¹	5,30.10 ⁻¹	125,0	0,875	2,41.10 ⁻³	32,1	BA	1,99	0,527	0,205
#MO1	exp (236)	3,89	7,78	182,7	0,709	1,57	50,0	ME	-5,00.10 ⁻²	0,785	0,270
#pH1	gau (52)	3,43.10 ⁻²	1,20.10 ⁻¹	69,5	0,972	1,20.10 ⁻⁴	71,3	AL	0,00	1,000	0,428
#K1	epp	3,81.10 ⁻¹	3,81.10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-
#Ca1	gau (42)	9,50	1,87.10	55,0	0,700	2,40.10	49,2	ME	-1,10.10 ⁻¹	0,738	0,176
#Mg1	gau (40)	3,90	6,50	70,5	0,824	8,64.10 ⁻¹	40,0	ME	-1,00.10 ⁻²	0,988	0,333
H+Al1	gau (57)	6,95	8,80	240,0	0,885	5,49.10 ⁻¹	21,0	MB	2,71	0,837	0,215
Al1	exp (183)	5,95.10 ⁻¹	1,19	248,7	0,754	4,47.10 ⁻²	50,0	ME	1,10.10 ⁻¹	0,844	0,290
#S1	gau (51)	1,35.10	5,30.10	60,5	0,890	9,36.10	74,5	AL	1,30.10	1,014	0,370
#T1	gau (66)	2,38.10	3,90.10	61,5	0,777	2,99.10	38,9	BA	1,30.10 ⁻¹	1,008	0,239
#V%1	gau (64)	6,60.10	1,08.10 ²	70,0	0,835	2,01.10 ²	38,9	BA	-1,30.10 ⁻¹	0,991	0,235
m%1	esf (66)	1,50	4,07.10	77,8	0,940	3,73.10	96,3	MA	1,46	0,647	0,341
#K/T1	epp	2,34	2,34	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca/T1	exp (63)	9,20	6,02.10	107,1	0,781	2,52.10 ²	84,7	MA	4,69	0,865	0,311
#Mg/T1	gau (56)	1,28.10	2,55.10	86,1	0,875	1,36.10	50,0	ME	-8,00.10 ⁻²	0,822	0,336
<i>γ(h) cruzado – planta x solo</i>											
PRO=f(#MO1)	exp (83)	1,00.10 ⁻¹	1,33.10	165,9	0,653	4,18.10	99,3	MA	7,41.10	0,173	0,110
PRO=f(UG1)	gau (144)	1,00.10 ⁻³	3,99.10 ⁻²	110,0	0,616	9,41.10 ⁻⁴	97,5	MA	7,07.10	0,218	0,141

^(a) Vide Quadros 1 e 2; # trabalhado com o resíduo do atributo; parênteses sucedendo o modelo significa o número de pares no primeiro lag; ^(b) exp = exponencial, gau = gaussiano, epp = efeito pepita puro e esf = esférico; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial, sendo MB = muito baixa, BA = baixa, ME = média, AL = alta e MA = muito alta.

Quadro 12: Parâmetros dos semivariogramas simples de alguns atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m

Atributos ^(a)	Parâmetros do ajuste										
	Modelo ^(b)	C _o	C _o +C	A _o (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
RP2	gau (50)	7,80.10 ⁻²	1,72.10 ⁻¹	60,0	0,898	5,48.10 ⁻⁴	54,7	ME	1,25	0,232	0,084
UG2	epp	1,67.10 ⁻⁴	1,67.10 ⁻⁴	-	-	-	-	-	-	-	-
P2	epp	9,23.10 ⁻¹	9,23.10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-
MO2	epp	9,06	9,06	-	-	-	-	-	-	-	-
pH2	epp	1,56.10 ⁻¹	1,56.10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-
#K2	epp	1,95.10 ⁻¹	1,95.10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca2	gau (63)	1,84	1,42.10	61,7	0,963	2,25	87,1	MA	3,14	0,746	0,333
Mg2	esf (56)	2,50.10 ⁻¹	5,41	67,2	0,958	2,76.10 ⁻¹	95,4	MA	4,54	0,375	0,176
H+Al2	esf (46)	1,40.10 ⁻¹	1,06.10	84,1	0,939	2,55	98,7	MA	6,60	0,597	0,356
Al2	epp	1,37	1,37	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	gau (64)	4,10	3,96.10	70,8	0,966	2,16.10	89,6	MA	8,38	0,605	0,355
#T2	gau (81)	1,50.10	2,73.10	64,0	0,896	7,18	45,0	ME	2,00.10 ⁻²	0,181	0,045
V%2	gau (68)	8,00.10	1,26.10 ²	60,0	0,615	5,41.10 ²	36,3	BA	3,60.10	0,354	0,095
m%2	epp	5,60.10	5,60.10	-	-	-	-	-	-	-	-
#K/T2	epp	1,44	1,44	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca/T2	gau (60)	3,10.10	5,77.10	66,5	0,835	8,11.10	46,3	ME	8,30	0,747	0,205
Mg/T2	epp	3,52.10	3,52.10	-	-	-	-	-	-	-	-

^(a) Vide Quadro 3; # trabalhado com o resíduo do atributo; parênteses sucedendo o modelo significa o número de pares no primeiro lag; ^(b) gau = gaussiano, epp = efeito pepita puro e esf = esférico; ^(c) SQR = soma dos quadrados dos resíduos; ^(d) ADE = avaliador da dependência espacial, sendo BA = baixa, ME = média e MA = muito alta.

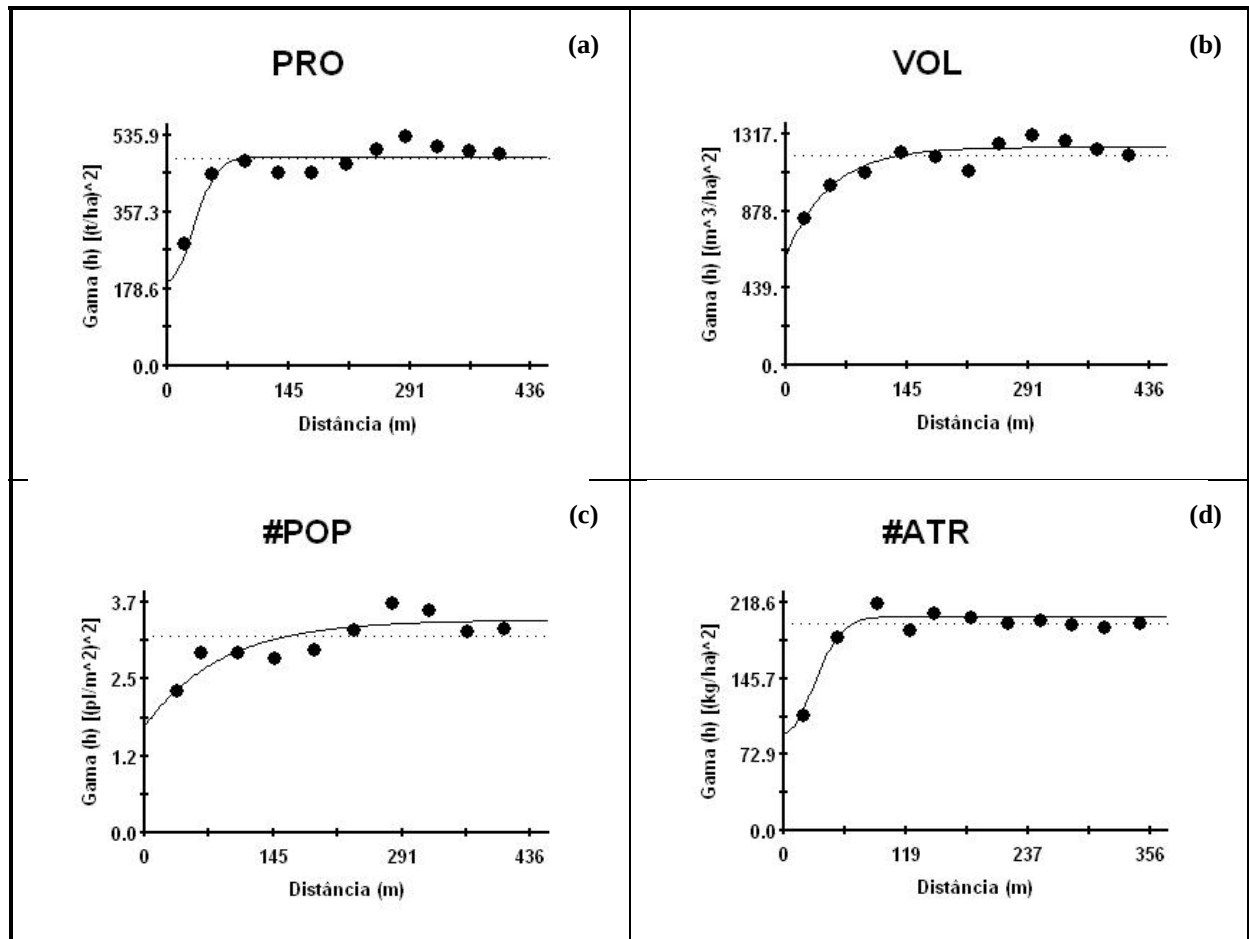


Figura 10: Semivariogramas simples da produtividade e de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

