

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**ATRIBUTOS DO SOLO E COMPONENTES PRODUTIVOS DA
CULTURA DA PUPUNHA: UMA ABORDAGEM LINEAR,
GEOESTATÍSTICA E MULTIVARIADA**

Rafael Montanari
Engenheiro Agrônomo

**ILHA SOLTEIRA
NOVEMBRO – 2015**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**ATRIBUTOS DO SOLO E COMPONENTES PRODUTIVOS DA
CULTURA DA PUPUNHA: UMA ABORDAGEM LINEAR,
GEOESTATÍSTICA E MULTIVARIADA**

Rafael Montanari

Engenheiro Agrônomo

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia –
UNESP - Campus de Ilha Solteira para a
obtenção do título de LIVRE-DOCENTE em
Geoestatística Aplicada à Agricultura

Ilha Solteira–SP

Novembro/2015

DEDICO

A DEUS

Aos meus pais, “DORVAIR MONTANARI e MARIA DO ROSÁRIO ANDRÉ MONTANARI”, que me educaram e me deram a oportunidade para mais esta conquista em minha vida, que nos momentos difíceis, me compreenderam e me incentivaram, demonstrando todo carinho, respeito, confiança e amor que sentem por mim. **Amo vocês!**

OFEREÇO

A minha filha, SOFIA TOMAZ MONTANARI. Deus te abençoe.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me permitiu alcançar este enorme sonho em minha vida e por me dar forças para superar as dificuldades.

À minha esposa ***Pamela Kerlyane Tomaz Montanari***, que MUITO ME AJUDA. **Te Amo MUITO.** Deus te Abençoe.

Ao prof. Dr. Samuel Ferrari pela parceria entre a UNESP, Campus de Registro com o Campus de Ilha Solteira.

Aos meus orientados de Mestrado, Elizeu de Souza Lima, Lenon Henrique Lovera, Adrianly Rodrigues Correa, Mariele Squizato, Ligia Maria Lucas Videira e Paulo Ricardo Teodoro que muito me ajudaram para a realização de minha Livre-docência.

Ao meu irmão Alexandre Montanari.

Aos meus grandes amigos Hernandes Andrade Queiroz e Anderson Secco.

Às pessoas especiais que partiram, e que agora me auxiliam nos caminhos da vida em estâncias superiores.

RESUMO

Por se tratar de um cultivo perene, a pupunheira se torna bastante exigente quanto aos atributos físico-químicos do solo, refletindo de forma mais imediata ao efeito causado pelo manejo que é adotado. O objetivo do presente trabalho foi identificar por meio de análises lineares, geoestatísticas e multivariadas os atributos do solo que melhor expliquem a variabilidade linear e espacial da cultura da pupunha em Registro, SP. Em 2014, foi analisado os componentes produtivos da cultura da pupunha em função de alguns atributos físicos e químicos de um Cambissolo eutrófico. Foi demarcada a malha geoestatística, com 54 pontos amostrais, numa área de 1 ha. Quanto ao ponto de vista linear, diâmetro do caule e altura da planta foi explicada pelo modelo potencial direto e exponencial, o que foi altamente significativa, devido à resistência mecânica à penetração. A classificação em grupos foi feita por três métodos: método de agrupamentos hierárquico, método não-hierárquico k-means e análise de componentes principais. Assim, pode se concluir que a análise multivariada por meio da análise de componentes principais permitiu identificar dois grupos que explicam 67,8 % da variabilidade total dos dados, onde estes grupos são constituídos pelos atributos físicos densidade do solo, porosidade total, umidade gravimétrica e resistência mecânica à penetração que se mostraram com maior poder de explicação da variação do diâmetro do caule da pupunha. Já para os atributos químicos a classificação em grupos foi feita por três métodos: método de agrupamentos hierárquico, método não-hierárquico k-means e análise de componentes principais. Pode se concluir que a análise multivariada por meio da análise de componentes principais permitiu identificar dois grupos que explicam 56,62 % da variabilidade total dos dados, onde estes grupos são constituídos pelos atributos químicos matéria orgânica, potássio, magnésio, alumínio, capacidade de troca catiônica e saturação por alumínio se destacassem como componentes principais que se mostraram com maior poder de explicação da variação do diâmetro do caule e o número de perfilhos da pupunha.

Termos de indexação: manejo do solo, qualidade física e química do solo, agricultura de precisão, krigagem, *Bactris gasipaes* Kunth, análise multivariada

ABSTRACT

Because it is a perennial crop, peach palm becomes quite demanding as physico-chemical soil properties, reflecting more immediately the effect caused by the management that is adopted. The objective of this study was to identify through linear analysis, geostatistics and multivariate soil attributes that best explain the linear and spatial variability of the culture of peach palm in Registro, SP. In 2014, was analyzed productive components of the culture of peach palm due to some physical and chemical attributes of a eutrophic Cambisol. It was demarcated the geostatistical grid with 54 sampling points in an area of 1 ha. As the linear point of view, stem diameter, and plant height was explained by the potential direct and exponential model, which was highly significant due to the mechanical resistance. Classification into groups was made by three methods: method of hierarchical clusters, non-hierarchical k-means method and principal component analysis. Thus, it can be concluded that the multivariate analysis using principal component analysis allowed us to identify two groups that explain 67.8% of the total variability of the data, where these groups are made up of the physical attributes of the soil density, total porosity, humidity and gravimetric penetration resistance that demonstrated greater explanatory power of the variation of peach palm stem diameter. As for the chemical attributes the classification in groups was made by three methods: method of hierarchical clusters, non-hierarchical k-means method and principal component analysis. It can be concluded that the multivariate analysis using principal component analysis allowed us to identify two groups that explain 56.62% of the total variability of the data, where these groups are made up of the chemical attributes organic matter, potassium, magnesium, aluminum, exchange capacity cation and aluminum saturation stood out as main components that demonstrated greater explanatory power of the variation of stem diameter and the number of tillers of peach palm.

Index terms: soil management, physical and chemical quality of the soil, precision farming, kriging, *Bactris gasipaes* Kunth, multivariate analysis

Sumário

1 JUSTIFICATIVA.....	14
2 INTRODUÇÃO	17
2.1 Os solos.....	17
2.2 O Vale do Ribeira.....	22
2.3 Aspectos gerais da cultura da pupunha.....	23
2.4 Atributos do solo	24
2.4.1 Solo agrícola ideal.....	24
2.4.1.1 Atributos físicos do solo	24
2.5.1.2 Atributos químicos do solo.....	42
Quadro 1: Valores indicativos de pH e termos usuais para descrever os intervalos de pH	46
2.6 A estatística clássica e a geoestatística na pesquisa agrônômica	47
2.6.1 Métodos estatísticos para análise das variáveis da cultura e do solo	48
2.6.1.1 Estatística descritiva.....	48
2.6.1.2 Geoestatística.....	48
Figura 1. Características do semivariograma	50
2.6.1.2.2 Krigagem	53
Figura 2. Krigagem pontual (A) e krigagem em blocos (B).....	54
2.6.1.2.3 Semivariograma cruzado	55
2.6.1.2.4 Co-krigagem.....	55
2.6.1.2.5 Exclusão da tendência quando da não-formação da estacionariedade	56
Figura 3. Exemplo de semivariogramas: (a) não-estacionário, e (b) estacionário.	56
2.6.1.2.6 Análise multivariada	58
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1 Análise descritiva dos dados	63

4.1.1 Atributos dos componentes produtivos da cultura da pupunha e dos físicos do solo	63
Quadro 2. Análise descritiva dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP	65
4.1.2 Atributos químicos do solo	67
Quadro 3. Análise descritiva dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP	68
4.2 Análise de regressão	69
4.2.1 Matriz de correlação e equação de regressão entre os componentes produtivos da cultura da pupunha e dos atributos físicos do solo	69
Quadro 4. Matriz de correlação linear simples entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP.....	70
Figura 4. Equação de regressão entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP.....	71
4.2.2 Matriz de correlação e equações de regressão entre os componentes produtivos da cultura da pupunha e dos atributos químicos do solo	73
Quadro 5. Matriz de correlação linear simples entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP	74
Figura 5. Equação de regressão entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP	74
4.3 Análise geoestatística.....	75
4.3.1 Análise dos componentes produtivos da pupunha e dos atributos físicos do solo ...	75
Quadro 6. Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP.....	75
Figura 6. Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem para o número de folhas em função da resistência à penetração para a profundidade de 0,00-0,10 m num Cambissolo em Registro, SP	77
4.3.2 Análise dos componentes produtivos da pupunha e dos atributos químicos do solo	77
Quadro 7. Parâmetros de semivariogramas simples e cruzado dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP	79

Figura 7. Semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem do número de folhas da pupunha em função do K de 0,00-0,10 e CTC de 0,10-0,20 num Cambissolo em Registro, SP	80
4.4 Análise multivariada dos atributos estudados	80
4.4.1 Análise dos componentes produtivos da cultura da pupunha e dos atributos físicos	80
Quadro 8. Resumo dos componentes principais (CP1 e CP2) da análise multivariada do caractere produtivo da pupunha (Diam) e de alguns atributos físicos (RP, UG, DS, PT e Argila) de um Cambissolo Eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.....	81
Figura 9. Dispersão (<i>gráfico biplot</i>) dos caracteres do componente produtivo da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.	83
Figura 10. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo o diâmetro do caule da pupunha, a densidade do solo, a porosidade total, a umidade gravimétrica e a resistência mecânica à penetração.	84
Quadro 9. Médias do atributo de planta (Diam) e solo (RP, PT, UG e DS) dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos k-means	84
Figura 11. Médias padronizadas do diâmetro do caule da pupunha (diam) e alguns atributos físicos do solo (DS, PT, UG, RP e Argila) para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica k-means.....	85
4.4.1 Análise dos componentes produtivos da cultura da pupunha e dos atributos químicos	86
Quadro 10. Resumo dos componentes principais (CP1 e CP2) da análise multivariada dos caracteres produtivos da pupunha (Diam e Perf) e de alguns atributos Químicos (MO, K, Mg, Al, CTC e m) de um Cambissolo Eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.....	86
Figura 12. Distribuição espacial dos grupos gerados do diâmetro do caule e Perfilhos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.....	87
Figura 13. Dispersão (<i>gráfico biplot</i>) dos caracteres dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo Eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.	88
Quadro 11. Médias dos atributos de planta (Diam e Perf) e solo (MO, K, Mg, Al, CTC e m%) dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos k-means.....	89
Figura 14. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo o diâmetro do caule e Perfilhos da pupunha, a matéria orgânica,	

o potássio, o magnésio, o Alumínio, a Capacidade de troca catiônica e a saturação por alumínio	89
Figura 15. Médias padronizadas do diâmetro do caule e do Perfilhos da pupunha (diam e Perf) e alguns atributos químicos do solo (MO, K, Mg, Al, CTC e m) para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica k-means.....	90
Figura 16. Biplot para os componentes da cultura da pupunha e dos atributos físicos do solo	91
Figura 17. Biplot para os componentes da cultura da pupunha e dos atributos químicos do solo	91
5 CONCLUSÕES.....	92
6 REFERÊNCIAS	93
Anexo 1. Localização da área experimental.....	105
Anexo 2. Grid de amostragem.....	106

Lista de Figuras

Figura 1. Características do semivariograma	50
Figura 2. Krigagem pontual (A) e krigagem em blocos (B).....	54
Figura 3. Exemplo de semivariogramas: (a) não-estacionário, e (b) estacionário.	56
Figura 4. Equação de regressão entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP	71
Figura 5. Equação de regressão entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP	74
Figura 6. Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem para o número de folhas em função da resistência à penetração para a profundidade de 0,00-0,10 m num Cambissolo em Registro, SP	77
Figura 7. Semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem do número de folhas da pupunha em função do K de 0,00-0,10 e CTC de 0,10-0,20 num Cambissolo em Registro, SP	80
Figura 9. Dispersão (<i>gráfico biplot</i>) dos caracteres do componente produtivo da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.	83
Figura 10. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo o diâmetro do caule da pupunha, a densidade do solo, a porosidade total, a umidade gravimétrica e a resistência mecânica à penetração.	84
Figura 11. Médias padronizadas do diâmetro do caule da pupunha (diam) e alguns atributos físicos do solo (DS, PT, UG, RP e Argila) para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica k-means.....	85
Figura 12. Distribuição espacial dos grupos gerados do diâmetro do caule e Perfis da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.....	87
Figura 13. Dispersão (<i>gráfico biplot</i>) dos caracteres dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo Eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.	88
Figura 14. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo o diâmetro do caule e Perfis da pupunha, a matéria orgânica,	

o potássio, o magnésio, o Alumínio, a Capacidade de troca catiônica e a saturação por alumínio	89
Figura 15. Médias padronizadas do diâmetro do caule e do Perfilhos da pupunha (diam e Perf) e alguns atributos químicos do solo (MO, K, Mg, Al, CTC e m) para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica k-means.....	90
Figura 16. Biplot para os componentes da cultura da pupunha e dos atributos físicos do solo	91
Figura 17. Biplot para os componentes da cultura da pupunha e dos atributos químicos do solo	91