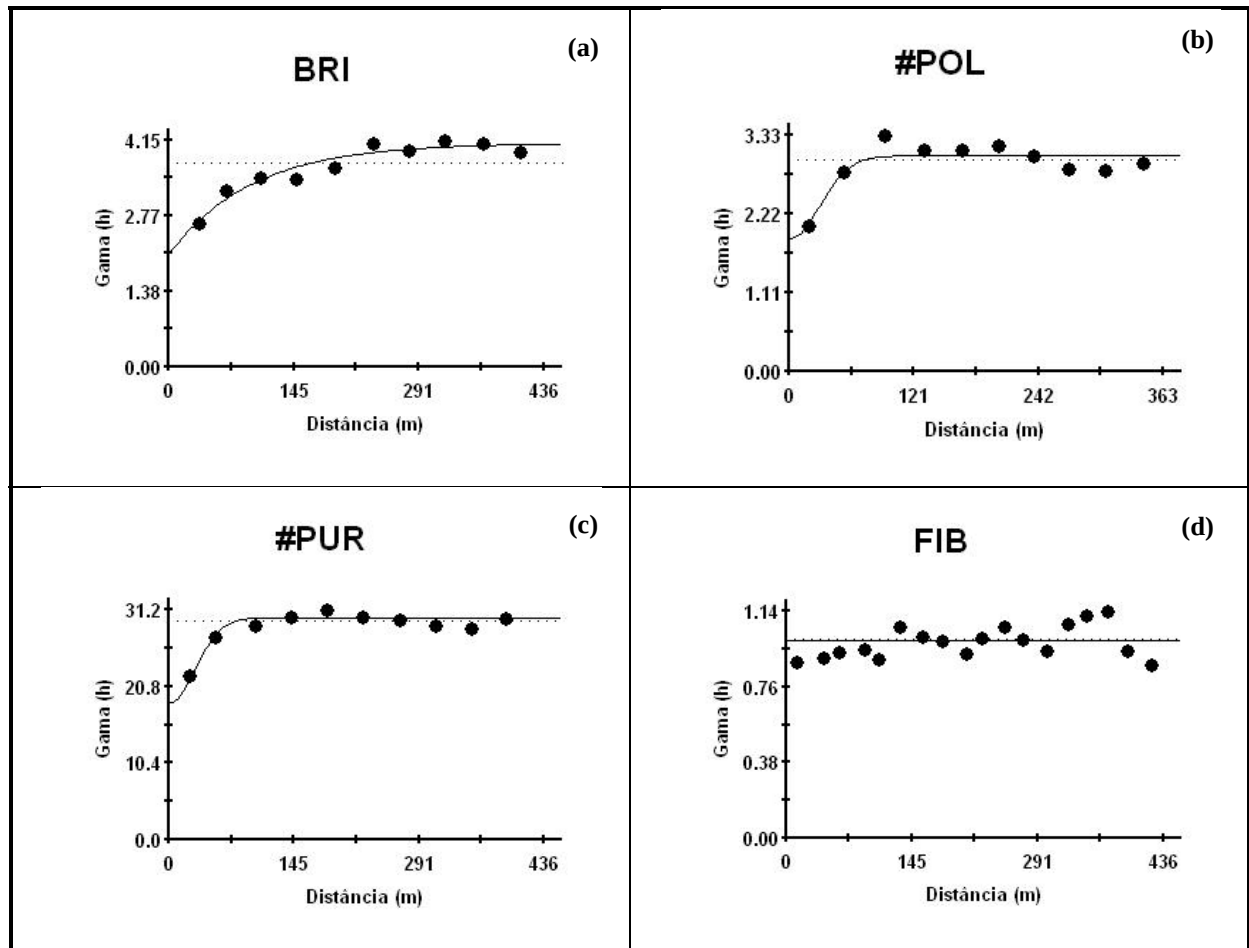


Figura 11: Semivariogramas simples de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

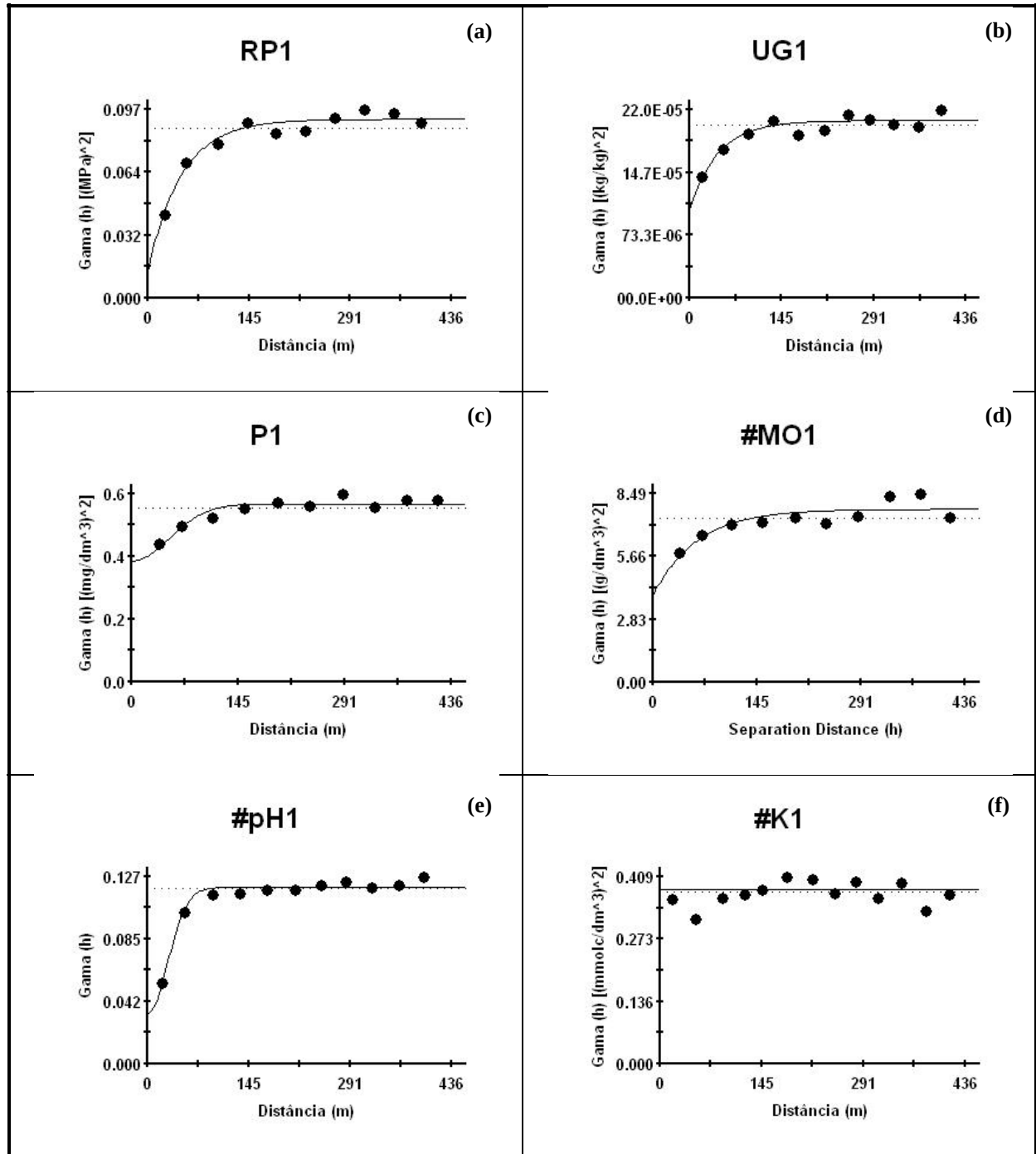


Figura 12: Semivariogramas simples de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m

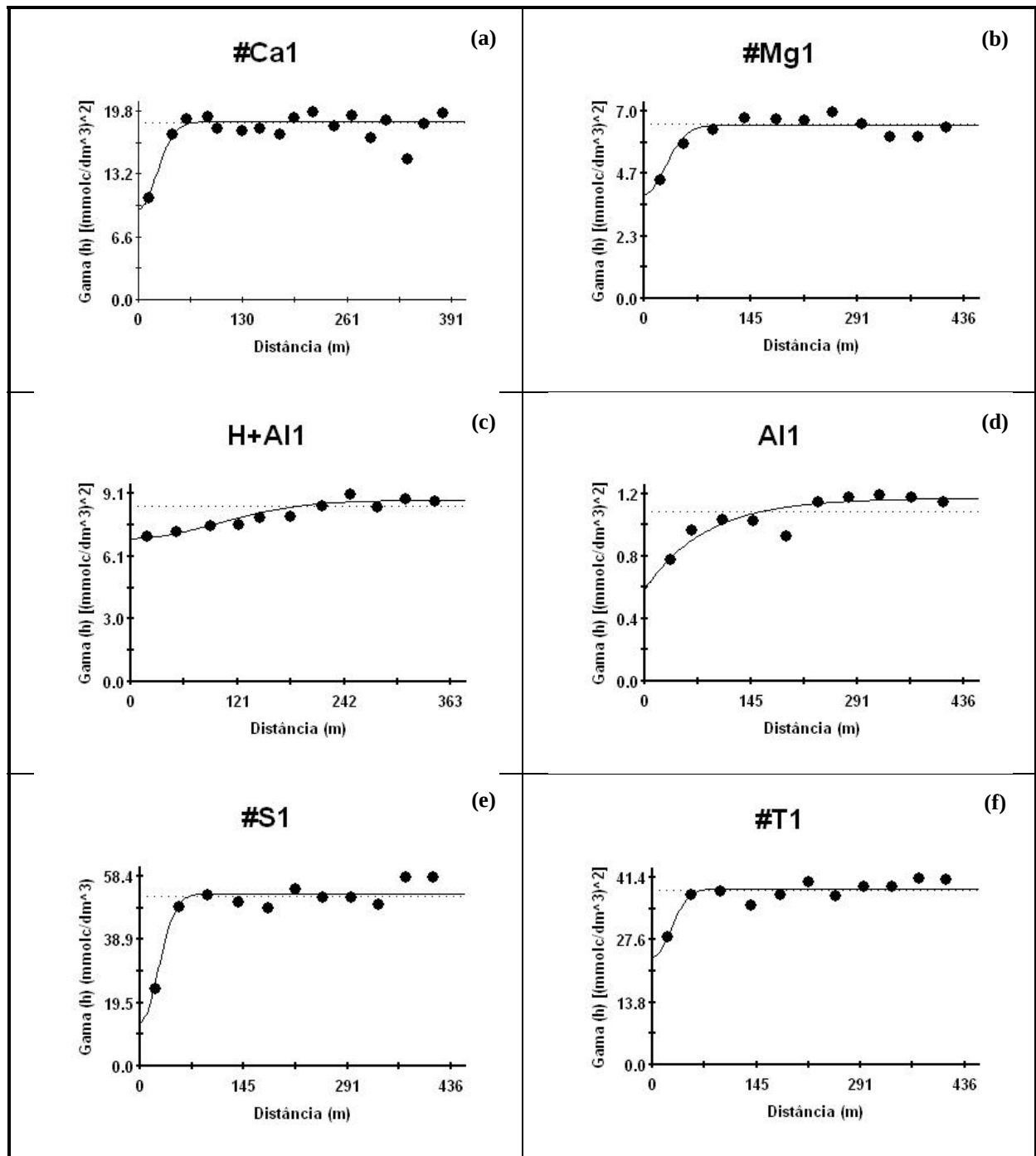


Figura 13: Semivariogramas simples de atributos químicos (Ca, Mg, H+Al, Al, S e T) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m