Lista de Quadros

Quadro 1. Valores indicativos de pH e termos usuais para descrever os intervalos de pH.....	46
Quadro 2. Análise descritiva dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP	65
Quadro 3. Análise descritiva dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP.....	68
Quadro 4. Matriz de correlação linear simples entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP.....	70
Quadro 5. Matriz de correlação linear simples entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP	74
Quadro 6. Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP.....	75
Quadro 7. Parâmetros de semivariogramas simples e cruzado dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP.....	79
Quadro 8. Resumo dos componentes principais (CP1 e CP2) da análise multivariada do caractere produtivo da pupunha (Diam) e de alguns atributos físicos (RP, UG, DS, PT e Argila) de um Cambissolo Eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.....	81
Quadro 9. Médias do atributo de planta (Diam) e solo (RP, PT, UG e DS) dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos k-means.	84
Quadro 10. Resumo dos componentes principais (CP1 e CP2) da análise multivariada dos caracteres produtivos da pupunha (Diam e Perf) e de alguns atributos Químicos (MO, K, Mg, Al, CTC e m%) de um Cambissolo Eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.	86
Quadro 11. Médias dos atributos de planta (Diam e Perf) e solo (MO, K, Mg, Al, CTC e m) dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos k-means.....	89

1 JUSTIFICATIVA

Sabendo-se que a agricultura atual necessita de elevadas produtividades para um crescimento contínuo, a tecnologia com uso da Agricultura de Precisão é de suma importância para o crescimento da mesma. Este procedimento de gerenciamento da agricultura serve para diminuir perdas e custos, elevar a produtividade e aumentar a qualidade dos produtos (MONTANARI, 2009). Mas para isso, conhecer o solo é muito importante para aplicação destas tecnologias, pois este sofre inúmeras variações ao longo do tempo, devido aos fatores de formação do solo como, clima, relevo, organismo e material de origem, que variam muito e de forma significativa, causando assim aos solos uma elevada heterogeneidade, ou seja, uma grande variação espacial. Para quantificar estas variações são utilizadas ferramentas da pedologia, da estatística descritiva e da geoestatística (CORREA et al., 2015; SILVA et al., 2015)

Os altos índices de produtividade e a maior rentabilidade agrícola dependem especificamente da manutenção da capacidade produtiva dos solos. Assim práticas agrícolas, tal como o plantio direto, objetiva proporcionar modificações nos teores de nutrientes, estrutura, porosidade, agregação e densidade do solo, bem como na infiltração e disponibilidade de água, com vistas a proporcionar o adequado crescimento radicular das culturas (WUTKE et al., 2000). As raízes são imprescindíveis no processo de absorção de água e nutrientes. Os estudos sobre o crescimento radicular, sua concentração, distribuição e atividade (taxa de crescimento e longevidade) no perfil do solo são de extrema importância à produtividade vegetal (TAYLOR; ARKIN, 1981). Camadas compactadas de subsuperfície são mais prejudiciais ao desenvolvimento radicular das plantas do que perfis homogêneos com elevados valores de resistência mecânica à penetração. Existem ainda, outros fatores inter-relacionados que influenciam no desenvolvimento radicular, como a continuidade dos poros, fertilidade, presença de microorganismos patogênicos ou simbióticos, oxigenação e quantidade de água disponível no solo. Com o intenso cultivo utilizado na agricultura, a compactação do solo vem surgindo nos ambientes de produção, onde os sistemas convencionais de preparo do solo pulverizam em excesso a camada arável causando a formação de crostas superficiais sobre o horizonte Ap, assim como camadas coesas e compactadas, tendo como solução para tal compactação o uso de cobertura vegetal sobre a superfície do solo, utilizando-se do sistema plantio direto (SPD) (MONTANARI, 2009).

A pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth) é uma palmeira originária da Região Amazônica e, tem se mostrado uma excelente opção econômica para os produtores rurais, para a produção do palmito, devido ao seu potencial de mercado, além da promoção do reflorestamento sustentável e cobertura vegetal do solo para o vale do Ribeira (CHAIMSOHN, 2000).

Quando a compactação começa a limitar o desenvolvimento vegetal é necessário que medidas corretivas sejam adotadas, com a finalidade de quebrar a camada compactada, o que melhorará em curto prazo, as condições nas quais as plantas estão se desenvolvendo. Algumas práticas utilizadas no preparo do solo podem atenuar a sua compactação, dentre elas a aração e a gradagem profundas, a subsolagem e a rotação de culturas incluindo, se possível, plantas descompactadoras do solo (HANKANSSON et al., 1988). Na prática, tem sido adotados o sistema plantio direto, o cultivo mínimo, a rotação de culturas, a sucessão de culturas e a adubação verde, como formas de resgatar a auto sustentabilidade da exploração agrícola e, por conseguinte, a preservação do meio ambiente (WUTKE et al., 2000; McBRATNEY et al., 2014). Por outro lado, como no sistema convencional o perfil de compactação do solo é distinto do plantio direto, tal fato faz com que o agricultor seja obrigado a movimentá-lo pela aração e/ou gradagem, podendo ocasionar uma heterogeneidade do solo.

A ordem dos Cambissolos abrange solos minerais com características bastante variáveis, mas que sempre apresentam textura média ou mais fina e ausência de grande desenvolvimento pedogenético. São solos com pequena profundidade, elevado teor de minerais primários (minerais herdados da rocha), presença significativa de fragmentos de rocha na massa do solo e outros indícios do intemperismo incipiente do solo. Em alguns casos, a presença de maiores quantidades de minerais primários nos Cambissolos contribui para uma maior reserva nutricional para as plantas, especialmente importante em cultivos florestais e perenes. Os Cambissolos apresentam cor mais viva, maiores teores de argila e estruturação mais desenvolvida nos horizontes subsuperficiais em relação àqueles materiais puramente herdados da rocha, o que os torna em muitos casos aptos à utilização agrícola, uma vez mitigado alguns fatores restritivos, tais como pedregosidade, pequena profundidade e declividade excessiva. Os Cambissolos estão distribuídos no estado de São Paulo associados a condições variadas de materiais de origem, relevo, vegetação e clima. Suas ocorrências mais expressivas, porém, estão na província geomorfológica do Planalto Atlântico, em condições de topografia mais íngreme ou relevo mais dissecado. Nestas condições, estes solos têm perfis menos profundos e pedregosidade ou cascalhos na superfície ou na massa do solo.

Cambissolos tendem a ser mais homogêneos, são bastante úmidos, solos de várzea. Assim provavelmente tendem a possuir baixa variabilidade linear e espacial dos componentes produtivos da pupunha e dos atributos físicos e químicos do solo. Dessa maneira, se torna mais viável a utilização das zonas específicas de manejo do solo, incrementando na produtividade da pupunha.

A heterogeneidade é uma propriedade inerente do solo que tipifica sua anisotropia. Numa paisagem natural, os solos apresentam ampla variabilidade dos seus atributos, tanto no sentido espacial como no volumétrico, resultante da interação dos processos que comandam os fatores de sua formação. Ademais, o solo cultivado possui fontes adicionais de heterogeneidade, originadas exclusivamente do efeito antrópico da agricultura (BECKETT; WEBSTER, 1971). Assim, tem-se, como postulado universal, que o uso do solo, com o passar do tempo, causa-lhe acentuada heterogeneidade. Esse aspecto foi observado, entre outros, para o desmatamento do solo (SANTOS; VASCONCELOS, 1987); para a sistematização da terra, desencadeada por meio do nivelamento, visando-se aumentar a eficácia da irrigação (KNIGHTON; JAMES, 1985); para a prática agrícola que envolve o plantio direto e a rotação de culturas (O'HALLORAN et al., 1985); para os locais onde os fertilizantes têm sido aplicados a lanço e/ou na linha de cultivo (MELSTED; PECK, 1973) e em diferentes usos e manejos do solo (MONTANARI, 2009).

Segundo os princípios básicos da experimentação estabelecidos pelo método estatístico clássico, a variabilidade do solo ocorre de forma inteiramente aleatória, admitindo-se que seus atributos possuam distribuição de frequência do tipo normal (SANTOS; VASCONCELOS, 1987). Entretanto, vários estudos têm relatado que os atributos do solo apresentam intensa dependência espacial (MONTANARI et al., 2012) necessitando, portanto, de uma análise geoestatística.

A presença da dependência espacial nos atributos do solo foi a mola propulsora que alavancou o desenvolvimento da geoestatística como ciência. Dessa forma, foi observado que para os dados de concentração de ouro, originados das minerações de Johannesburgo (África do Sul), não havia solução de continuidade às suas variâncias se não fosse considerada a distância entre as amostras. Baseado nestas observações, Matheron (1962) desenvolveu a teoria das Variáveis Regionalizadas, a qual contém os princípios da geoestatística. Segundo tal teoria, os valores de um atributo do solo estão de alguma forma, relacionados com a sua

distribuição espacial. Sendo assim, observações tomadas a curtas distâncias devem ser mais semelhantes em magnitude do que aquelas mais distantes.

Atualmente, a pesquisa da ciência do solo tem-se apoiado intensamente na utilização da geoestatística, que, juntamente com a estatística clássica, formaram uma dupla de extraordinária importância agrônômica devido às inúmeras respostas dadas às mais variadas questões existentes que, até então, eram ignoradas. Dentre a importância da geoestatística, podem ser destacados, entre outros, os seguintes aspectos: 1) determinação da dimensão da parcela experimental de campo, dada pelo poder de alcance do semivariograma; 2) estimativa de um atributo do solo de difícil determinação, a partir de outro qualquer cuja determinação seja fácil, por meio do semivariograma cruzado e da co-krigagem, e 3) viabilização da agricultura de precisão.

Neste sentido, nas dependências da Fazenda de Ensino e Pesquisa da UNESP/Campus de Registro, durante o ano agrícola 2013/2014 o presente trabalho objetivou avaliar, com recursos da estatística clássica, da geoestatística e multivariada, a dependência linear e espacial da produtividade e componentes de produção da pupunha com atributos do solo, visando-se implementar os seus aspectos de manejo e conservação, com vistas a proporcionar zonas específicas de manejo.

2 INTRODUÇÃO

2.1 Os solos

Conforme Bigarella et al. (1994), o termo solo é, às vezes, aplicado erroneamente a qualquer tipo de alteração. Refere-se apenas à parte do manto de intemperismo que sofreu decomposição e modificações intensas, tornando-o capaz de comportar o desenvolvimento de vegetais superiores. O solo é constituído direta ou indiretamente de produtos de intemperização das rochas. Em menor escala, resulta da ação de organismos e de detritos orgânicos decompostos da cobertura vegetal.

No sentido mais restrito, solo é um material e/ou inconsolidado, poroso, finamente granulado, com natureza e propriedades particulares, herdadas da interação de processos pedogenéticos com fatores ambientais, envolvendo as variáveis: material de origem, clima, organismos vivos, relevo e tempo. Desse modo, os solos são capazes de dar sustentação à vida de vegetais terrestres superiores.

O desenvolvimento pleno do solo constitui um processo muito lento. Inicialmente, a parte superior do manto, seja residual ou transportada, decompõe-se o suficiente para liberar nutrientes às plantas, possibilitando o crescimento de vegetais pioneiros e de pequeno porte. Nesse estágio, o solo é incipiente e de má qualidade agrícola, contendo grande quantidade de rocha desagregada e pouco alterada, tratando-se de um solo imaturo. À medida que são incorporados detritos orgânicos mortos parcialmente decompostos, o solo passa a fornecer nutrientes, ou seja, húmus (coloides orgânicos), os quais contêm carbono extraído do ar durante o desenvolvimento de plantas.

A matéria vegetal em decomposição produz ácidos húmicos que auxiliam na alteração das partículas do manto, bem como na lixiviação de algumas substâncias, translocando-as para níveis inferiores. Com a continuidade do processo, a composição do solo muda de forma progressiva, embora muito lentamente.

No caso de a erosão não perturbar a formação do solo, e haver pluviosidade suficiente para manter a decomposição química e a vegetação, o seu desenvolvimento é acelerado durante certo tempo. Gradualmente, o solo torna-se mais profundo, atingindo o estágio de maturidade ao perder grande parte do material mineral.

Quando um solo inicia sua evolução sobre o manto residual, ele é considerado incipiente, esquelético ou imaturo (predominam partículas grosseiras) refletindo o caráter da rocha subjacente. Por exemplo: na alteração de um granito, um solo imaturo é rico em argila formada pela intemperização do feldspato, além de conter ainda numerosos fragmentos de quartzo e de outros grãos minerais constituintes dessa rocha, os quais se encontram desintegrados, porém não alterados. O ferro derivado da biotita ou da hornblenda foi oxidado e confere à argila coloração amarelada. A argila contém absorvidas ainda certas substâncias bastante solúveis (p.ex. compostos de potássio).

As influências externas, no entanto, modificam o caráter original do solo e podem ser acentuadas ao ponto de imprimem características mais marcantes do que aquelas herdadas da rocha ou material original. Como fatores externos mais importantes, destacam-se o clima e a vegetação a ele relacionados. A pluviosidade é um fator externo de grande importância na determinação do tipo de solo. Lobeck (1939), citado por Bigarella et al. (1994), destaca o fato de que os solos da porção oriental úmida dos Estados Unidos pertencem a uma classe Pedalfer

e que praticamente todos aqueles do oeste semiárido a outra classe (Pedocal), apesar da diversidade das rochas das quais derivam. Os solos de uma região tendem, portanto, em longo prazo, a se adaptarem às condições, diminuindo as diferenças entre eles.

Independentemente de origem, passado e história geológica, os solos que atingem maturidade num ambiente são mais similares do que aqueles que procedem da mesma fonte, mas que permanecem imaturos por força de fatores locais.