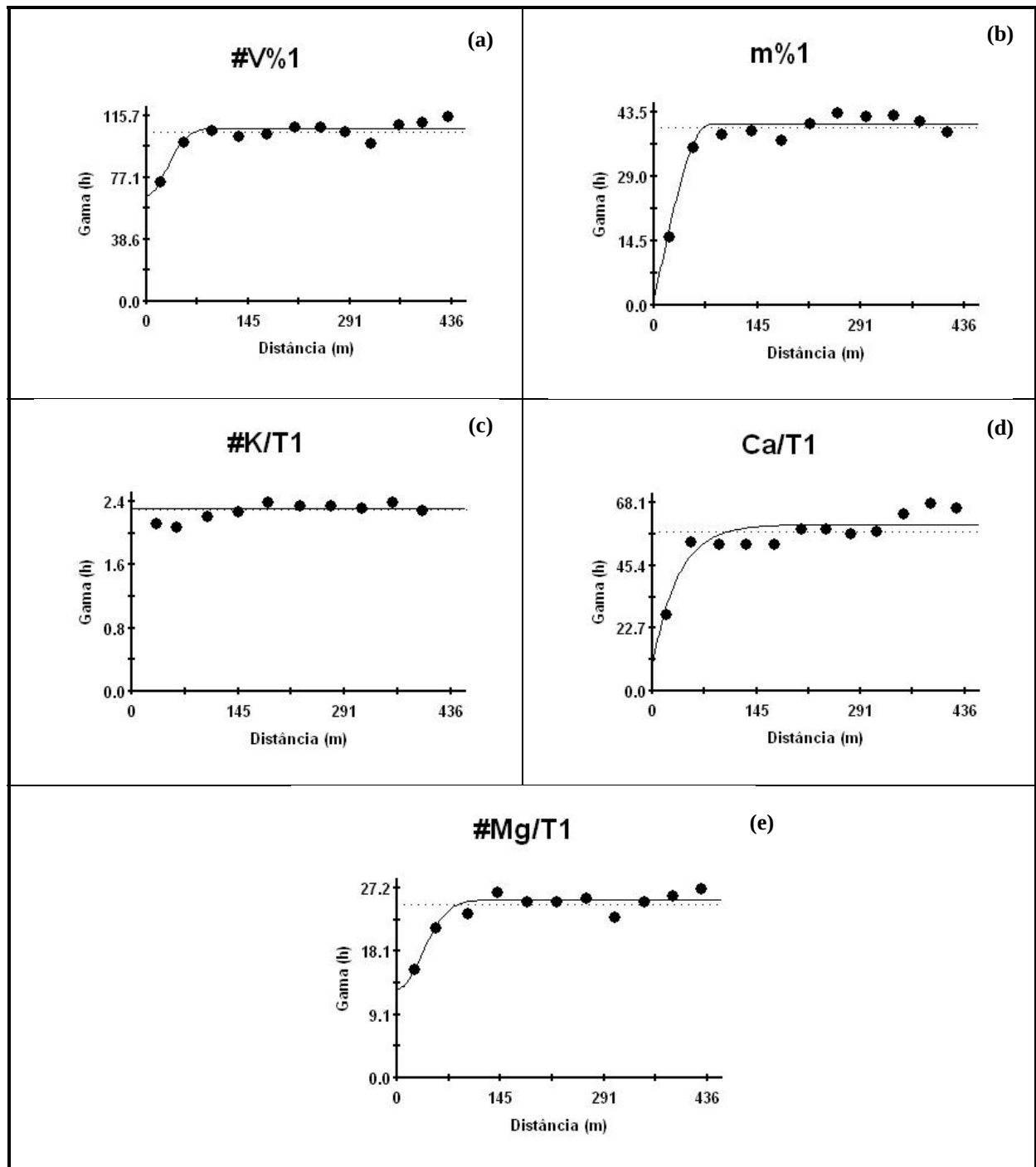


Figura 14: Semivariogramas simples de atributos químicos (V%, m%, K/T, Ca/T e Mg/T) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m

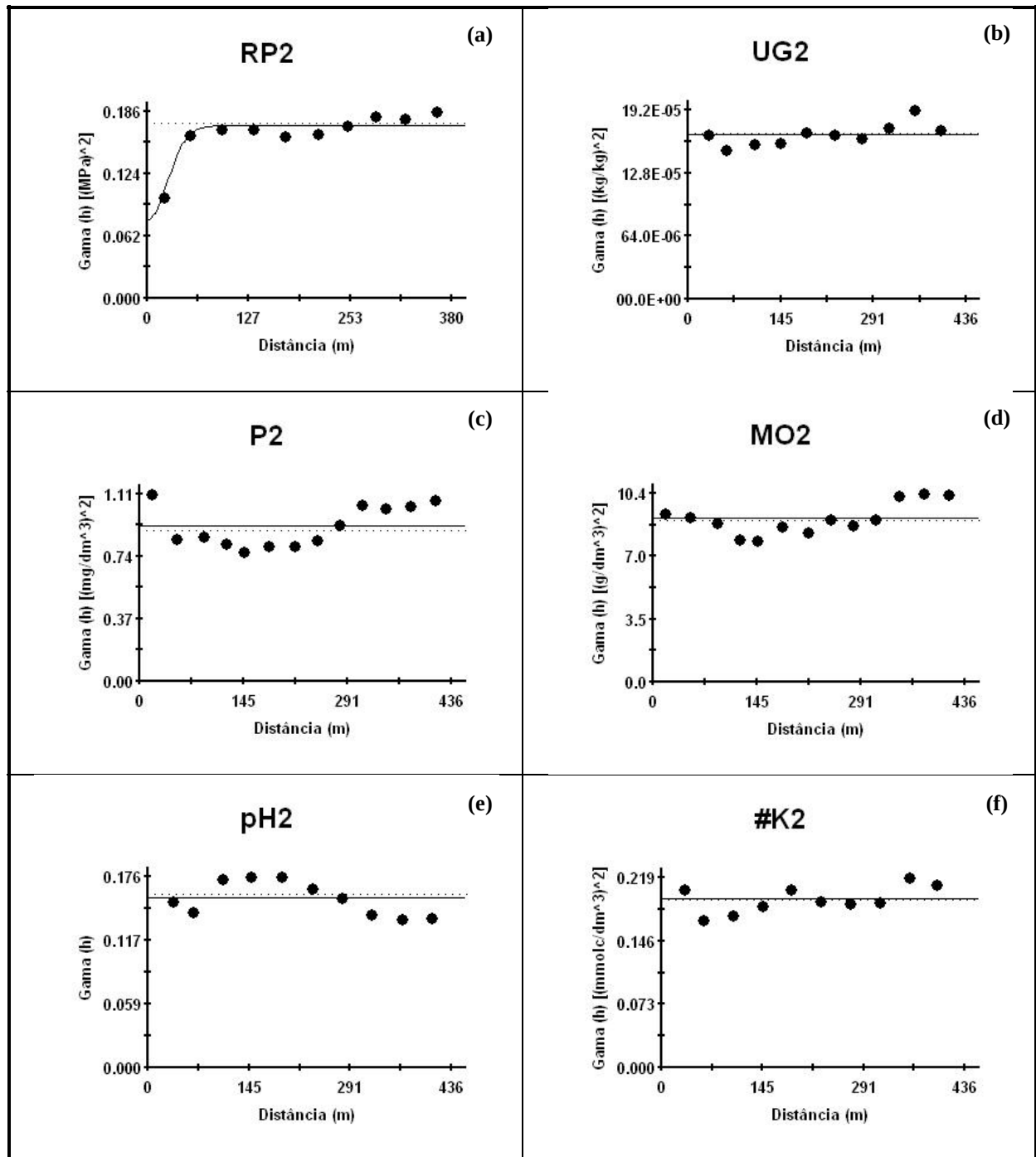


Figura 15: Semivariogramas simples de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m

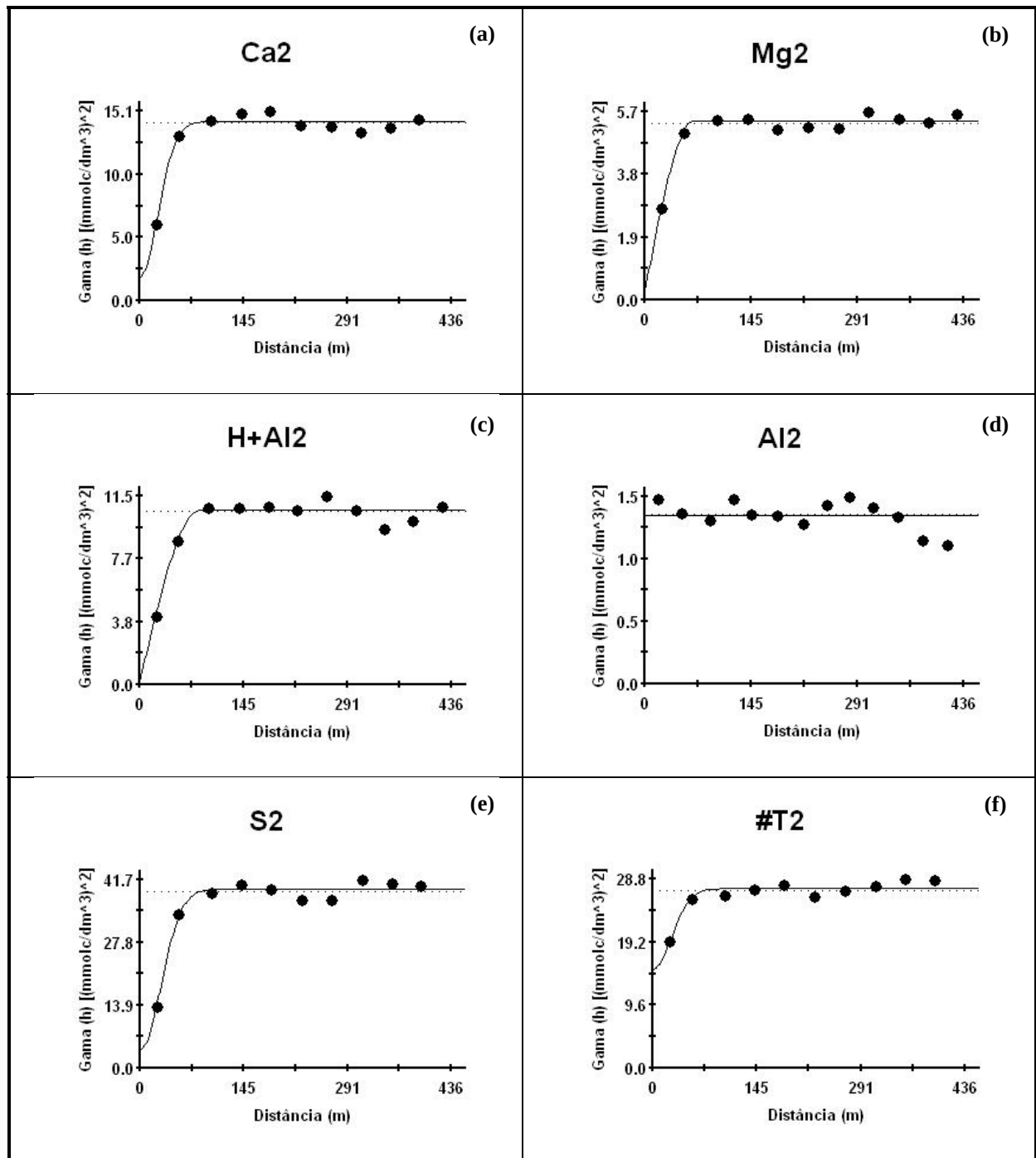


Figura 16: Semivariogramas simples de atributos químicos (Ca, Mg, H+Al, Al, S e T) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m

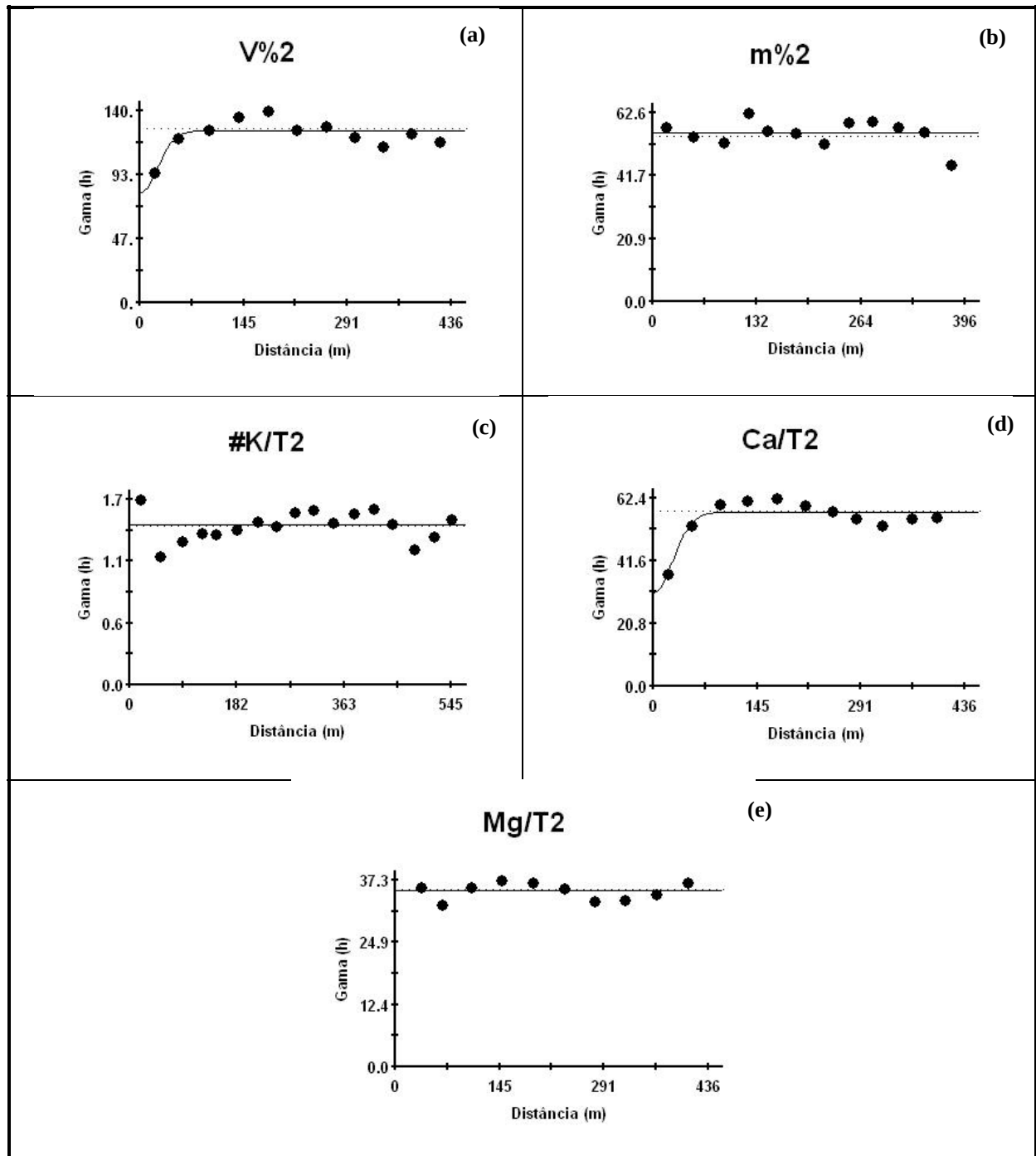


Figura 17: Semivariogramas simples de atributos químicos (V%, m%, K/T, Ca/T e Mg/T) de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP) na profundidade de 0,20-0,40 m

O valor do alcance pode influenciar a qualidade da estimativa, uma vez que determina o número de valores usados na interpolação. Assim, estimativas feitas com interpolação por krigagem utilizando os maiores valores do alcance tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representam melhor a realidade (CORÁ et al., 2004). Portanto, no auxílio aos trabalhos futuros, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos que alimentarão os *softwares* empregados na agricultura de precisão, para manejos específicos e localizados (*zonas específicas de manejo*), não deverão ser menores do que 55,0 m, por representarem a distância dentro da qual os valores de um determinado atributo são iguais entre si.

4.3.1.2 Validação cruzada dos semivariogramas simples ajustados para os atributos

Nos Quadros 10, 11 e 12 estão apresentados ainda os parâmetros das validações cruzadas referentes à krigagem para os atributos da planta assim como para os atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), que conforme ordem decrescente da grandeza do coeficiente de correlação (r), foi a seguinte: (1) #pH1 (0,428); (2) BRI (0,390); (3) #S1 (0,370); (4) H+Al2 (0,356); (5) S2 (0,355); (6) m%1 (0,341); (7) #POP (0,338); (8) #Mg/T1 (0,336); (9) Mg1 (0,333); (10) Ca2 (0,333); (11) VOL (0,322); (12) RP1 (0,318); (13) Ca/T1 (0,311); (14) Al1 (0,290); (15) #MO1 (0,270); (16) #T1 (0,239); (17) #ATR (0,239); (18) #V%1 (0,235); (19) H+Al1 (0,215); (20) #PUR (0,212); (21) Ca/T2 (0,205); (22) P1 (0,205); (23) UG1 (0,192); (24) #Ca1 (0,176); (25) Mg2 (0,176); (26) #POL (0,155); (27) PRO (0,122); (28) V%2 (0,095); (29) RP2 (0,084) e (30) #T2 (0,045).

Assim, pôde ser constatado que as cinco melhores validações cruzadas obtidas foram para os atributos #pH1, BRI, #S1, H+Al2 e S2. Os coeficientes angulares (b) das retas das validações cruzadas variaram entre 0,181 (#T2) e 1,014 (#S1), conforme pode ser visualizado nos Quadros 10, 11 e 12. Por outro lado, o #pH1 resultou o maior coeficiente de determinação espacial (r^2), assim como o maior coeficiente de correlação (r) para a validação cruzada. Este atributo, no âmbito da análise geoestatística, apresentou-se como um potencial indicador da qualidade química do solo na camada de 0 - 0,20 m, atributo importante devido a sua facilidade de obtenção e custo.

4.3.1.3 Mapas de krigagem dos atributos

Nas Figuras 18 a 21 estão evidenciados os mapas de krigagem simples dos atributos da planta e dos atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP). Em relação aos mapas de krigagem simples da PRO, Σ POP, Σ MO1 e UG1 (Figuras 17 e 18) constatou-se elevada correlação espacial direta entre tais atributos. Desta forma, observa-se que, de uma maneira geral, nos dois terços horizontais inferiores, e na região nordeste, ocorreram os mais elevados valores da PRO (89,8 a 115,6 t ha⁻¹). Por outro lado, em relação a Σ POP, no primeiro terço vertical (à esquerda) foi verificado predominância de valores máximos variando entre 10,5 a 12,3 pl. m⁻².

Para a Σ MO1, em praticamente todos os sítios do mapa ocorreram predominância de valores mais elevados (16,4 a 19,0 g dm⁻³). Já a UG1 apresentou os valores máximos variando entre 0,115 a 0,126 kg kg⁻¹, nas regiões leste, nordeste, norte e no primeiro terço vertical (à esquerda) do mapa. Em contrapartida, em relação aos referidos mapas de krigagem, ocorreu o inverso nas demais regiões, isto é, os mais baixos valores da PRO (55,8 a 81,4 t ha⁻¹), produtividades extremamente variadas, fato associado à variabilidade espacial dos atributos físico-químicos no solo, fato também evidenciado por Molin et al. (2007).

Semelhança direta também foi observada entre o mapa da PRO e os mapas de Σ pH1, Σ Ca1, Σ Mg1, Σ S1, Σ T1 e Σ V%1 (Figuras 18 a 20), de maneira que nas regiões que apresentaram os maiores valores da PRO ocorreram praticamente os maiores teores de Σ pH1 (5,2 a 5,7), Σ Ca1 (15,4 a 20,6 mmol_c dm⁻³), Σ Mg1 (7,2 a 10,1 mmol_c dm⁻³), Σ S1 (28,1 a 40,6 mmol_c dm⁻³), Σ T1 (41,4 a 49,0 mmol_c dm⁻³) e Σ V%1 (57,0 a 67,9 mmol_c dm⁻³), sendo o inverso verdadeiro.

Uma semelhança inversa, contudo, ocorreu entre o mapa da PRO e os mapas de Al1 e m%1 (Figuras 18 e 20), com as menores produtividades em regiões com valores máximos, entre 1,2 e 2,0 mmol_c dm⁻³ (Al1) e 16,6 e 28,0% (m%1), assim como as maiores produtividades em regiões com valores mínimos, entre 0,1 e 0,9 mmol_c dm⁻³ (Al1) e 1,5 e 9,1% (m%1). Neste contexto, Silva et al. (2010) também observaram que em regiões onde os teores de Al foram elevados houve uma redução na disponibilidade dos nutrientes às plantas e, por conseguinte, comprometendo a produtividade da cultura.

Exclusivamente para os atributos do solo, semelhança direta ocorreu entre os mapas de krigagens de Σ pH1, Σ Ca1, Σ Mg1, Σ S1, Σ T1 e Σ V%1 (Figuras 19 e 20). Durigon (2007), no da Σ POP (8,0 a 9,9 pl. m⁻²), da Σ MO1 (12,8 a 15,5 g dm⁻³) e da UG1 (0,100 a 0,111 kg kg⁻¹). Como pode ser visualizado no mapa da Σ PRO (Figura 18), houve manchas indicando