Segundo Meurer (2000), no desenvolvimento da Ciência do Solo, o solo tem sido estudado e interpretado diferentemente à medida que os conhecimentos sobre a sua complexidade evoluíram. Destacam-se alguns conceitos que contribuíram significativamente para o conhecimento: a) o solo como produto de alteração das rochas e como corpos naturais organizados; b) o solo como meio para o desenvolvimento das plantas; c) o solo como meio capaz de armazenar e transformar resíduos, assim descritos:

a) solos como produto de alteração das rochas e como corpos naturais organizados - No final do século XVIII, com o desenvolvimento da ciência da geologia, os solos passaram a ser considerados como produtos de alteração das rochas, empregando-se métodos geológicos para a sua classificação. Surgiu, assim, a classificação dos solos de acordo com as rochas que lhes deram origem: solos graníticos, solos calcários, solos sedimentares, e assim por diante. A partir dos trabalhos realizados pelo geólogo russo Dokuchaev, na metade do século XIX, os solos passaram a ser reconhecidos como corpos naturais organizados, com características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, relacionadas aos processos e fatores que lhes deram origem;

b) solo como meio para o desenvolvimento das plantas – Desde a antiguidade, os povos preocupavam-se com a capacidade dos solos em produzir alimentos, pois deles dependia a sua sobrevivência. A classificação dos solos quanto a sua produtividade agrícola já era utilizada há mais de 4.000 anos, na China, para avaliar as posses individuais e os impostos a pagar ao governo. O conceito agrícola de solos e a qualificação das terras também já eram conhecidos no Império Romano.

Nesse sentido, o solo deveria prover um ambiente no qual as plantas pudessem se desenvolver em função da reserva de água e dos elementos minerais presentes no solo. Assim,

as raízes poderiam ancorar-se e crescer em um ambiente poroso, com oxigênio, ausência de elementos tóxicos, entre outros.

Pelo menos 16 elementos são considerados como essenciais para o crescimento das plantas. O carbono, o oxigênio e o hidrogênio, combinados na reação fotossintética, são obtidos do ar e da água. Eles constituem 90 % ou mais da massa produzida pelo vegetal.

Os restantes 13 elementos são obtidos do solo. Nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre são necessários em maiores quantidades e são denominados de macronutrientes. Os nutrientes requeridos pelas plantas em pequenas quantidades e, por isso, denominados de micronutrientes, são o boro, o cobre, o cloro, o ferro, o manganês, o molibdênio e o zinco;

c) o solo como meio capaz de armazenar e transformar resíduos – Nos últimos anos, tem aumentado o interesse na utilização do solo como meio alternativo para auxiliar no controle da poluição ambiental. Dessa forma, o solo vem sendo utilizado para descarte de resíduos com potencial poluente, como compostos de lixo, lodos de estações de tratamento, efluentes industriais, entre outros. Essa prática tem sido viável devido à capacidade do solo de inativar diversos íons e compostos orgânicos por adsorção, complexação ou precipitação. Os microorganismos do solo podem, também, decompor compostos e resíduos orgânicos e ter ação sobre organismos patogênicos. Assim, considerando a evolução histórica do conceito sobre solo e sua importância dentro da Ciência do Solo, um conceito de solo mais adequado e mais abrangente na atualidade pode ser: *“Solo: corpo natural da superfície terrestre, constituído de materiais minerais e orgânicos resultantes das interações dos fatores de formação (clima, organismos vivos, material de origem e relevo) com o passar do tempo, contendo matéria viva e em parte modificado pela ação humana, capaz de sustentar plantas, de reter água, de armazenar e transformar resíduos e suportar edificações”*.

Conforme Bigarella et al. (1994), junto à superfície, as rochas sofrem a ação contínua dos agentes atmosféricos e biológicos. Nos primeiros estágios da alteração, tem lugar uma fragmentação por meio de processos físicos, bem como pela hidratação dos minerais, além da ação de outros processos químicos mais complexos. A ação conjunta desses processos em si não daria origem a um solo propriamente dito, se não fosse a atividade de organismos como líquens, crustáceos e microorganismos. Torna-se acentuada devido ao desenvolvimento de

maior complexidade biológica que afeta cada vez mais o manto de alteração, com o acúmulo de detritos minerais e orgânicos.

Na alteração da rocha, verifica-se a remoção de elementos facilmente solúveis (Cl, S, Ca, Na), os quais são utilizados pelas plantas, ou lixiviados. Ao mesmo tempo, ocorre aumento relativo de minerais menos solúveis (Mg, Si, Fe e Al) no material fino da parte superior do manto de alteração, onde também aumentam os teores de matéria orgânica.

A maior influência da atividade biológica do solo verifica-se na porção superior do manto que é muito susceptível aos fatores climáticos, os quais determinam o tipo de intemperismo, bem como as condições de vida (biótipo) dos seres envolvidos (biocenose) na formação dos solos, sejam eles microorganismos ou seres mais desenvolvidos (plantas e/ou animais).

Nos estágios iniciais, os líquens crustáceos podem colonizar a superfície da rocha preparada pelas algas e pelos fungos. Contribuem para a desagregação da rocha, tanto física como quimicamente. Dessa forma, incrementam o fornecimento de água na rocha, contribuindo também para a formação de uma cobertura de matéria orgânica morta que favorece a colonização posterior das plantas maiores. As transformações químicas que ocorreram na formação dos minerais de argila fazem com que certas substâncias minerais sejam disponíveis às plantas mais simples, as quais retiram carbono do CO_2 do ar e eliminam uma série complexa de reações. Não existe um solo verdadeiro sem a presença de matéria orgânica.

As plantas, ao morrerem, são parcialmente decompostas para formar húmus, o qual confere coloração escura às camadas superficiais de muitos solos. O húmus contribui para a alimentação das plantas e com a água forma ácidos que percolam no solo para promover mudanças químicas. As bactérias multiplicam-se intensamente com o desenvolvimento do solo, sendo que algumas exercem funções importantes, como a de retirar nitrogênio do ar, fixando-o da forma N, NH_4^+ , fato que ocorre também em processos de simbiose com fungos (micorrizas) e nas raízes de leguminosas. Nos processos de decomposição desses organismos na nitrificação, atuam bactérias especializadas (*Nitrobacter* e *Nitrossomonas*) que transformam o amônio (NH_4^+) em nitrato (NO_3^-), tornando o nitrogênio disponível a uma diversidade maior de organismos vegetais.

As raízes de algumas plantas atingem grandes profundidades facilitando a entrada de ar e a circulação de água no subsolo. Essa ação também é facilitada pelos vermes (minhocas) e outros pequenos animais, os quais auxiliam igualmente as transformações químicas ao passarem grande quantidade de solos pelos seus organismos. A atuação complexa dos fatores físicos, químicos e biológicos, originam o desenvolvimento da estrutura e o arranjo das partículas sólidas do solo. Os produtos do intemperismo, assim como os resíduos orgânicos, especialmente os colóides minerais (argila) e orgânicos (húmus), por meio de processos de agregação que aglomeram as partículas primárias do solo (grãos de silte e areia) originam os agregados do solo. Estes, por sua vez, podem compor estruturas maiores, conhecidas como estruturas do solo (blocos, prisma, colunas, lâminas, etc.). Da ação diferenciada desses fatores ao longo do perfil, resultam os vários horizontes do solo, os quais se tornam mais claramente desenvolvidos e diferenciados em sua morfologia com o decorrer do tempo.

Em decorrência dos fatores acima mencionados, desenvolvem-se muitos tipos distintos de solos, considerando-se o grande número de minerais e rochas, bem como as condições variadas de intemperização. Provavelmente não existem dois solos de regiões razoavelmente separadas que sejam iguais, causando assim a enorme heterogeneidade dos atributos do solo.

2.2 O Vale do Ribeira

O Vale do Ribeira é uma região localizada no sul do estado de São Paulo e no leste do estado do Paraná, no Brasil. Recebe este nome em função da bacia hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape e ao Complexo Estuarino Lagunar de Iguape, Cananeia e Paranaguá. Sua área de 2 830 666 hectares abriga uma população de 481 224 habitantes e inclui integralmente a área de 31 municípios (nove paranaenses e 22 paulistas). Existem, ainda, outros 21 municípios no estado Paraná e outros 18 municípios no estado de São Paulo, que estão parcialmente inseridos na bacia do Ribeira.

Abriga 61 por cento da mata atlântica remanescente no Brasil, 150 000 hectares de restinga e 17 000 de manguezais. Em 1999, a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura declarou, a região, Patrimônio Natural da Humanidade. Ela contém, em si, uma das maiores biodiversidades do globo, pois conserva a maior porção de mata atlântica do Brasil. A região é produtora de água de qualidade, tanto para abastecimento

humano, quanto para a fauna aquática. O Vale do Ribeira apresenta ecossistemas aquáticos (rio, estuário e mar) e terrestres (duna, mangue, restinga e floresta ombrófila densa).

A região é destacada pela preservação de suas matas e por grande diversidade ecológica. Seus mais de 2,1 milhões de hectares de florestas equivalem a aproximadamente 21 por cento dos remanescentes de mata atlântica existentes no Brasil, sendo a maior área contínua de um ecossistema do Brasil. Neste conjunto de áreas preservadas, são encontradas não apenas florestas, mas importantes comunidades indígenas, comunidades quilombolas, comunidades caiçaras, imigrantes e uma biodiversidade em plena preservação.

Os principais ciclos econômicos do Vale do Ribeira se instalaram ao longo da história e foram: a exploração aurífera e outros minérios; o cultivo do arroz; o cultivo do café; o cultivo de chá e o cultivo de banana e da pupunha. Estes ciclos econômicos transformaram o Vale do Ribeira em uma potencial fonte de recursos naturais de baixo custo para regiões próximas. A cultura da pupunha foi introduzida na região do vale do Ribeira como forma de auxiliar as comunidades locais com a retirada do palmito para melhoria de aquisição de recursos financeiros (BOVI et al., 2007).

2.3 Aspectos gerais da cultura da pupunha

A pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth) é uma palmeira originária da Região Amazônica e, tem se mostrado uma excelente opção econômica para os produtores rurais, para a produção do palmito, devido ao seu potencial de mercado, além da promoção do reflorestamento sustentável e cobertura vegetal do solo (CHAIMSOHN, 2000).

As vantagens para o cultivo destinado à produção de palmito é a precocidade de corte, rusticidade, perfilhamento abundante, boa palatabilidade, ausência de oxidação do palmito, alta produtividade, facilidade nos tratamentos culturais e vantagens ecológicas, que podem fazer a cultura ser conduzida a pleno sol, em áreas agrícolas tradicionais, sem nenhum dano às matas nativas, fato este de grande apelo comercial, principalmente para a exploração do palmito visando o mercado externo. A produção de frutos possui diversas finalidades no consumo direto como alimento, extração de óleo, farinha e ração animal (ARKCOLL; AGUIAR, 1984; CLEMENT, 1989).

Por se tratar de um cultivo perene, a pupunheira se torna bastante exigente quanto às propriedades físicas e químicas do solo. Em relação às propriedades químicas do solo, há

exigência tanto na fase de crescimento vegetativo quanto na fase reprodutiva, extraindo grande quantidade de nutrientes do solo. No entanto, a magnitude das respostas à aplicação de fertilizantes depende de uma série de fatores relacionados à absorção, transporte e utilização dos nutrientes disponíveis e aplicados ao solo, sendo assim necessário o uso de adubações para maximizar a produção. Também merecem destaque os fatores genéticos e hídricos (SECRETARIA; MARAVILLA, 1997).

2.4 Atributos do solo

2.4.1 Solo agrícola ideal

2.4.1.1 Atributos físicos do solo

O conceito de qualidade do solo (QS) começou a ser elaborado no início dos anos 90 e percepções diferenciadas surgiram desde que o tema foi proposto. Porém, o principal avanço foi o aceite da sociedade à importância de avaliar a qualidade do solo. O conceito mais simplificado para o termo foi formulado por Larson e Pierce (1994), como sendo “apto para o uso”. Já Doran et al. (1994), sugerem uma definição mais complexa para QS, que envolve a capacidade do solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema, sustentando a produtividade biológica, mantendo a qualidade do meio ambiente e promovendo a saúde das plantas e dos animais. Eles propõem em seu ensaio que produção sustentável seja definida em termos de: a) produção de plantas e resistência à erosão; b) qualidade do meio ambiente como função da qualidade do solo, da água e do ar e, c) saúde humana e animal, abrangendo a concepção de qualidade de alimentos, composição nutricional e segurança alimentar.

No Brasil estudos referentes ao assunto, bem como o uso do termo QS, ainda são incipientes. Amado et al. (1998), estudando áreas arenizadas da fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul, encontraram que sistemas de cultivo agrícola nesses solos de alta fragilidade, tiveram como consequências a redução de sua qualidade quando comparados ao sistema de campo natural. Vezzani (2001), avaliando os estados de ordem de sistemas de cultivo, encontrou que a maior proporção de macroagregados e carbono retido caracterizavam estados de ordem em níveis hierárquicos mais altos, gerando, consequentemente, propriedades emergentes que habilitavam o solo a exercer suas funções, atingindo excelência de qualidade (CONCEIÇÃO et al., 2002).

A densidade do solo (DS), também conhecida como densidade aparente ou densidade global, é uma propriedade física que reflete o arranjo das partículas do solo, que por sua vez

define as características do sistema poroso. Por definição, a DS é a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca em estufa, a 110°C, e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e poros. Desta forma, todas as manifestações que influenciarem a disposição das partículas do solo, refletirão diretamente nos valores da DS. Essa propriedade é utilizada para se estimar a compactação do solo, de forma mais genérica, pois quanto mais denso um solo, mais compactado ele tende a se apresentar.

Também se pode inferir na sua estruturação que está, intimamente, ligada a compactação, pois geralmente um solo compactado é mal estruturado, tem menor porosidade, menor permeabilidade e menor infiltração, e prejudica o crescimento do sistema radicular, pois quanto maior a densidade do solo, mais dificultada fica a penetração das raízes, e consequentemente, a produção é afetada, podendo causar também a erosão do solo devido ao aumento de selamento superficial (MARTINS FILHO et al., 2009).

Mudanças na densidade do solo são facilmente medidas e podem ser um ótimo indicativo de alterações na qualidade do solo e no funcionamento do ecossistema, aumentos na densidade geralmente implicam em diminuição na qualidade do solo para crescimento radicular, redução da aeração e mudanças indesejáveis no comportamento da água no solo, como redução da infiltração. Pode-se dizer, com certa restrição, que a densidade é a medida quantitativa mais direta da compactação. Dentre os vários métodos usados para a determinação, destacam-se os anéis volumétricos, possuindo bordas cortantes e volume conhecido, normalmente 50 cm³ (KIEHL, 1979).

A densidade do solo é variável para um mesmo solo, alterando-se conforme sua estruturação e no perfil do solo. Valores mais baixos, geralmente, estão associados a solos ou camadas com estrutura granular, ao passo que os valores mais elevados estão associados à estrutura do tipo em blocos ou similares em situação onde somente o potencial matricial de origem é levado em consideração (FERREIRA, s/d).

O manejo inadequado é fator de importância na desestruturação do solo, ocasionando compactação e, consequentemente, aumentando o adensamento das partículas do solo. Segundo Kochhann et al., (2000), a compactação do solo é entendida como o aumento de sua densidade, resultante de complexa interação de processos físicos, químicos e biológicos. Nessa interação, os processos químicos e biológicos atuam apenas como fatores condicionantes da compactação do solo, necessitando de processo físico como agentes diretos e complementares para concretização do fenômeno.

Fisicamente, o processo de compactação é resultado da ação direta de forças mecânicas, oriundas do tráfego de máquinas e/ou do pisoteio de animais sobre o solo, e da ação da percolação de água no perfil do solo, transportando partículas dispersas. Enquanto as forças mecânicas aproximam as partículas unitárias do solo, pela expulsão do ar e água que as matem afastadas, reduzindo o volume total do solo à custa da redução da porosidade, a água de percolação promove essa aproximação mediante dispersão e rearranjo das partículas unitárias, obstruindo a porosidade e, conseqüentemente, concentrando massa de solo por unidade de volume (KOCHHANN et al., 2000).

Corrêa (2002), com objetivo de avaliar o efeito de diferentes sistemas de cultivo na estabilidade de agregados em águas, em um Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, observou que ocorreram modificações na estrutura e na matéria orgânica do solo, causadas pelos diferentes sistemas de cultivo, a partir do preparo da área para o primeiro plantio. Os maiores fracionamentos de agregados ocorreram nas áreas preparadas com grade aradora e grade niveladora, para o monocultivo da soja, durante quatro e seis anos. O plantio direto da soja sobre a palhada do milheto, por dois anos consecutivos, proporcionou maior estabilidade de agregados do solo.

Provavelmente as observações feitas por Corrêa (2002), confirmam um dos processos de descompactação do solo, o “processo biológico”, que está associado à incorporação de matéria orgânica ao solo a partir do sistema radicular das plantas que, enquanto vivo, preenche a macroporosidade do solo e confere estabilidade aos agregados do solo. Quando em decomposição, a matéria orgânica gera compostos orgânicos, com liberação de substâncias cimentantes dos macroagregados do solo (KOCHHANN et al, 2000). Guimarães e Moreira (2001), com objetivo de estudar o efeito de diversas densidades do solo sobre o desenvolvimento do arroz de terras altas, observaram que o crescimento da parte aérea do arroz nesse sistema é diminuído com o aumento da densidade do solo; as raízes na camada compactada (0,00-0,20 m) apresentam engrossamento em função do aumento da densidade do solo; e a compactação do solo na camada superficial diminui a quantidade de raízes presentes nesta camada e na camada inferior não compactada.

Portanto, fica patente a importância do estudo da densidade para se avaliar o nível de compactação do solo. Segundo Guimarães e Moreira (2001), o conhecimento do nível de compactação do solo é fundamental para o bom desenvolvimento das plantas, pois elas desenvolvem-se melhor em solos que não apresentam limitação ao crescimento radicular,

portanto com baixa densidade, porém alta o suficiente para oferecer bom contato raízes - partículas de solo, ou seja, boa estruturação do solo. Com base nos dados fornecidos pela literatura, pode-se observar o quanto a densidade do solo é importante para se obter bons resultados nas lavouras e conhecer os solos para fins de preservação.

A resistência do solo à penetração de raízes e a densidade do solo estão relacionadas com o estado de compactação deste, e muitos trabalhos têm buscado valores que causem restrições ao crescimento das raízes das plantas e diminuição da produtividade. A dificuldade está em isolar o efeito desses atributos físicos e da umidade do solo; portanto, dúvidas persistem sobre o atributo que melhor caracterize o estado de compactação e que seja sensível às variações de manejo do solo (SILVA, 2003).

A densidade do solo é considerada um atributo avaliador da qualidade estrutural do solo, sendo muito utilizada como indicadora de sua estrutura e dureza. Desta forma, alterações dos seus valores refletem em modificações da estrutura do solo, devido à relação que existe entre a densidade e a porosidade total (DORAN et al., 1994).

Segundo Holtz e Kovacs (1981), é definida como sendo o adensamento dos solos pela aplicação de uma energia mecânica, variando num mesmo tipo de solo, e alterando-se, espacial e volumetricamente, conforme a variação da estrutura e da textura. Também tende a aumentar com a profundidade do perfil, sobretudo pela diminuição do teor de matéria orgânica. Desta forma, foram relatados valores gerais desse atributo variando entre 1,40 a 1,80 kg dm⁻³. Por outro lado, nos solos de textura arenosa seus valores variam de 1,20 a 1,40 kg dm⁻³, ao passo que nos de textura argilosa, entre 1,00 a 1,25 kg dm⁻³ (KIEHL, 1979). Em relação aos níveis críticos da densidade do solo, Bowen (1981) considerou que valores em torno de 1,55 kg dm⁻³ para solos franco-argilosos e argilosos, e de 1,85 kg dm⁻³ para solos arenosos, podem afetar o crescimento das raízes e consequentemente a produtividade vegetal.

A compactação do solo é resultado do processo físico exercido pela ação das forças mecânicas causadas pelo tráfego de máquinas por ocasião da semeadura, tratos culturais, colheita e transporte, do pisoteio animal em áreas de pastejo, especialmente nos solos argilosos quando úmidos. Tais forças aproximam as partículas unitárias do solo, expulsando o ar e a água do seu interior. Desta forma, ocorre a redução do seu volume total, por diminuir drasticamente a macroporosidade e aumentar levemente a microporosidade. Consequentemente há um aumento tanto da densidade global como da resistência à penetração, assim como uma diminuição da taxa de infiltração (KOCHHANN et al., 2000).

O efeito da compactação sobre a planta inicia-se com a restrição ao crescimento radicular, o que implica em consequências para o desenvolvimento da parte aérea e sua respectiva produtividade. O sistema radicular talvez seja o primeiro componente da planta a sentir os efeitos da compactação do solo, mesmo quimicamente corrigido. Contudo, estando compactado, as plantas nele estabelecidas não se beneficiam adequadamente dos nutrientes disponíveis, devido ao deficiente desenvolvimento das novas raízes, uma vez que é nelas que ocorre a maior taxa de absorção (REICHERT et al., 2007). Desta forma, Collares (2005) observou que o crescimento radicular do feijão foi menos vigoroso, quando o solo trabalhado (Latossolo Vermelho com 607 g kg⁻¹ de argila) foi submetido à compactação proporcionada por quatro passadas de um trator de 16,6 Mg. Também foi observada maior concentração das raízes na sua camada superficial (0,00-0,10 m).

Trabalhos envolvendo a densidade do solo evidenciaram grande importância deste atributo para os estudos agrônômicos, assim como uma estreita relação com outros, permitindo avaliar que com o seu aumento ocorre a diminuição da macroporosidade, condutividade hidráulica, difusividade do ar, absorção iônica, e conseqüentemente o aumento da microporosidade e da resistência mecânica à penetração do solo, o que poderia contribuir para a diminuição da produtividade agrícola (MONTANARI et al., 2010).

O solo é constituído de materiais sólidos, líquidos e gasosos. As partículas sólidas formam um arranjo poroso tal que os espaços vazios, denominados poros, tem a capacidade de armazenar líquidos e gases, se constitui de partículas classificadas de acordo com o tamanho médio dos grãos em areia, limo (silte) e argila, cujas proporções determinam a textura do solo. O arranjo das diversas partículas, juntamente com os efeitos cimentantes de materiais orgânicos e inorgânicos, determinam a estrutura do solo. Os materiais orgânicos consistem de resíduos vegetais e animais (incluindo fungos, bactérias, insetos e outros) parte dos quais são vivos e o restante se apresentando em diversos estágios de decomposição, denominados húmus.

A parte líquida do solo constitui-se essencialmente de água, contendo minerais dissolvidos e materiais orgânicos solúveis. Ocupa parte (ou quase todo) do espaço vazio entre as partículas sólidas dependendo da umidade do solo. Esta água é absorvida pelas raízes das plantas ou é drenada para camadas de solo mais profundas e, por isso, precisa ser periodicamente reposta pela chuva ou pela irrigação, para garantir uma produção vegetal

adequada, Daí, a importância agrícola do conhecimento deste reservatório de água para as plantas e dos princípios que governam seu funcionamento.

A parte gasosa ocupa os espaços vazios não ocupados pela água. Esta é uma fração importante do sistema solo, pois a maioria das plantas exige certa aeração do sistema radicular. Na prática da irrigação é importante manter-se certo balanço entre a porção dos poros, ocupada pela água, e a ocupada pelo ar. Em um solo homogêneo, para cada valor de umidade volumétrica (θ), existe um valor correspondente de potencial de água no solo (Ψ) (SILVA; SILVA, 1984).

A construção de um gráfico, colocando as variáveis (θ) no eixo das abscissas e as variáveis (Ψ) no eixo das ordenadas, ou vice-versa, denomina-se curva de retenção de água no solo ou curva característica de água no solo. Esta curva pode ser determinada através do envio de amostras de solo a Laboratórios de Física de Solos. Estas amostras, devem preferencialmente, estarem indeformadas, sendo coletadas por meio de anéis volumétricos que mantenha sua estrutura, apesar da textura (proporções das partículas areia, silte e argila) ser o principal fator que influencia na retenção de água no solo, a estrutura (arranjo das partículas) também exerce bastante influência, sobretudo na faixa compreendida entre 0 e – 100kPa (REICHARDT, 1990).

Di Bello (2005) relata que a umidade do solo é variável e essencial na hidrologia: ela é a chave que controla a proporção de chuva que infiltra, escoar superficialmente, ou evapora da superfície da Terra. É substância vital para a vegetação. A umidade do solo integra precipitação e evaporação por períodos de dias a semanas e introduz um elemento significativo na memória do sistema atmosfera-solo. Existem fortes evidências, tanto climatológicas quanto de modelagens, de que a reciclagem rápida da água através da evapotranspiração e precipitação é o fator primário na persistência de anomalias de secas ou enchentes sobre amplas regiões continentais durante o verão.

Reichardt (1988) analisou o conceito de capacidade de campo do ponto de vista teórico e discutiu-o em relação a dados de drenagem interna de um solo considerado homogêneo (Latossolo) e outro heterogêneo (terra roxa estruturada - Argissolo). Foi dada ênfase ao fato de ser a capacidade de campo o resultado de um comportamento dinâmico da água no solo e não uma característica intrínseca de sua matriz. Considerou que o principal fator da redução do fluxo de drenagem é a condutividade hidráulica do solo e não o gradiente de potencial, sendo que o fluxo de drenagem decresce rapidamente com o tempo, mas,

praticamente, nunca cessa, o que torna muito subjetiva a escolha do instante para a determinação da capacidade de campo. Cada tempo escolhido leva a um valor diferente dessa capacidade, cujos métodos de determinação em amostras de laboratório não têm suporte teórico; e seus resultados, porém, podem ser úteis para efeito prático. Nesses casos, considerou que o critério clássico do potencial matricial de -33 kPa ($-1/3 \text{ atm}$) deve ser levado para potenciais maiores, da ordem de -10 a -6 kPa ($-1/10$ a $-6/100 \text{ atm}$).

Existem alguns métodos disponíveis para se medir a umidade do solo, apresentando todos, limitações, ou de precisão, ou por serem dispendiosos, ou excessivamente morosos. O método termogramétrico, também denominado “gravimétrico padrão”, serve de referência para os demais métodos. É simples, absoluto e utiliza equipamentos não onerosos. Por outro lado, é trabalhoso e demorado (KLAR, 1984).