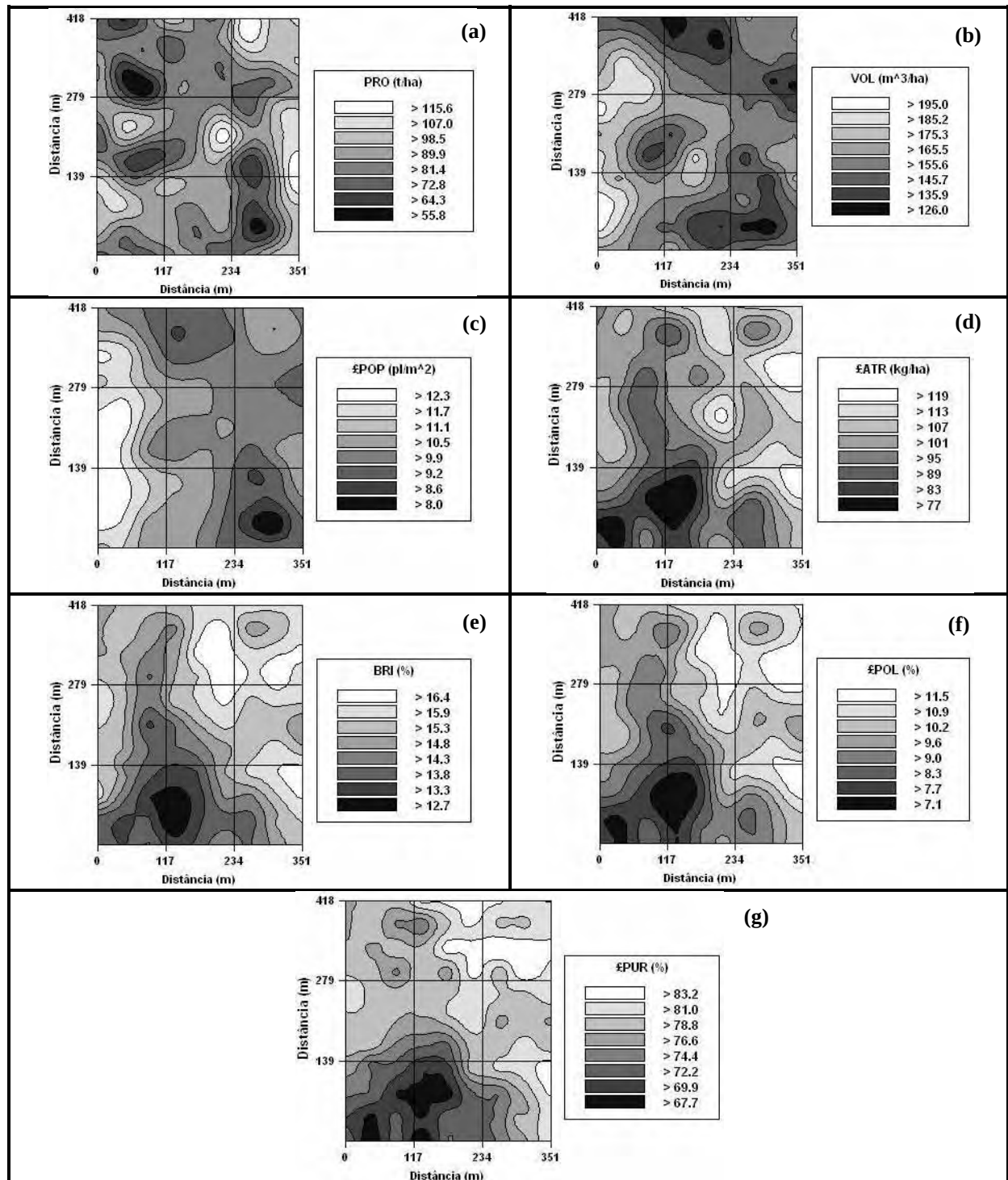


Figura 18: Mapas de krigagem da produtividade e de componentes tecnológicos da cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)

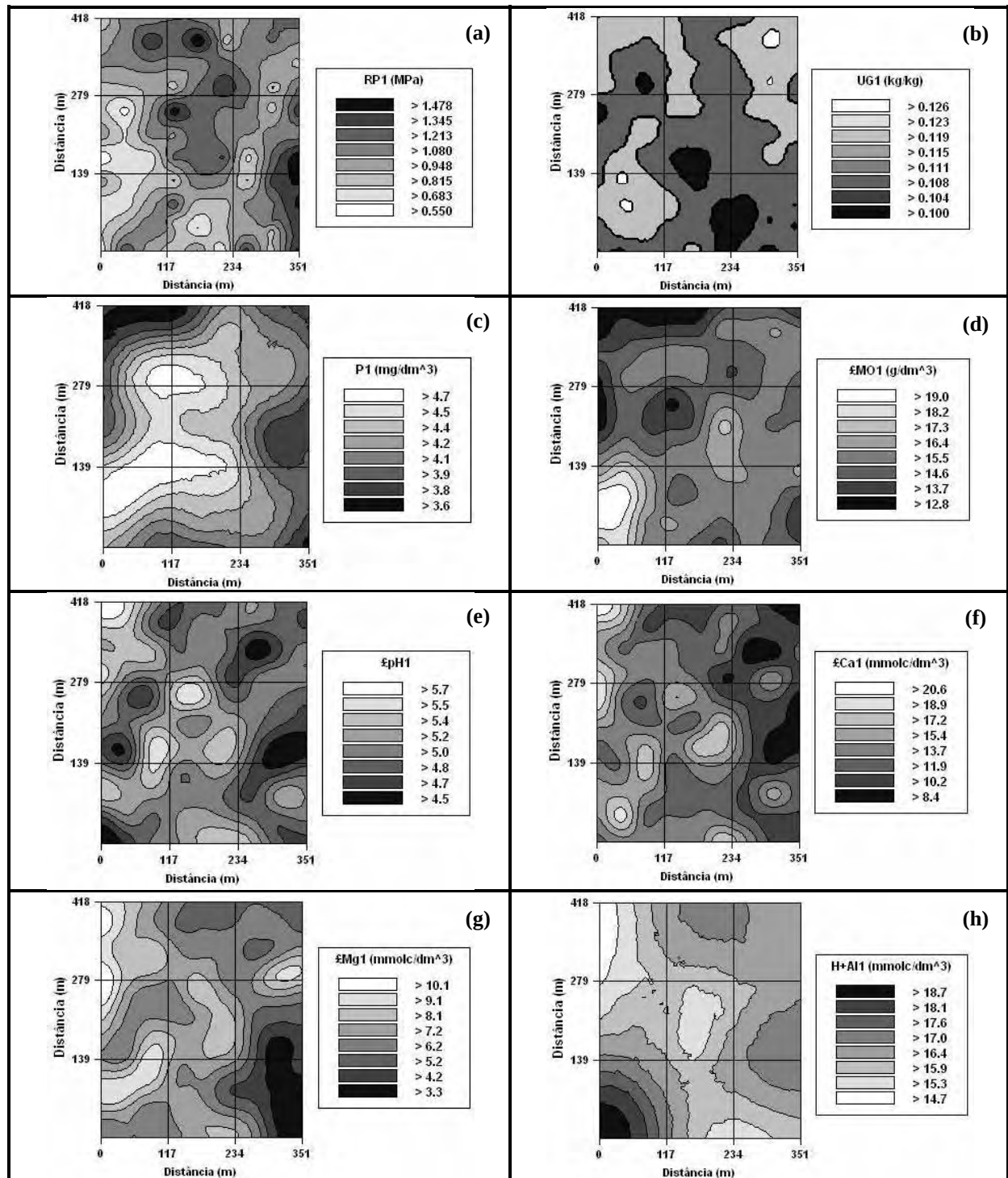


Figura 19: Mapas de krigagem de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m

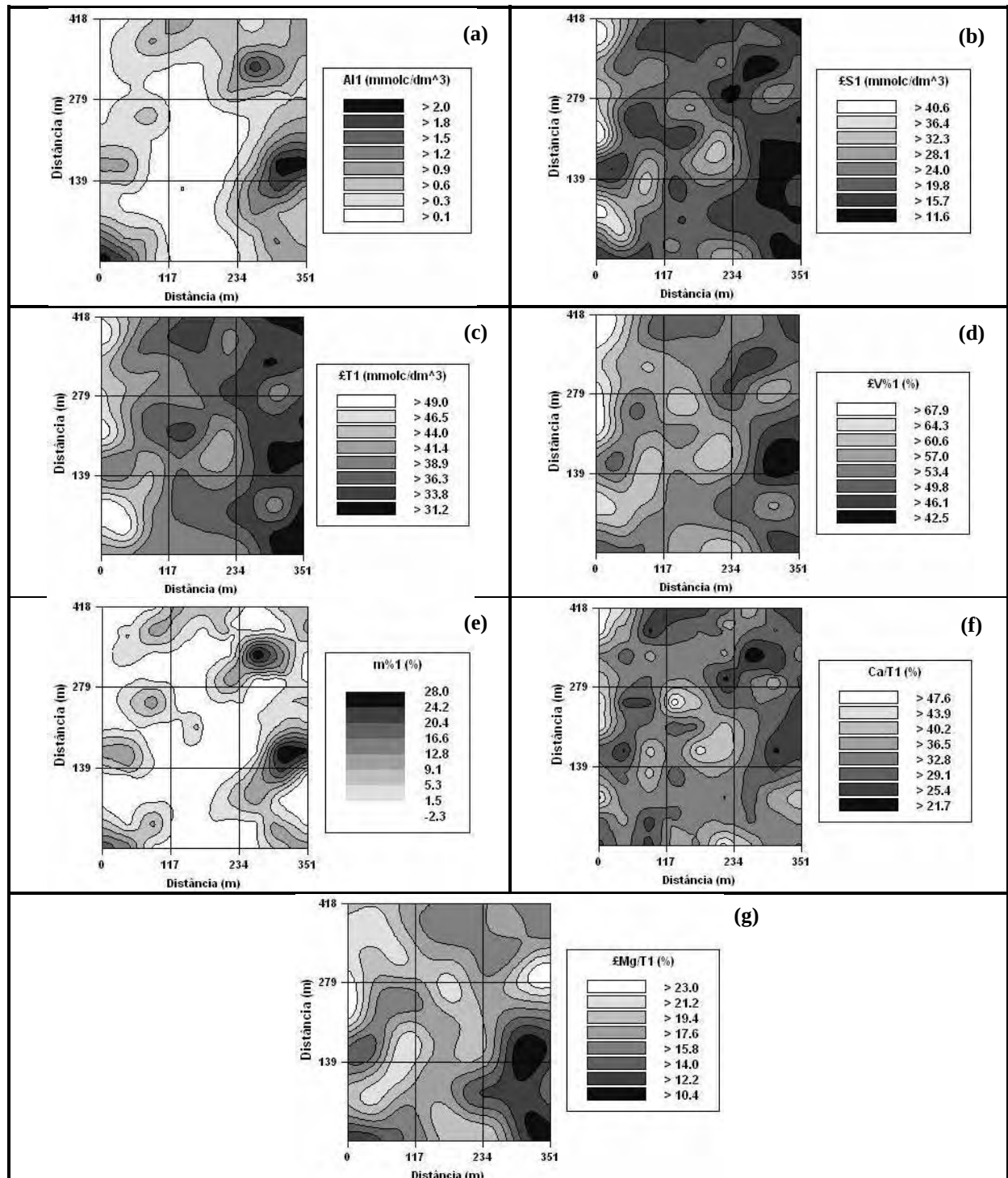


Figura 20: Mapas de krigagem de atributos químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0-0,20 m