Conforme EMBRAPA (1997), o método da umidade atual (umidade gravimétrica), tem como princípio a determinação da umidade presente na amostra de solo, transportada em embalagem impermeável e vedada. A determinação da umidade do solo é de vital importância para promover o manejo adequado do uso da água no solo e de sistemas de irrigação como um todo. Por sua vez o manejo eficiente de sistemas de irrigação favorece o desenvolvimento adequado das plantas. Apesar dos contínuos aperfeiçoamentos nas técnicas de moderação de nêutrons para medida de umidade, o trabalho intensivo e a ruptura do sítio de amostragem gravimétrica ainda tornam o método TDR preferível. Existe claramente a necessidade de aperfeiçoar métodos de medida de umidade do solo. O TDR tem mostrado possibilidades atrativas para medidas *in situ* da umidade. Além disso, o uso do TDR vem sendo proposto recentemente para medidas simultâneas da umidade e condutividade elétrica do solo (TOPP, 1987).

Macedo (1997) mostra um tomógrafo, construído a um custo relativamente baixo quando comparado a tomógrafos médicos, de alta resolução, dedicado à pesquisa de solos e meios porosos em geral. Foi possível pela primeira vez, em nível internacional, examinar uma amostra de solo natural, com selamento superficial e encrostamento, além de uma amostra com dupla camada de areia, não apenas fazendo-se uma microscopia de superfície, mas também, investigando-se o seu interior. Sendo possível observar detalhes como regiões com predominância de partículas de alta densidade e camadas com densidades e texturas diferenciadas.

Em trabalho, na Embrapa Instrumentação Agropecuária, Cássaro (1994) desenvolveu e utilizou tomografia de dupla energia simultânea, para a determinação, também simultânea, da densidade global e da umidade do solo. Neste trabalho foram, utilizados uma fonte de raios X e filtros de estanho, de modo a se obterem dois picos distintos de energia.

Trabalhando com dupla energia no minitomógrafo, Biassusi (1996) utilizou a TC para determinar a umidade e densidade de Vertissolos, visando avaliar, em laboratório, sua expansão e contração. Os Vertissolos caracterizam-se por um predomínio de argilominerais em seus horizontes, tornando-os inadequados à agricultura, pois quando secos são extremamente duros e quando úmidos apresentam-se muito plásticos, o que dificulta a drenagem. Batista (2002), em seu estudo de variabilidade espacial da unidade de solo em irrigação por gotejamento sob cultivo protegido relata, ao estudar-se a variabilidade do solo, podem ser utilizados, basicamente, dois enfoques que se diferenciam na forma de análise dos dados. A estatística tradicional, que exige a validade de algumas hipóteses básicas sobre as variáveis, como a independência entre as observações, a variância constante e a distribuição normal dos dados; e a geoestatística, que vem apresentando uma aplicação crescente na avaliação da variabilidade espacial de diversos parâmetros de interesse em ciências agrárias, permitindo a interpretação dos resultados baseados na estrutura da sua variabilidade natural, levando em consideração a existência da dependência espacial dentro do espaço de amostragem.

Reichardt et al. (1988) revelaram como a variabilidade espacial da umidade do solo pode ser utilizada com vantagem para estudar a influência da umidade sobre outros parâmetros de uma cultura agrícola, como a absorção de nutrientes, produtividade e fixação biológica do nitrogênio.

A resistência mecânica à penetração é um dos atributos físicos mais adotados como indicador da compactação do solo. Apresenta relações diretas com o crescimento das plantas, sendo mais eficiente na identificação da compactação quando acompanhada da umidade e da densidade do solo (FREDDI et al., 2006). Fisicamente estabelecida pela pressão, ela é dada pela razão entre a força necessária para a penetração de uma haste metálica do penetrômetro, provida de um cone na sua extremidade, cuja área basal é conhecida e constante. Sua avaliação deve ser concomitantemente à da umidade do solo, uma vez que elas variam de forma inversamente proporcional. Contudo, varia positivamente com a densidade do solo (MONTANARI et al., 2010).

A resistência mecânica à penetração é um atributo físico relativamente fácil de ser obtido, apresentando, na maioria das vezes, apreciável correlação com a macroporosidade e a densidade do solo. Ela é mais afetada pela variação da umidade do solo no momento da amostragem do que pela sua densidade. Por esta razão, muitos trabalhos, que objetivaram caracterizar o efeito da compactação sobre o desenvolvimento radicular e sobre a produtividade das culturas, utilizaram a densidade do solo como parâmetro auxiliar à referida resistência (TORRES; SARAIVA, 1999).

De acordo com Genro Junior et al. (2004), a resistência à penetração geralmente é aumentada com a compactação do solo devido ao concomitante incremento da densidade, assim como com o decréscimo da umidade. Seu aumento é indesejável para o crescimento das plantas por causar redução do crescimento radicular. Segundo Libardi et al. (1996), a umidade varia de modo espacial e temporal no solo. Desta forma, pesquisas da resistência mecânica à penetração e da umidade do solo tem mostrado influência positiva sobre a produtividade vegetal (MONTANARI et al., 2010).

Os níveis críticos de resistência mecânica para o crescimento radicular das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada. Assim, conforme revisão efetuada por Reichert et al. (2007), recomenda-se sua avaliação quando o teor de água do solo estiver próximo do valor da capacidade de campo. Entretanto, quando obtida no momento em que a umidade do solo estiver ao redor de 2/3 da microporosidade (solo friável/macio) (ROSA FILHO, 2008), 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.

A dureza do solo é um atributo que avalia sua resistência à deformação, normalmente avaliada pela raiz da planta, pelos implementos empregados no seu preparo, ou pela ponta cônica de um penetrômetro qualquer. Assim, resistência à penetração, fisicamente estabelecida pela pressão, é a razão entre a força necessária para a penetração de uma haste metálica do penetrômetro, provida de um cone na sua extremidade, cuja área basal é conhecida e constante (BENGOUGH et al., 2001).

Na avaliação da resistência à penetração, comparações entre sistemas de preparo do solo ficam dificultadas devido à extrema variabilidade da umidade que, por ser tomada em concomitância a tal resistência, funciona como variável controle. Este procedimento permite que os valores da resistência, que normalmente apresentam elevada variabilidade, possam ser comparados entre distintos sistemas de preparo. Por outro lado, para um determinado tipo de solo, a resistência à penetração depende intimamente da sua densidade, do grau de umidade e da estrutura, assim como, varia na razão inversa da umidade, e na direta com a densidade (BENGOUGH et al., 2001).

Assim, com o objetivo de poder comparar os dados de resistência, originados das distintas formas de preparo do solo, ou de distintas profundidades, condições nas quais a variabilidade da sua umidade é reinante, procurou-se estabelecer a seguinte metodologia de coleta de dados de campo, a seguir. Para a coleta dos dados de campo da resistência à penetração, deve-se esperar um período contínuo de intensas chuvas (3-4 dias), que ocorre normalmente entre dezembro e fevereiro para as condições do Brasil, o que proporciona a saturação completa da porosidade total do solo. Seguidamente, 3 a 4 dias após o término das chuvas, devem ser coletados concomitantemente os dados, de resistência e umidade, uma vez que o solo estará, muito provavelmente, com seu conteúdo de água preenchendo dois terço da sua microporosidade total (capacidade de campo), grau de umidade tido como ideal para tal procedimento (BENGOUGH et al., 2001).

Os penetrômetros superestimam a taxa de alongamento radicular. Avaliações de campo evidenciaram valores de resistência à penetração de duas a oito vezes maiores do que os das raízes. Assim, valores críticos de resistência, avaliados com o penetrômetro em condições de campo, nos quais o alongamento radicular é cessado, variaram entre 0,8-5,0 MPa, dependendo do solo e da cultura. Por outro lado, a máxima pressão axial, que a raiz pode exercer, pode variar de 0,24 e 1,45 MPa, dependendo da espécie. Desta forma, o alongamento radicular cessa no solo quando a resistência, avaliada pelo penetrômetro, for muito maior do que a máxima pressão que a raiz poderá exercer (BENGOUGH et al., 2001).

Sabe-se que um solo com valores de resistência à penetração variando entre 1,0 e 3,5 MPa (MEROTTO; MUNDSTOCK, 1999), ou de 2,0 a 4,0 MPa, segundo Arshad et al. (1996), poderá restringir ou mesmo impedir o crescimento e o desenvolvimento das raízes.

Pauletto et al. (1989) constataram que somente seriam consideradas camadas compactadas aquelas nas quais os valores de resistência à penetração fossem superiores a 1,72

MPa, alertando também para o fato de que o limite superior de 2,32 MPa impediria o desenvolvimento do sistema radicular das plantas de milho. Por outro lado, para o conceito de intervalo hídrico ótimo. Silva et al. (1994) relacionaram o valor de 2,0 MPa como limite para o desenvolvimento radicular. Neste aspecto, Pérez-Gomar et al. (2002) observaram que quando a umidade do solo encontra-se ao redor de $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, a resistência à penetração resultou valores superiores ao referido 2,0 MPa, encontrando-se também uma zona mais compactada entre a camada de 0,15 a 0,30m. À medida que a umidade do solo aumentou para valores próximos de $0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, a resistência à penetração diminuiu, porém a camada resistente persistiu. Também, na condição de solo saturado, foram registrados os menores valores de resistência à penetração, mesmo na zona mais compactada.

O efeito do condicionamento físico do solo sobre o crescimento das plantas ocorre pela atuação de vários de seus atributos, bem como das interações entre eles. A própria sazonalidade climática contribui para a complexidade do sistema. Como exemplo, as variações da umidade do solo promovem alterações da aeração, na condutividade hidráulica, no potencial de água e na resistência à penetração. Desta forma, os atributos físicos do solo relacionados com a produtividade das culturas podem ser divididos em duas categorias. A primeira relaciona aqueles diretamente envolvidos com o desenvolvimento das plantas, a saber, a água, oxigênio, resistência à penetração das raízes e temperatura, os quais afetam diferentes processos fisiológicos tais como a fotossíntese, crescimento radicular e foliar. Já a segunda relaciona os indiretamente, tais como a textura, agregação, porosidade e densidade do solo, que afetam a produtividade das culturas devido à influência sobre a retenção de água, aeração, temperatura e a resistência do solo à penetração das raízes (SILVA; NOGUEIRA JUNIOR, 2001).

O conhecimento do comportamento físico do solo possibilita adequar as atividades agrícolas à sua aptidão, o que pode reduzir a erosão das camadas superficiais e, por consequência, sua degradação física, química e biológica. A infiltração de água no solo e a espessura do horizonte A fornecem indicativos de sua qualidade, gerando informações que tornam possível verificar a existência de camadas compactadas, a formação superficial de crostas, bem como as consequências dos processos erosivos (BERTOLANI; VIEIRA, 2001).

A resistência do solo à penetração é um atributo físico relativamente fácil de ser obtido e, de certa forma, de ser correlacionado com a densidade e a macroporosidade. Para um mesmo solo, quanto maior a densidade do solo, maior será a resistência à penetração e menor

a macroporosidade. Esta última constitui-se no principal espaço para o crescimento das raízes. Deve ser levado em conta, no entanto, que a resistência à penetração do solo é mais afetada pela variação dos conteúdos de sua umidade (MERCANTE et al., 2003).

Do ponto de vista físico-químico coloidal, o solo é um sistema trifásico disperso. Desta forma, exclusivamente com base no volume, o solo considerado ideal, do ponto de vista agrônomo, é aquele que apresenta $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade total ($0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de microporosidade, que é responsável pelo armazenamento de água, e $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de macroporosidade, responsável pela aeração do solo) e $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de volumes sólidos ($0,45 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de matéria mineral e $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de matéria orgânica), conforme preceitos de KIEHL (1979).

O uso e o manejo do solo alteram a sua densidade e, conseqüentemente, a porosidade total e a de aeração. A porosidade de aeração é a razão entre o volume de ar, avaliado quando sua umidade estiver na capacidade de campo, e seu volume total. O ar ocupa o espaço poroso do solo não ocupado pela água. Para um solo seco, todo o espaço vazio (porosidade total) é ocupado pelo ar. A exigência das plantas para com a aeração do solo, isto é, a porosidade livre de água necessária para o seu pleno desenvolvimento, varia entre as espécies e os tipos de solos. Camargo e Alleoni (1997) também mostraram que as trocas gasosas do solo com a atmosfera são importantes para o bom desenvolvimento radicular e aéreo. Essa difusão depende diretamente da porosidade livre de água. A porosidade de aeração é muito importante para a ramificação uniforme das raízes, pois, se ocorre baixa aeração, há uma proliferação das raízes superficiais. Esse aumento da concentração de raízes leva a planta a retirar água apenas superficialmente, podendo causar deficiência hídrica em anos de seca.

O bom crescimento e desenvolvimento das plantas, que promovem a produção de grãos, fibras e outros produtos comerciáveis, dependem de uma série de fatores ambientais e genéticos próprios de cada planta. A absorção dos nutrientes é um dos fatores importantes para a produtividade das culturas e, assim sendo, qualquer tipo de impedimento ao crescimento radicular poderá reduzir tal absorção.

Vários fatores são passíveis de dificultar o desenvolvimento radicular de plantas cultivadas, podendo-se citar: danos causados por insetos e/ou moléstias, deficiências nutricionais, acidez do solo, drenagem insuficiente, baixa taxa de oxigênio, temperatura imprópria do solo e compactação do solo. Dentre estas limitações, a compactação do solo toma, muitas vezes, dimensões sérias, pois ao causar restrição ao crescimento e

desenvolvimento radiculares, acarreta uma série de problemas que afetam direta e indiretamente a produção das plantas.

A agricultura moderna deve basear-se na sustentabilidade dos recursos naturais, bem como na otimização do uso do solo, a fim de garantir a produtividade, sem causar degradação ao meio ambiente. Neste sentido, métodos que contribuem para a melhoria da qualidade dos solos favorecem a prática de uma agricultura mais equilibrada.

O conhecimento do comportamento físico do solo possibilita adequar as atividades agrícolas à aptidão do solo, o que pode reduzir a erosão das camadas superficiais e, por consequência, as degradações físicas, químicas e biológicas. A infiltração de água no solo e a espessura do horizonte A fornecem indicativos da qualidade do solo, gerando informações com as quais é possível verificar a existência de camadas compactadas, encrostamento superficial, bem como as consequências dos processos erosivos (BERTOLANI et al., 2001). O uso intensivo do solo acarreta na degradação das características físicas do mesmo, podendo afetar a infiltração e retenção de água do solo, devido ao aparecimento de camadas compactadas provocada pelo uso excessivo de máquinas agrícolas. Segundo Cavenage (1999) a maioria das lavouras mecanizadas apresentam camadas de compactação do solo abaixo da profundidade de preparo, consequência da execução de operações de preparo em condições de excesso de umidade.

A resistência mecânica do solo à penetração de raízes é uma propriedade física relativamente fácil de ser obtida e, de certa forma, de ser correlacionada com a densidade e com a macroporosidade. Para um mesmo solo, quanto maior a densidade do solo, maior será a resistência à penetração e menor será a macroporosidade, que é o principal espaço para o crescimento das raízes (MERCANTE et al., 2003). Deve ser levado em conta, no entanto, que a resistência do solo é mais afetada pela variação nos conteúdos de umidade do solo no momento da amostragem do que pela densidade do solo.

Os altos valores de produtividade e a maior rentabilidade dependem das características físicas, químicas e biológicas dos solos. Plantas de importância econômica podem produzir em maior quantidade quando cultivado sob práticas agrícolas conservacionistas como: semeadura direta e rotação de culturas, assim como calagem proporcionando modificações nos teores de nutrientes, estrutura, porosidade, agregação, densidade, infiltração e disponibilidade de água, tendo em vista o adequado crescimento radicular da cultura.

A resistência mecânica do solo à penetração de raízes exerce um papel importante, dentre os fatores que interferem no processo de desenvolvimento vegetal. Seu valor aumenta de forma diretamente proporcional com a compactação do solo, restringindo o crescimento radicular quando assume os valores entre 1,5 e 4,0 MPa, ao passo que, especificamente, para o plantio direto, esse fato foi estabelecido como sendo da ordem de 5,0 MPa. Em áreas irrigadas, o maior grau de umidade do solo normalmente favorece as plantas, muito embora proporcione condições para maior compactação. Sendo assim, acarreta em aumento de tal resistência, decorrente da maior coesão entre as partículas sólidas do solo, dificultando a análise dos dados entre os diversos sistemas de manejo utilizados. A resistência mecânica do solo à penetração das raízes é um dos atributos físicos que influenciam diretamente o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas.

Vários autores utilizam a resistência do solo à penetração para a avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular (TORMENA; ROLOFF, 1996). A resistência à penetração, medida com o penetrômetro e expressa como índice de cone, é a relação entre a força exercida para fazer penetrar um cone metálico no solo e sua área basal. O índice de cone tem sido bem correlacionado com medidas de crescimento radicular, que a elongação das raízes varie inversamente com a resistência à penetração. Os valores limitantes ao crescimento radicular variam com o tipo de penetrômetro utilizado, com o tipo de solo e também com a espécie de planta. Alguns autores, no entanto, têm adotado um índice de cone de 1,0 MPa como crítico, mas não impeditivo ao crescimento das raízes no solo. A consequência do aumento na resistência à penetração é um dos fatores que leva ao acúmulo de raízes na superfície dos solos compactados (HENDERSON, 1989).

Daniel et al. (1994) observaram que ferramentas que provocam um maior grau de mobilização do solo, como arado de disco, grade aradora e a enxada rotativa, proporcionaram valores mais elevados de resistência do solo à penetração, favorecendo a presença de camadas compactadas. Comentam ainda, que a compactação ou “dureza” do solo esta intimamente ligada à umidade, e que uma possível compactação pode ser mascarada pela elevada umidade do solo no momento da amostragem.

Vários autores recomendam que a resistência do solo à penetração de raízes seja medida com teores de água próximos à capacidade de campo, situação em que se consegue uma boa correlação entre a densidade do solo, resistência à penetração e o crescimento radicular. Petter (1990) concluiu que, com a umidade do solo equivalente à tensão de 10 kPa,

a densidade do solo de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ não foi limitante ao desenvolvimento radicular da soja. No entanto, o período em que o solo permanece na capacidade de campo é pequeno, de modo que a resistência do solo pode rapidamente variar de níveis não impedidos para impeditivos com a secagem do solo.

Klein et al. (1998), avaliando a resistência do solo a penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água, concluíram que a resistência à penetração foi altamente influenciada pela condição de umidade do solo, e a utilização de penetrômetros para avaliar a resistência mecânica à penetração de raízes no solo é um método considerado apropriado para se estudar a compactação do mesmo, tanto pela facilidade quanto pela rapidez na obtenção de dados.

A resistência mecânica à penetração possui correlação negativa com o crescimento radicular, uma vez que a elongação das raízes varia de forma inversamente proporcional à sua grandeza. As limitações que o crescimento radicular apresenta variam com o tipo de penetrômetro utilizado, tipo de solo e também com a espécie de planta. Outro fator importante e que, com a redução do teor de água no solo, ocorre um aumento da resistência à penetração, decorrente da maior coesão entre as partículas (GERARDI et al., 1972).

A compactação do solo determina, de certa forma, as relações entre ar, água e temperatura, e estas influenciam a germinação, brotação e a emergência das plantas, além do crescimento radicular, ou seja, praticamente todas as fases de seu desenvolvimento. Um exemplo de como a compactação atua sobre a planta seria o de um solo submetido ao tráfego de máquinas e implementos, principalmente quando efetuado em determinada condição de umidade, provocando alterações no arranjo das partículas do solo, diminuindo, geralmente, o volume ocupado por determinada massa de terra e o tamanho dos poros do solo, que permitem livre circulação de ar e água. Por conseguinte, outros atributos físicos do solo tais como, aeração, temperatura e resistência mecânica à penetração são modificados, afetando também os químicos tais como, disponibilidade de nutrientes para as plantas, e os biológicos, condição do solo para desenvolvimento de microrganismos e a região ocupada pelas raízes, a rizosfera.

Pesquisadores têm demonstrado claramente o efeito da compactação nos atributos físicos do solo (ANDREOTTI et al., 2010). A compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica (MONTANARI et al., 2010) e diminui a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros.

Ainda hoje o método mais utilizado para eliminar camadas compactadas do solo é a utilização de subsoladores que, por meio de hastes penetrando e se movimentando dentro da camada, conseguem quebrá-la, amenizando, assim, o impedimento ao desenvolvimento das raízes. Uma opção para diminuir a compactação é a sucessão de culturas, utilizando espécies que tenham sistema radicular vigoroso, com capacidade de se desenvolver em solos com alta resistência mecânica à penetração (SILVA; ROSOLEM, 2001). A resistência de um solo à penetração de um instrumento agrícola é função da sua compactação, conteúdo de umidade, textura e tipo de mineral de argila. Além disso, a penetração por unidade de força aplicada varia com o tipo de instrumento utilizado. Segundo Baver (1972), a umidade aparece como fator de maior influência nas leituras de penetração. Para determinar a resistência à penetração foi utilizado o Penetrômetro de Impacto nas profundidades, 0,00–0,10 m e 0,10–0,20m.

A densidade da partícula sólida do solo, também conhecida apenas como densidade da partícula, pode ser considerada como sendo a razão entre a massa de uma amostra deformada de solo, seca a 110 °C, e o seu volume de sólidos, sem considerar a parte porosa, normalmente dada em g cm^{-3} , kg dm^{-3} , t m^{-3} ou Mg m^{-3} (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Num primeiro momento, a densidade da partícula parece ser um atributo de menor importância para os estudos agrônômicos. Porém, de acordo com Kiehl (1979), a relação entre a densidade da partícula com as plantas é considerada de forma indireta. Isto porque este atributo está diretamente ligado à presença de certas quantidades de diferentes componentes minerais e/ou orgânicos que acabam por influenciar diretamente o comportamento das plantas. De acordo com Forsythe (1985), o conhecimento da densidade da partícula tem grande importância para os cálculos da porosidade total, uma vez que sua expressão pode ser dada por (Eq. 1):

$$\text{PTc} = [1 - (\text{DS}/\text{DP})] \dots\dots\dots (1)$$

onde: **PTc** é a porosidade total calculada do solo [$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$]; **DS** e **DP** são respectivamente a densidade global do solo e a densidade da partícula do solo [kg dm^{-3}].

Os valores da densidade da partícula dependem da quantidade e da constituição da parte mineral e da parte orgânica, variando pouco para um mesmo solo, e não variando em grande escala em diferentes deles. Seu valor tende a se aproximar do da sua rocha de origem. O valor médio para a grande variedade de solos está em torno de 2,65-2,70 kg dm^{-3} , isto

porque essa faixa é da ordem de grandeza da densidade do quartzo e da maioria dos silicatos que ocorrem nos solos (REICHARDT; TIMM, 2012).

A densidade da partícula possibilita ao pesquisador formular uma ideia sobre a predominância dos elementos orgânicos e inorgânicos presentes no solo. Nos solos derivados de rochas básicas, que contêm minerais pesados, tal como o Latossolo Vermelho Eutroférico e/ou distroférico, a densidade da partícula pode chegar ao máximo de $3,16 \text{ kg dm}^{-3}$. Por outro lado, solos com grandes teores de matéria orgânica apresentam os menores, da ordem de $1,90 \text{ kg dm}^{-3}$, assim como, na matéria orgânica humificada pura, a cifra de $0,60\text{-}1,00 \text{ kg dm}^{-3}$ (RAIJ, 1991).

Sendo o solo, do ponto de vista físico-químico coloidal, um sistema trifásico disperso, a caracterização de sua porosidade total é de grande importância para a adoção do manejo adequado. Isso porque, este sistema está estreitamente ligado à dinâmica do armazenamento e de movimentação de água, assim como à circulação de ar no seu interior, essenciais aos processos bioquímicos das plantas, sobretudo àqueles relacionados com a produtividade vegetal. O processo de aeração do solo permite a troca do seu ar com a atmosfera, evitando a deficiência de oxigênio necessária à respiração celular, assim como a síntese de compostos orgânicos pelas plantas, excluindo as possibilidades de competição entre os microorganismos e as raízes, de forma a impedir o aparecimento de doenças. Por outro lado, a água do solo é o principal componente do protoplasma vegetal, sendo obrigatória nas reações do metabolismo, além de atuar especificamente como meio de transporte de nutrientes na planta e entre o sistema solo-planta (EPSTEIN; BLOON, 2006). Ainda, de acordo com Mercante et al. (2003) e Secco et al. (2005), a porosidade total tem apresentado grande relação com a compactação e a resistência à penetração do solo, uma vez que a diminuição do diâmetro dos poros é muito evidenciada quando há aumento da compactação.

Em relação ao solo agrícola ideal, sua porosidade total, definida como sendo a porção do volume do solo não ocupada pelas partículas sólidas, dada em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, é considerada ideal quando apresentar metade do seu volume, ou seja, $0,500 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Dela fazem parte a microporosidade, que é responsável pelo armazenamento de água, variando entre $0,250$ e $0,330 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e a macroporosidade, representada pelo volume de poros responsáveis pela aeração das raízes, variando de $0,170$ a $0,250 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Por outro lado, valores de macroporosidade inferiores a $0,100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ podem interferir no desenvolvimento das raízes a

ponto de reduzir substancialmente a produtividade agrícola, já para a cultura do feijoeiro valores inferiores a $0,150 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (REICHERT et al., 2007).

Wesseling e Van Wijk (1957) compararam os dados de diversos estudos e encontraram que a difusão no solo, principal mecanismo da sua aeração, deixa de se manifestar quando a macroporosidade tem um valor menor do que $0,100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Já Hodgson e MacLeod (1989) relataram súbitos aumentos no fluxo difusivo do oxigênio num Vertissolo, quando sua macroporosidade superou $0,150 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Contudo, Robinson (1960) observou, em um Latossolo húmico, que valores menores do que $0,110 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ desse atributo foram limitantes para o crescimento da cana-de-açúcar, assim como, Forsyte e Legarda (1973), que os valores menores do que $0,250 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ foram limitantes para a produtividade do feijão.

Quando o solo é compactado ocorre o aumento e a diminuição, respectivamente da resistência à penetração e da porosidade total, devendo-se esse fenômeno exclusivamente à redução dos poros maiores. Com isso, o conteúdo volumétrico de água e a capacidade de campo são aumentados, enquanto que a aeração, a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo saturado são reduzidas. Consequentemente, o escoamento superficial de água pode aumentar, e o crescimento vegetal ser reduzido, em virtude da diminuição da disponibilidade de água, da aeração deficiente e, portanto da restrição ao crescimento das raízes. Por outro lado, a compactação pode aumentar a tração e, consequentemente, diminuir a eficiência das máquinas que trafegarão na área. Esse efeito benéfico, embora de grande relevância, é um assunto pouco abordado na literatura, uma vez que o efeito da compactação sobre a qualidade do solo e a produtividade das culturas constitui-se no interesse principal (REICHART et al., 2007).