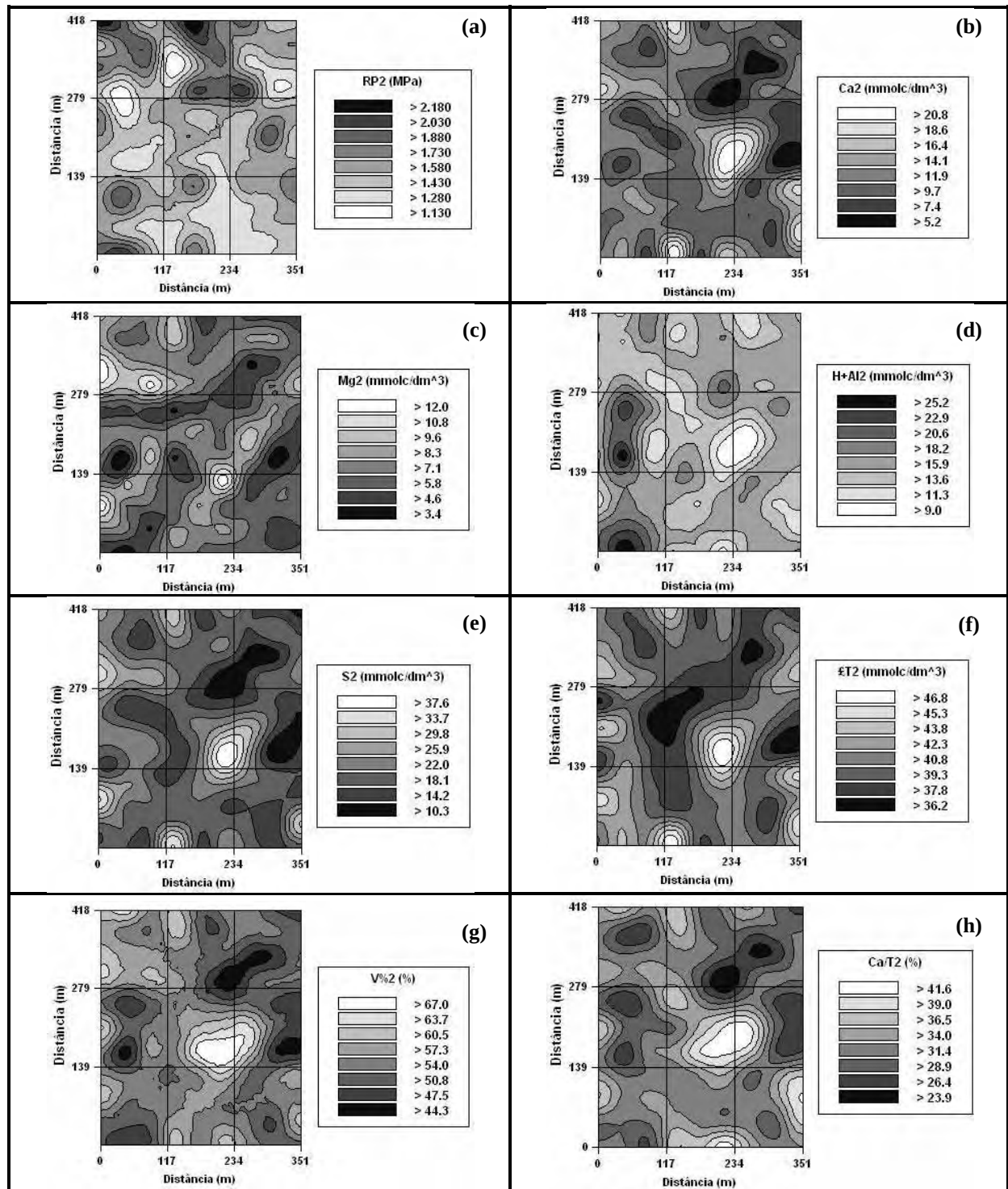


Figura 21: Mapas de krigagem de atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP), na profundidade de 0,20-0,40 m

município de São Francisco de Assis-RS, também verificou semelhança direta entre os mapas de krigagem do Ca e Mg, assim como Machado et al. (2007) em relação aos mapas de Ca, Mg, T e V%, em Uberlândia-MG, e Souza et al. (2007b) para os mapas de pH, Ca, Mg e V%. Para estes atributos, os sítios onde ocorreram os mais elevados valores foram praticamente os mesmos e, de forma análoga, os mais baixos valores também coincidiram espacialmente em toda a malha experimental. Isso pode ser explicado pelo fato haver uma relação direta entre S1, T1 e V1. O aumento do pH é influenciado pela disponibilidade de Ca e Mg e esses nutrientes fazem parte do cálculo da S e da T. Como os atributos S, T e V possuíram concordância espacial entre si, houve uma estreita semelhança entre seus mapas de krigagem.

Contudo, semelhanças inversas foram constatadas entre os mapas de krigagens de ΣpH1 , ΣCa1 , ΣMg1 , ΣS1 , ΣT1 e $\Sigma\text{V\%1}$ e os mapas da H+Al1 , Al1 e $\text{m\%1}$ (Figuras 19 e 20), indicando que nas regiões mapeadas onde ocorreram os maiores valores daqueles, foram justamente as regiões onde ocorreram os menores destes, sendo o inverso verdadeiro. Tal fato pôde ser devido à complexação do H+Al pelo Ca e Mg. Tal estudo corrobora com Souza et al. (2008b) e Dalchiavon (2010), pois estes também verificaram que regiões com menores valores de Al e m% estão relacionados com regiões de maiores valores do pH.

4.3.2 Análise semivariográfica cruzada

4.3.2.1 Ajuste dos semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem dos atributos

Entre dois atributos quaisquer, se apresentarem elevado e significativo coeficiente de correlação de Pearson, com ambos resultando semivariogramas, a cokrigagem entre eles provavelmente existirá. Entretanto, se apresentarem baixo e não significativo coeficiente de correlação de Pearson, mas ambos apresentarem semivariograma, a cokrigagem entre eles pode ou não existir. Neste sentido, estão relacionados nos Quadros 10 e 11 os parâmetros dos semivariogramas cruzados ajustados entre a produtividade de colmos de cana-de-açúcar e atributos da planta e físico-químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP). Assim, ficou comprovado que as cokrigagens $\text{PRO}=\text{f}(\#\text{POP})$, $\text{PRO}=\text{f}(\text{BRI})$, $\text{PRO}=\text{f}(\#\text{MO1})$ e $\text{PRO}=\text{f}(\text{UG1})$ apresentaram dependência espacial.

A relação decrescente dos coeficientes de determinação espacial (r^2) dos semivariogramas cruzados (Quadros 10 e 11) foi a seguinte: 1) [$\text{PRO}=\text{f}(\#\text{POP})$] (0,781), 2) [$\text{PRO}=\text{f}(\#\text{MO1})$] (0,653), 3) [$\text{PRO}=\text{f}(\text{UG1})$] (0,616) e 4) [$\text{PRO}=\text{f}(\text{BRI})$] (0,234). No entanto,

se for considerada a relação decrescente das validações cruzadas, analisada a partir da grandeza do coeficiente de correlação (r), o comportamento passa a ser: 1) [PRO=f(#POP)] (0,173), 2) [PRO=f(BRI)] (0,145), 3) [PRO=f(UG1)] (0,141) e 4) [PRO=f(#MO1)] (0,110). Os coeficientes angulares (b) das validações cruzadas variaram entre 0,173 [PRO=f(#MO1)] e 0,263 [PRO=f(#POP)].

Nas Figuras 22 a 25 estão contidos os semivariogramas cruzados, as validações cruzadas e os mapas de cokrigagens entre a PRO *versus* atributos da planta e do solo. Desta forma, das cokrigagens atestadas pelo coeficiente de determinação espacial (r^2), a cokrigagem entre a PRO e a #POP (Quadro 10, Figura 22) evidenciou que 78,1% da variabilidade espacial da PRO foram explicadas pela variabilidade espacial da #POP. Assim, pôde-se constatar que nas regiões onde ocorreram os maiores valores da #POP (Figura 18c) foram mapeados os maiores valores da PRO (Figuras 18a e 22c), sendo o inverso verdadeiro.

Portanto, do ponto de vista espacial da área pesquisada, nos sítios em que a variedade de cana-de-açúcar SP 79 1011 apresentar uma POP variando entre 10,5 e 12,3 pl. m⁻², a PRO esperada estará compreendida entre 88,0 e 128,0 t ha⁻¹. Por outro lado, naqueles onde a POP estiver entre 8,0 e 9,9 pl. m⁻², a PRO esperada estará compreendida entre 33,0 e 74,0 t ha⁻¹. Para esta cokrigagem, o modelo ajustado foi o exponencial direto, com alcance de 357,3 m e um ADE médio (50,0%). Da mesma forma, a Figura 23 evidencia a cokrigagem entre a PRO e o BRI, sendo modelado um semivariograma do tipo gaussiano direto (Quadro 10; Figura 23), com 73,0 m de alcance da dependência espacial, e ADE alta (63,6%), explicando 23,4% da variabilidade espacial da PRO.

Na Figura 24 encontram-se o semivariograma cruzado, a validação cruzada e o mapa de cokrigagem da PRO em função da #MO1. Ajustou-se o modelo exponencial direto para o referido semivariograma cruzado, com alcance de 165,9 m e um ADE muito alto (99,3%), conforme Quadro 11. Neste sentido, foi constatado que a variabilidade espacial da #MO1 explicou 65,3% da variabilidade espacial da PRO, de maneira que nos sítios onde ocorreram os mais elevados valores da #MO1 (16,4 a 19,0 g dm⁻³) foram justamente os sítios onde a PRO apresentou os mais elevados valores (88,0 a 128,0 t ha⁻¹), ao passo que nos sítios onde ocorreram os mais baixos valores da #MO1 (12,8 a 15,5 g dm⁻³) foram justamente os locais onde a PRO apresentou os menores valores (35,0 a 75,0 t ha⁻¹). Assim, foi observada uma alta dependência espacial da PRO com a #MO1, indicando a importância das práticas agrícolas que visem a elevação dos teores desse colóide no solo, uma vez que ficaram evidenciados

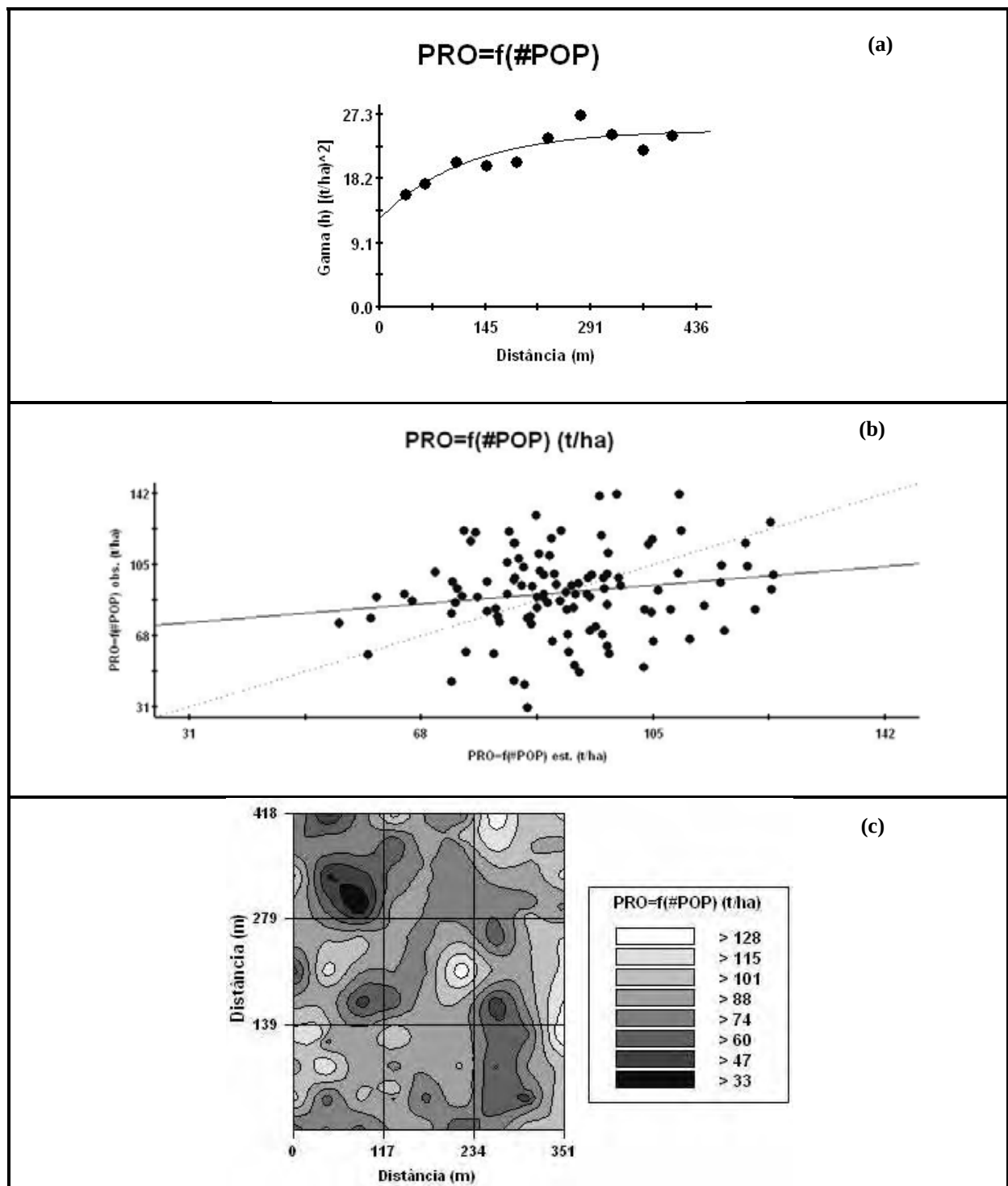


Figura 22: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função da população de plantas em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanópolis-SP)

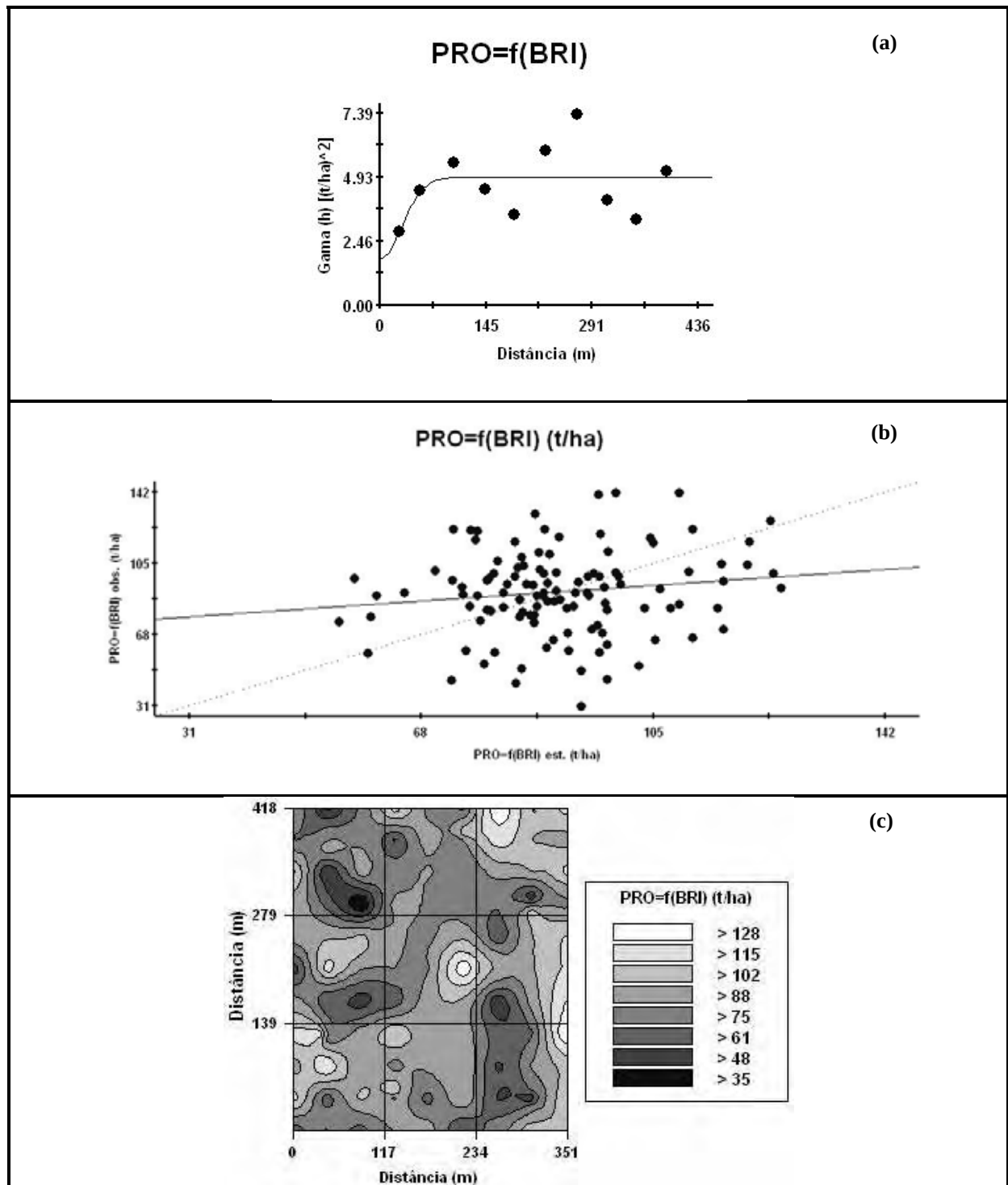


Figura 23: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função do BRI em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

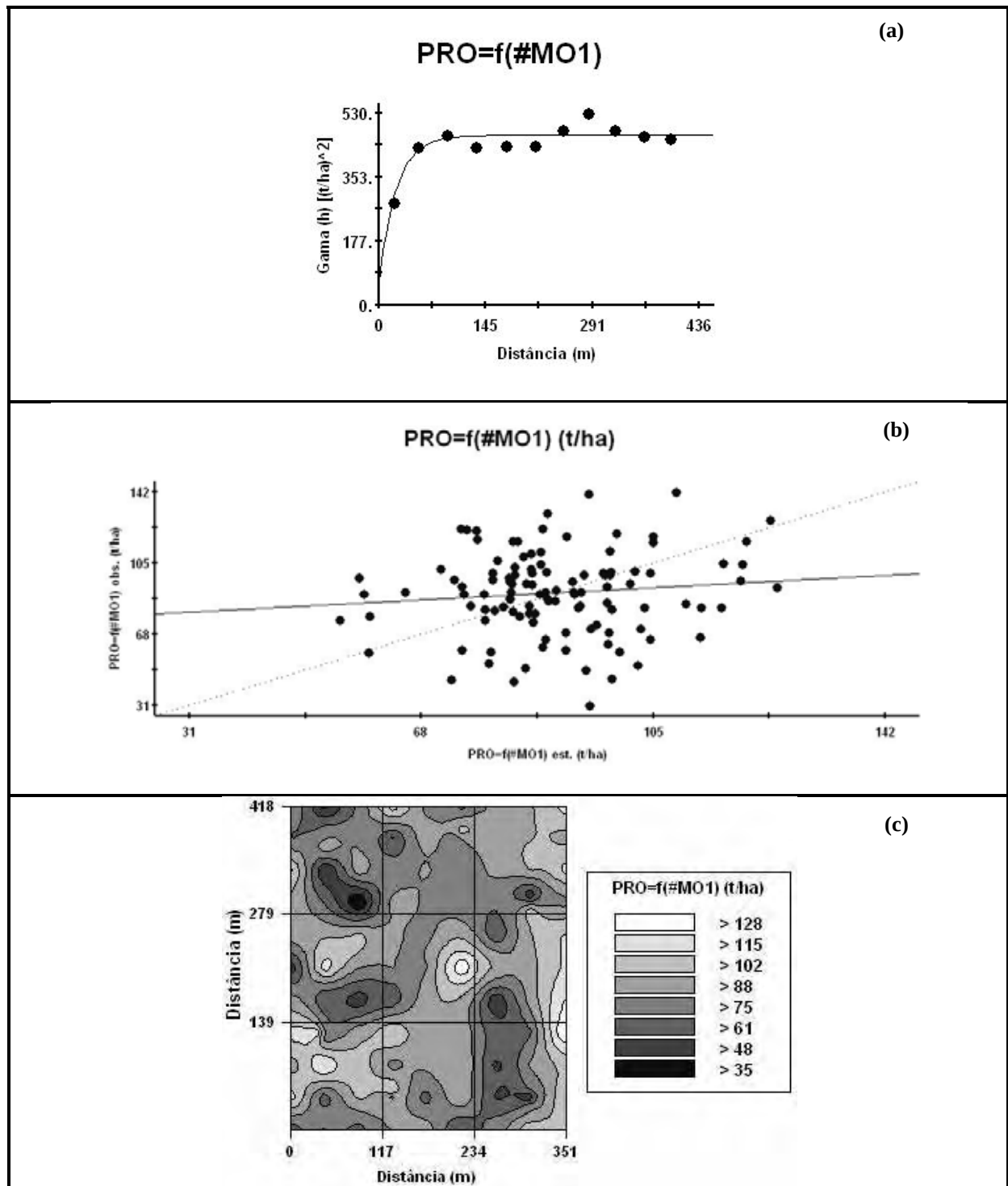


Figura 24: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função da MO1 em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