A porosidade total do solo geralmente diminui em profundidade, havendo casos de faixas intermediárias compactadas nas quais ocorrem baixos valores desse atributo. Na prática, ela tende a ser menor nos solos arenosos ($0,350\text{-}0,500 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) do que nos argilosos ($0,400\text{-}0,600 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Contudo, dependendo da granulometria, o solo pode ter uma porosidade total mínima de $0,300 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e máxima de $0,800 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (REICHARDT; TIMM, 2012). De acordo com Raij (1981), os solos arenosos geralmente são bem arejados e com drenagem rápida, o que lhes confere uma baixa capacidade de retenção de água. Em contrapartida, os argilosos apresentam elevada capacidade de retenção de água, resultante dos

maiores valores da microporosidade e da porosidade total. Contudo, algumas vezes podem apresentar problemas de aeração decorrentes dos baixos valores de macroporosidade.

A textura é indispensável para a classificação do solo e a predição do manejo e da aptidão de uso. Além disso, a textura é fator determinante das propriedades de retenção e capacidade de armazenamento de água e nutrientes, da distribuição de poros e, conseqüentemente, das propriedades de condução de água e gases, afetando a dinâmica das trocas com plantas e atmosfera (REICHARDT; TIMM, 2012). A textura ainda interfere na resistência do solo à ação de implementos de mobilização do solo e nas propriedades térmicas do solo, tais como capacidade calorífica e condutividade térmica (CAMPOS et al., 2014).

2.5.1.2 Atributos químicos do solo

A boa qualidade do solo é um fator determinante da produtividade elevada de matéria seca da forragem. O nitrogênio é um dos principais nutrientes a ser aplicado, por seu destaque como fator de produção dessa massa de matéria verde, pois proporciona maior perfilhamento e produtividade, melhorando a qualidade da pupunha produzida. Sabe-se que a fertilidade adequada do solo é um fator importante na longevidade das pastagens e pode afetar a degradação, pois, normalmente, a degradação do cultivo da pupunha apresenta-se mais frequentemente em solos com baixa fertilidade. Além disso, a taxa de mineralização da matéria orgânica reduz o estoque de nitrogênio, implicando o agravamento da degradação. No Brasil, especificamente em pastagens, praticamente não são utilizados fertilizantes e, ainda, em áreas localizadas que promovem renovação da pastagem com fertilização, os fertilizantes são utilizados apenas na implantação e essas áreas têm, em médio prazo, sofrido, novamente, processos de degradação (FERNANDES et al., 2008).

A matéria orgânica do solo engloba os resíduos vegetais em diversos estágios de decomposição, a biomassa microbiana, as raízes e a fração mais estável denominada húmus (CAMARGO et al., 1999). Possui uma superfície específica variando entre 800 e 900 m² g⁻¹ (MEURER et al., 2006), assim como, uma capacidade de troca catiônica que pode chegar a 1400 cmol_c kg⁻¹. Atualmente, com a adoção de sistemas conservacionistas de cultivo, tais como o plantio direto e o reduzido, tem-se evidenciado sobre a necessidade da resteva, que se constitui no material precursor da futura matéria orgânica humificada, assim como, sobre a importância dessa fase na ciclagem dos nutrientes, no controle da umidade e da temperatura, infiltração de água, erosão e da atividade biológica do solo (CANELLAS et al., 1999).

A acidez potencial corresponde às substâncias ou aos compostos que liberam H^+ para a solução do solo, causando sua acidificação. Estas incluem o Al^{3+} trocável adsorvido às cargas negativas das argilas e dos grupos funcionais $COOH$ e OH da matéria orgânica (BISSANI et al., 2004). A acidificação do solo pode levar a uma perda significativa da produtividade das culturas (FAGERIA; SANTOS, 2000).

Considerando que um mesmo sistema de cultivo do solo afeta de forma semelhante os regimes de temperatura e umidade, bem como o fracionamento e a incorporação dos resíduos vegetais nos solos, o efeito diferenciado desses sistemas sobre a taxa de decomposição deve-se provavelmente aos aspectos relacionados às diferentes capacidades protetoras da matéria orgânica à ação decompositora dos microrganismos. Nos Latossolos, além da mais alta proteção física da matéria orgânica pela maior capacidade de formação de agregados, a matéria orgânica encontra-se, em grande parte, associada às superfícies minerais dos óxidos de Fe, pouco afetadas pelo preparo do solo devido a elevada estabilidade química que possuem (OAEDES et al., 1989).

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 de cátions e a complexação de elementos tóxicos e 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. No tocante 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: $MO > 50,0 \text{ g dm}^{-3}$.

Nos solos tropicais altamente intemperizados, a mineralogia oxídica da fração argila representa um importante componente à estabilização da matéria orgânica que, por sua vez, juntamente com as argilas, contribui substancialmente para melhorar a sua agregação e sua estrutura. O incremento e a manutenção da matéria orgânica nos trópicos, sobretudo no cerrado, tem-se mostrado mais difícil do que na região subtropical sul brasileira. A adoção do

sistema plantio direto tem contribuído substancialmente para essa melhoria, tanto quantitativa quanto qualitativa, da matéria orgânica do solo, resultando em melhorias às suas características físicas e químicas (SILVA; MENDONÇA, 2007).

O estudo da matéria orgânica do solo merece uma grande atenção desde o século XIX devido, basicamente, a importância da mesma para o funcionamento dos ecossistemas. Intervem de forma ativa na formação do solo condiciona, seu comportamento em relação com o crescimento das plantas e microorganismos, ao influir no armazenamento de água, troca catiónica, e constituir uma fonte de nutrientes, entre outros aspectos (PORTA et al., 2003).

A matéria orgânica de um solo pode proceder da acumulação de restos e resíduos de plantas e animais (biomassa senescente incorporada ao solo, aportes antropogênicos de estiércol e restos de colheitas e produtos orgânicos resultantes da síntese industrial como o caso dos pesticidas), da decomposição de tecidos orgânicos (pela ação mecânica da fauna e dos microorganismos), da degradação ou decomposição de moléculas orgânicas complexas a compostos orgânicos mais simples ou bem da reorganização de certos produtos da degradação.

O tipo e a quantidade de matéria orgânica do solo tem uma forte variabilidade espacial de alguns ecossistemas para outros e dentro de cada um, tanto vertical quanto horizontalmente. Em solos naturais, concentra-se nos horizontes superficiais, ganhando-lhes uma cor escura ao longo dos horizontes mais profundos, que tendem a acumular-se pequenas quantidades de matéria orgânica. A variabilidade de todo o ecossistema está ligada às mudanças na distribuição das plantas. Assim, em climas úmidos, a vegetação pode cobrir todo o solo, de modo que toda a superfície recebe contribuições. Na vegetação do semi-árido é escassa, de modo que a heterogeneidade espacial será muito pronunciado.

A importância atribuída a ele a matéria orgânica resultante da sua participação nos processos de tamanha importância para o comportamento do solo e crescimento de plantas e organismos do solo, tais como: fornecimento à formação e estabilização de agregados, adsorção e troca iônica, energia e nutrientes, capacidade de retenção de umidade, edafogênicos vários processos e proteção contra a degradação do solo por erosão (PORTA et al., 2003).

Para a determinação do carbono orgânico do solo, existem vários métodos, neste caso, também tem sido o método de análise elementar baseado no calor de combustão do carbono orgânico do solo.

Em relação aos nutrientes vegetais, o pH do solo influencia as respectivas solubilidades, 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, impondo severas restrições à produtividade agrícola (MCBRIDE; BLASIAK, 1979).

O avanço da agricultura no Brasil tem sido feito principalmente nas áreas do Cerrado, cujos solos têm boas propriedades físicas e topografia favorável à mecanização. Entretanto, apresentam propriedades químicas inadequadas, como elevada acidez 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., 2007).

Ainda, o pH influencia a atividade de microrganismos do solo que estão ligados com a mineralização da matéria orgânica, nitrificação, fixação biológica de nitrogênio e infecção do sistema radicular com micorrizas, que aumentam a disponibilidade de nutrientes. É portanto, uma das propriedades químicas do solo mais importantes para a determinação da produção agrícola (FAGERIA; SANTOS, 2000).

Fageria (2001a) obteve a produtividade máxima de feijão com o pH de 6,2 em solo do cerrado. Já o pH ideal para as culturas de soja, feijão, milho e trigo está em torno de 6,0 (FAGERIA; ZIMMERMANN, 1998) e o pH médio do solo de cerrado está em torno de 5,0 (LOPES, 1983). Para o pH em CaCl_2 adotam-se os seguintes limites de interpretação de classes segundo Raij (1991): 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.

O pH é um número que define a concentração de íons de hidrogênio (logaritmo do inverso da concentração de íons de hidrogênio) e para a classificação da acidez ou alcalinidade das soluções em uma escala de 0 a 14, com 7 sendo soluções neutras . Soluções

ácidas tem pH entre 0 e 7 e soluções básicas (ou alcalino), um pH entre 7 e 14. O conceito de pH foi introduzido em 1915 em ciência do solo e desde então tem sido utilizado internacionalmente em todos os laboratórios de análise de solo. O pH do solo tem grande influência sobre a natureza do desenvolvimento da vegetação e das culturas, bem como os nutrientes assimilados elementos maiores e traços.

Além disso, o pH pode determinar a mobilidade dos diferentes elementos no solo, seja natural ou adicionado por descargas poluentes. Desempenha um papel decisivo na especiação dos metais que aparecem no chão ou em geral apenas na forma de ânions. No caso dos metais pesados nos solos cuja espécie só são cátions, o pH não vê a sua influência de forma decisiva em processos importantes, como a formação de hidroxicomplejos, adsorção em partículas sólidas ou precipitação de hidróxidos e carbonatos (PORTA et al., 2003). O pH de um solo podem ser alteradas como resultado da adição de adubo e água para irrigação e pela decomposição da matéria orgânica.

O pH do solo é frequentemente medido em água e uma solução de cloreto de potássio. A medida de água, o chamado pH atual, expressa a quantidade de H^+ na solução do solo, independentemente de íons de ácido existente, não conta como fixa no complexo de troca (íon H^+ e Al^{+3}). Estes são medidos em KCl, pH conhecido potencial para medir a acidez potencial do solo, onde K^+ são trocados no complexo de troca pelo ácido. Por esta razão, existem diferenças entre o pH medido em água e medido em KCl (que foi medido em água é de 0,5 a 1,5 unidade superior ao medido em KCl). No Quadro 1 são apresentados os valores de pH e suas respectivas faixas.

Quadro 1: Valores indicativos de pH e termos usuais para descrever os intervalos de pH

pH	Avaliação
<4,5	Extremadamente ácido
4,5 – 5,0	Muito fortemente ácido
5,1 – 5,5	Fortemente ácido
5,6 – 6,0	Medianamente ácido
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,3	Neutro
7,4 – 7,8	Medianamente básico
7,9 – 8,4	Básico
8,5 – 9,0	Ligeramente alcalino
9,1 – 10,0	Alcalino
>10,0	Fortemente Alcalino

2.6 A estatística clássica e a geoestatística na pesquisa agronômica

As propriedades do solo, em geral, não são aleatoriamente distribuídas no espaço, obedecendo a um arranjo estrutural com uma dimensão característica que é o seu domínio, correspondendo à distância dentro da qual há interdependência dos valores medidos (RUSSO; BRESLER, 1981). Análises estatísticas “clássicas”, independência das observações, são inadequadas para estudos com este enfoque e, devem ser substituídas por análises espaciais nas quais são consideradas as correlações entre observações vizinhas (HAMLETT et al., 1986).

Essas análises são baseadas na teoria das variáveis regionalizadas, base da geoestatística, em que, a variabilidade espacial pode ser caracterizada por meio de autocorrelogramas, semivariogramas e métodos de interpolação, como por exemplo, a “krigagem” (LIBARDI et al., 1996). A partir destas medidas localizadas espacialmente é definido o grau de dependência espacial do parâmetro avaliado. A estatística clássica, por meio das estatísticas descritivas, não contempla a posição relativa da amostra no terreno e consequentemente a distribuição espacial.

Desse modo, o conhecimento da variabilidade do solo subsidia a tomada de decisão para diferentes sistemas de manejo, além de outras aplicações como em levantamentos de solos, conhecimento e inferências nas propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos, entendimento dos processos geomórficos e pedogênicos, estimativas de densidade amostral dentre outros (CAMPOS et al., 2014).

Muitos autores têm estudado a variabilidade espacial dos parâmetros químicos e físicos dos solos (MONTANARI, 2009); outros estudos enfocam a variabilidade dos atributos do solo num contexto pedogeomórfico (VIEIRA et al., 2010).

Recentemente estudos enfocando a variabilidade espacial das propriedades do solo associados aos modelos de paisagem têm auxiliado no mapeamento de locais específicos de manejo (MONTANARI et al., 2005). Estes estudos ajudaram a caracterizar diferentes ambientes, e servem de base para a transferência de conhecimento para locais de mesmo domínio pedogeomórfico.