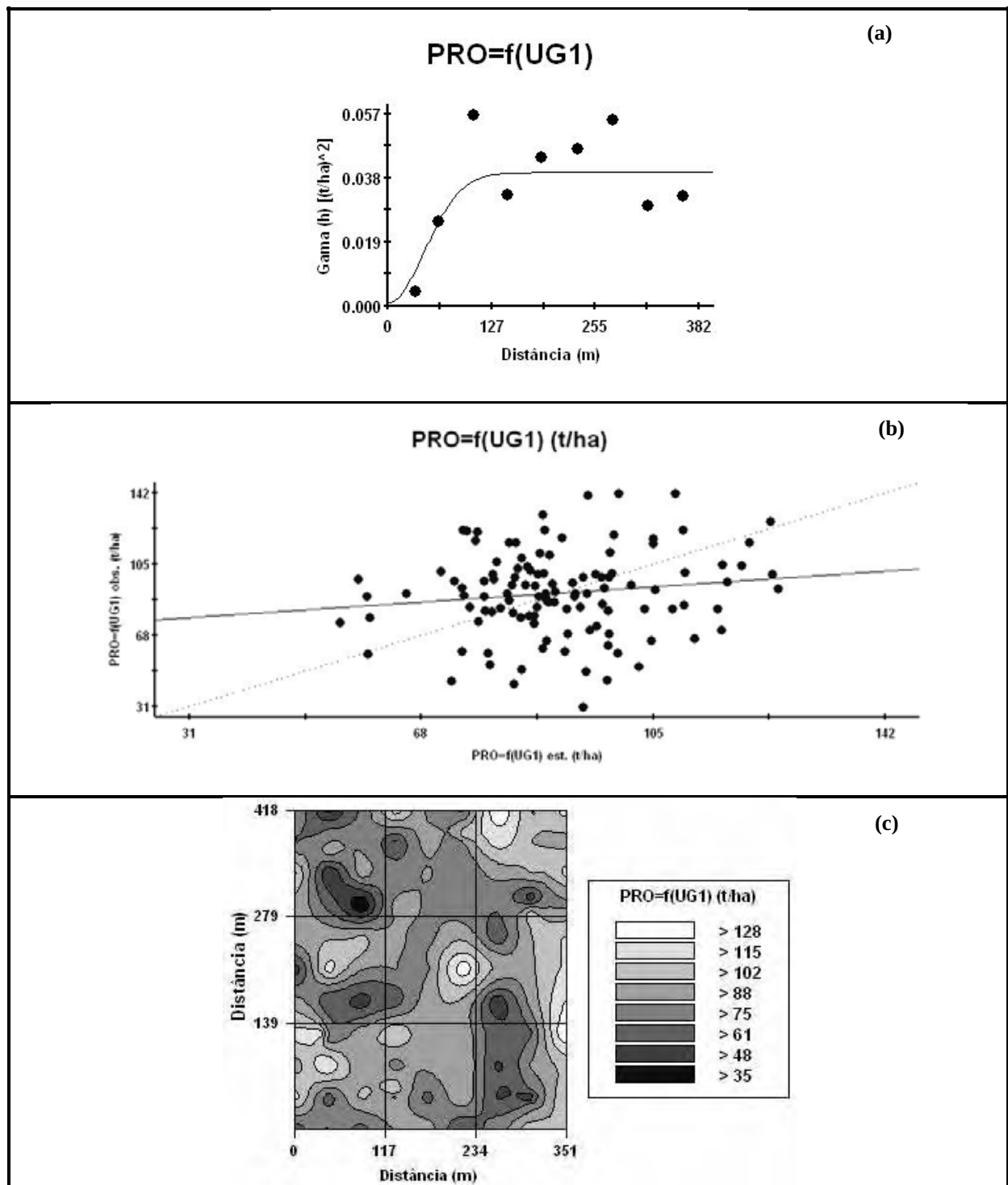


Figura 25: Semivariograma cruzado, validação cruzada e mapa de cokrigagem da produtividade da cana-de-açúcar em função da UG1 em um Argissolo Vermelho eutrófico da Fazenda Caiçara (Suzanápolis-SP)

seus benefícios químicos, físicos e biológicos, que proporcionaram aumento na produtividade da cultura da cana-de-açúcar. E por fim, à cokrigagem entre a PRO e UG1, também foi seus benefícios químicos, físicos e biológicos, que proporcionaram aumento na produtividade da cultura da cana-de-açúcar. E por fim, à cokrigagem entre a PRO e UG1, também foi modelado um semivariograma do tipo exponencial direto (Quadro 10; Figura 25), com 110,0 m de alcance da dependência espacial, e dependência muito alta (97,5%), sendo que o ajuste resultante conseguiu explicar 61,6% da variabilidade espacial da PRO.

Portanto, sob o ponto de vista espacial e agrônômico, pôde-se constatar que tanto a população de plantas (POP) quanto o percentual de sólidos solúveis totais (BRI), o teor de matéria orgânica (MO1) e a umidade gravimétrica (UG1) apresentaram-se como bons indicadores da produtividade de colmos de cana-de-açúcar (PRO). Entretanto, quando considerado apenas os atributos da planta, a POP se sobressaiu em função do seu maior r^2 , assim como a MO1 quando analisado os atributos físico-químicos do solo pesquisado.

Como a interação entre as características químicas não é constante em todos os pontos de uma lavoura, pode haver diferenças de produtividade dentro de uma propriedade, conforme constatado pelos dados ora apresentados. Tal fato indicou heterogeneidade espacial na área estudada, sugerindo a necessidade de se definir diferentes glebas de manejo a fim de otimizar a produção agrícola por meio de intervenções que levem em conta as limitações e potencialidades de cada gleba.

5 CONCLUSÕES

1. No solo, a correlação negativa entre o teor de matéria orgânica e a resistência à penetração indicou a necessidade de se empregar um manejo que proporcione o aumento desse colóide orgânico e, por conseguinte, mantenha um bom ambiente para o desenvolvimento da cana-de-açúcar,
2. Para que se obtenha a máxima produtividade de 104 t ha^{-1} de colmos, as correlações diretas, de Pearson e espaciais, entre a produtividade de cana-de-açúcar com a população de plantas e com o teor de matéria orgânica do solo, indicaram os respectivos valores ideais de 14,6 plantas por metro quadrado e de 23 g dm^{-3} ,
3. Do ponto de vista espacial, o pH do solo apresentou-se como um potencial indicador de sua qualidade química,
4. Visando-se auxiliar futuros trabalhos voltados à agricultura de precisão, os quais empreguem os mesmos atributos do solo e da planta que os do presente estudo, os alcances das dependências espaciais recomendados deverão estar compreendidos entre 55 e 288 metros.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo franco arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 275-282, 2003.
- ALMEIDA JÚNIOR, A. B. **Adubação orgânica em cana-de-açúcar**: efeitos no solo e na planta. 2010. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.
- 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: ESTUDO Agrotécnico da Usina Vale do Paraná S/A Álcool e Açúcar – Suzanópolis (SP). Ilha Solteira, 2009. v. 3, 107 p.
- ARMESTO, M. V. **Variabilidade espacial e temporal da erosión en solos de cultivo**. 1999. 118 f. Tese (Doutorado)– Faculdade de Ciências, Universidade de La Coruña, Coruña, 1999.
- ARSHAD, M. A.; LOWER, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141. (Special publication, 49).
- BAYER, C.; MIELNICZUCK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. et al. **Fundamentos da matéria orgânica do solo**: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. Cap. 2, p. 1-636.
- 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.
- 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, DF, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, 2002.
- CARVALHO, L. A.; NETO, V. J. M.; SILVA, L. F.; PEREIRA, J. G.; NUNES, W. A. G. A.; CHAVES, C. H. C. Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante-MS. **Agrarian**, v. 1, p. 7-22, 2008.

CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A. (Ed.). **Ecofisiologia de culturas extrativistas: cana-de-açúcar, seringueira, coqueiro, dendeneiro e oliveira**. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. 138 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Indicadores da agropecuária**. Brasília: CONAB, 2010. 66 p.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA DE AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CONSECANA. **Manual de instruções**. 4. ed. Piracicaba, 2003. 115 p.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.

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

CORÁ, J. E. **The potencial for site-specific management of soil and corn yield variability induced by tillage**. 1997. 104 f. These (Docutor) – Faculty de Agronomy, Michigan State University, East Lansing, 1997.

COSTA, M. J.; ROSA JUNIOR, E. J.; ROSA, Y. B. C. J.; SOUZA, L. C. F.; ROSA, C. B. J. Atributos químicos e físicos de um LATOSSOLO sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v.29, supl., p.701-708, 2007.

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.

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.

DURIGON, R. **Aplicação de técnicas de manejo localizado na cultura do arroz irrigado (*Oryza sativa* L.)**. 2007. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

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

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – Embrapa. **Manual de**

métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1979. 247 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. de A. **Cana-de-açúcar.** Campinas: Instituto Agrônomo & Fundação IAC, 2008. p. 31 - 44.

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

FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do solo.** Lavras: Universidade Federal de Lavras, UFLA/FAEPE, 2001. (Textos Acadêmicos).

GENRO JÚNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 477-484, 2004.

GOMES, G. (Ed.). **Engenho e arquitetura.** Recife: Massangana, 2006. 411 p.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, A. P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 1, p. 155-164, 1999.

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

HOERBE, D. **Manejo da cultura do arroz irrigado utilizando técnicas de agricultura de precisão.** 2009. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

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

MACHADO, L. O.; LANA, Â. M. Q.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 591-599, 2007.

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

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

MOLIN, J. P.; VIEIRA JUNIOR, P. A.; DOURADO NETO, D.; FAULIN, G. di C.; MASCARIN, L. Variação espacial na produtividade de milho safrinha devido aos

macronutrientes e à população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 6, n. 3, p. 309-324, 2007.

MONTEZANO, Z. F.; CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 5, p. 839-847, 2006.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. 11. ed. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van.; 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.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. 7. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap. 2, p. 49-135.

ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F. F. S.; GIOIA, M. T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 2, p. 283-293, 2009.

SANTOS, A. C.; VILELA, L. C.; BARRETO, P. M.; CASTRO, J. G. D.; SILVA, J. E. C. Alterações de atributos químicos pela calagem e gessagem superficial com o tempo de incubação. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 77-83, 2010.

SCHLOEDER, C. A.; ZIMMERMAN, N. E.; JACOBS, M. J. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 65, n. 2, p. 470-479, 2001.

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

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

SILVA, M. A. Interação genótipo x ambiente e estabilidade fenotípica de cana-de-açúcar em ciclo de cana de ano. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 109-117, 2008.

SILVA, P. C. M.; CHAVES, L. H. G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em ALISSOLOS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 431-436, 2001.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; TEIXEIRA, M. M. Variabilidade espacial de

atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 1, p. 15-22, 2010.

SOUZA, D. M. G. S.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. V. A acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo: a acidez do solo e sua correção**, Viçosa, 2007. Cap. 5, p. 205-274, 2007a.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. B. Variabilidade espacial de atributos químicos em um ARGISSOLO sob pastagem. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 4, p. 589-596, 2008b.

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.; CAMPOS, M. C. C. CAVALCANTE, Í. H. L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134, 2006.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; COLET, M. J.; RODRIGUES, L. H. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; MANDONI, R. J. A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 840-847, 2010b.

SOUZA, Z. M.; 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, 2008a.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 1, p. 48-56, 2010a.

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

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

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 2, p. 229-235, 1991.

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 - UNICA. **Produção de cana-de-açúcar no Brasil**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 20 Set. 2009.

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

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

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 2004. 449 p.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-53.

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

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

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

VITTI, G. C.; MAZZA, J. A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição de cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 97, p. 1-16, 2002.

WATANABE, R. T.; FIORETTO, R. A.; HERMANN, R. Propriedades químicas do solo e produtividade da cana-de-açúcar em função da adição da palhada de colheita, calcário e vinhaça em superfície (sem mobilização). **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 25, n. 2, p. 93-100, 2004.

WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; MUNIZ, A. S. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico influenciadas por sistema de preparo de solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. **Acta Scientiarum, Agronomy**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1255-1264, 2002.