2.6.1 Métodos estatísticos para análise das variáveis da cultura e do solo

2.6.1.1 Estatística descritiva

A estatística descritiva sempre foi muito utilizada em pesquisas na Ciência do Solo, pois fornece uma indicação inicial do comportamento dos dados, permitindo assim uma análise preliminar da população em estudo (RIBEIRO JÚNIOR, 1995).

Para uso da estatística descritiva em dados oriundos de experimentos de campo, é admitido solo homogêneo. Portanto, área e/ou solos homogêneos são escolhidos muitas vezes, sem um critério bem definido de homogeneidade, onde as parcelas são distribuídas ao acaso para evitar o efeito da irregularidade porventura existente (CARVALHO et al., 2000).

Segundo BUSSAB e MORETTIN (1987), as medidas de dispersão mais utilizados para expressar a variabilidade de um conjunto de dados são a variância, o desvio padrão, o coeficiente de variação e a amplitude total, por serem fáceis de calcular e interpretar. Quando os valores tendem a se concentrarem próximos da média, a variância é pequena. Entretanto, se os valores tendem a se afastar da média a variância é grande. O coeficiente de variação (CV), segundo WEBSTER e OLIVER (1990), indica o grau da variabilidade da variável em estudo, não refletindo o seu significado físico, porém, muito utilizado para comparar atributos que possuem magnitudes diferentes.

Outro parâmetro que a estatística descritiva utiliza com frequência é a média aritmética, que é um único valor representativo do conjunto de dados. Outra medida é a mediana, a qual representa o valor central da variável em estudo, define exatamente o centro da distribuição.

2.6.1.2 Geoestatística

Libardi et al. (1996) relataram que enquanto na estatística clássica as amostras são coletadas ao acaso, na geoestatística os locais de amostragem são definidos. Os autores observaram ainda, que nos dois tipos de coleta pode-se calcular a média e a variância, entretanto, somente por meio da geoestatística, que considera a dependência espacial entre as medidas, pode-se obter a estrutura da variância, evidenciando aspectos não disponíveis por outros métodos. As pesquisas no Brasil sobre a variabilidade espacial de atributos do solo, usando técnicas da geoestatística vem sido muito estudada (MONTANARI et al., 2013a).

O estudo da variabilidade espacial do solo é muito importante para o planejamento e análise das pesquisas agropecuárias. O uso de técnicas geoestatísticas permite a elaboração de semivariogramas, que quantificam a dependência espacial de parâmetros do solo, possibilitando a obtenção de estimativas da propriedade do solo, em locais não amostrados, com erro mínimo (GUIMARÃES et al., 1992).

A geoestatística é utilizada para o estudo da variabilidade espacial de propriedades do solo, sendo aplicada à Ciência do Solo (BURGESS; WEBSTER, 1980), e auxilia na escolha, locação de experimentos e interpretação dos resultados (VIEIRA et al., 1991). O uso da geoestatística requer coleta de amostras previamente planejada, com a localização espacial de cada ponto de amostragem.

2.6.1.2.1 Semivariograma

Na geoestatística, a variabilidade espacial é quantificada a partir de correlogramas e semivariogramas, predominantemente que determinam a dependência espacial entre unidades amostrais bem como o alcance da influência de cada ponto amostral (VIEIRA et al., 1981).

O semivariograma nos informa o tipo e a forma da dependência espacial, e segundo Vieira et al., (1983), constitui-se na primeira etapa da análise geoestatística, fornecendo dados para o interpolador confeccionar mapas.

O semivariograma experimental é um gráfico da semivariância em função da distância que caracteriza a estrutura de dependência espacial da variável em estudo (Eq. 2), ou seja, o semivariograma é uma função que relaciona a semivariância com o vetor distância, podendo ser representada analítica e/ou graficamente. A semivariância é definida como:

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

em que,

$\hat{\gamma}(h)$ = Semivariância estimada;

$N(h)$ = Número de pares de observações $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ separados pela distância h .

O semivariograma é definido por três parâmetros: o patamar ($C_0 + C_1$), o efeito pepita (C_0) e o alcance (a) (Figura 1). O efeito pepita é a semivariância diferente de zero quando a distância entre as amostras tende a zero, representa a variância que não pode ser detectada pelo semivariograma, seja por necessidade de se coletar amostras a distâncias menores, seja por um erro de alguma etapa do trabalho, o patamar, corresponde ao ponto onde toda a semivariância de amostra é de influência aleatória, correspondendo à variância total, obtida pela estatística descritiva (TRANGMAR et al., 1985). O alcance mede a distância limite da dependência espacial.

Assim, o meio de ligação entre o conjunto de dados e a ferramenta que se pode ser usada (estimadores e simuladores) é a escolha do modelo adequado para o semivariograma. Portanto, a modelagem correta é fundamental, principalmente quando os parâmetros (efeito pepita e alcance) forem determinados com o objetivo de serem usados na estimação de valores da variável aleatória.

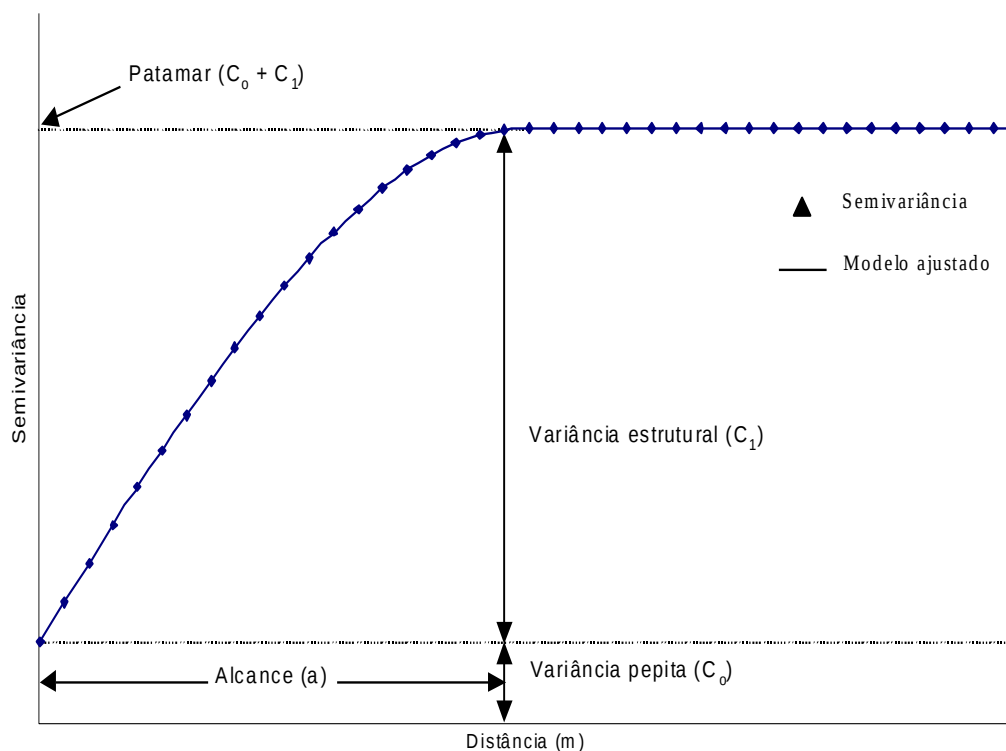


Figura 1. Características do semivariograma

Em estudos relacionados a solos, podem-se ajustar vários modelos de semivariogramas, tais como: esférico, exponencial, gaussiano e linear. O modelo ajustado será aquele cuja função melhor representar as semivariâncias observadas. O ideal é que a semivariância aumente com a distância entre os pontos amostrados até atingir um valor mais ou menos constante. Portanto, um semivariograma ideal é aquele que passa através da origem quando a distância amostral de separação é igual a zero e atinge um patamar a uma determinada distância.

Alguns modelos básicos, usuais em geoestatística, denominados de modelos isotrópicos por Isaaks e Srivastava (1989), são divididos em dois tipos: modelos com patamar e modelos sem patamar.

Eles são descritos a seguir:

Modelos com patamar:

(a) Modelo esférico:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0 & , |\mathbf{h}| = 0 \\ C_o + C_l \left[\frac{3}{2} \left(\frac{|\mathbf{h}|}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{|\mathbf{h}|}{a} \right)^3 \right] = C_o + C_l [\text{Sph}(|\mathbf{h}|)] & , 0 < |\mathbf{h}| \leq a \\ C_o + C_l & , |\mathbf{h}| > a \end{cases} \dots\dots\dots(03)$$

O modelo esférico (Eq. 3) é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita (C_o) e do patamar ($C_o + C_l$), depois traçando-se uma reta que intercepte o eixo y em C_o seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h = 0$. Essa reta cruzará o patamar à distância, $a' = (2/3)a$. Assim, o alcance (a) será $a = 3a'/2$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $(1/3)a$ (VIEIRA, 2000), sendo este modelo o de maior ocorrência para as propriedades de solo (TRANGMAR et al., 1985).

(b) Modelo exponencial:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0 & , |\mathbf{h}| = 0 \\ C_0 + C_I \left[1 - \exp \left(- \frac{|\mathbf{h}|}{a} \right) \right] = C_0 + C_I [\text{Exp}(|\mathbf{h}|)] & , |\mathbf{h}| \neq 0 \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

Uma diferença entre o modelo exponencial (Eq. 4) e o esférico é que este modelo atinge o patamar assintoticamente, com o alcance prático definido como a distância na qual o valor do modelo é de 95% do patamar (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Os parâmetros C_0 e C_I , para o modelo exponencial, são determinados da mesma maneira que para o esférico (VIEIRA, 2000).

(c) Modelo gaussiano:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0 & , |\mathbf{h}| = 0 \\ C_0 + C_I \left[1 - \exp \left(- 3 \frac{|\mathbf{h}|^2}{a^2} \right) \right] = C_0 + C_I [\text{Gau}(|\mathbf{h}|)] & , |\mathbf{h}| \neq 0 \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

O modelo gaussiano (Eq. 5) é usado muitas vezes para modelar fenômenos extremamente contínuos (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Semelhante ao modelo exponencial, o modelo gaussiano atinge o patamar assintoticamente, e o parâmetro é definido como o alcance prático ou distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). O que caracteriza este modelo é seu ponto de inflexão próximo à origem.

Modelo sem patamar:

(d) Modelo potência:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \begin{cases} 0 & , |\mathbf{h}| = 0 \\ C_0 + c \cdot |\mathbf{h}|^q = C_0 + \text{Pot}(|\mathbf{h}|) & , |\mathbf{h}| \neq 0 \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

O modelo potência (Eq. 6) não atinge o patamar. Em geral, esse tipo de modelo é utilizado para modelar fenômenos com capacidade infinita de dispersão.

O parâmetro (l) tem que ser estritamente maior que zero e menor que 2, a fim de garantir que o semivariograma tenha positividade definida condicional. Quando $e = 1$, temos o modelo linear.

2.6.1.2.2 Krigagem

Muitas vezes o interesse da análise não se esgota em modelar a estrutura de variabilidade. Em diversas situações o interesse está na estimação de valores em pontos não amostrados, seja por interesse local ou pela intenção de obter um detalhamento da área que vai além do permitido pela amostra.

A existência de um modelo de dependência espacial fornece os parâmetros necessários para estimar os valores das propriedades do solo em locais não amostrados. A krigagem usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, modelada no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima.

Krigagem nada mais é do que uma média ponderada dos valores observados de uma propriedade Z dentro de uma vizinhança. Somente os pontos que estão espacialmente relacionados com o local a ser estimado (dentro da amplitude da dependência espacial) são usados na krigagem. Os vizinhos mais próximos têm maiores pesos ponderadores. Assim, o semivariograma deve ser bem preciso somente nos primeiros lags. Pouco ganho é obtido para grandes distâncias. Existem alguns tipos de krigagem que serão explicitados abaixo:

Krigagem simples: nessa forma de krigagem adota-se uma única média em toda a área;

Krigagem ordinária pontual: nessa forma de krigagem, para cada estimativa é identificada uma média do valor da propriedade naquela vizinhança;

Krigagem em bloco: a krigagem em blocos, fornece um valor médio para uma determinada região no espaço.

Segundo Trangmar et al., (1985), a krigagem em blocos se baseia na mesma equação do estimador da krigagem pontual, mudando apenas a forma de se determinar os pesos. No lugar da semivariância entre pontos amostrais e ponto estimado, usa-se a semivariância média

entre pontos amostrais e todos os pontos dentro de um bloco. Neste trabalho os dados serão trabalhados com a krigagem em blocos.

Segundo Trangmar et al., (1985), uma mudança na forma do semivariograma acarreta diferentes pesos aos valores medidos. Assim, o formato gaussiano diz respeito a fenômenos com forte continuidade espacial, o que gera pesos maiores para os dados mais próximos que o modelo exponencial e esférico.

A magnitude do efeito pepita é importante na krigagem porque estabelece um limite menor para o tamanho da variância de estimação e, portanto, para a precisão da interpolação. Isto é quanto menor o efeito pepita do semivariograma, menor será a variância da estimação, ou, mais precisamente, quanto maior for a diferença do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma, maior a continuidade do fenômeno, menor a variância da estimativa, ou maior a confiança que se pode ter na estimativa.

A mudança do alcance é a que promove o efeito relativamente menor nos pesos. Contudo, o acréscimo tende a promover redução da variância de krigagem. Experiência indica que krigagem em bloco produz mapas mais refinados que a krigagem pontual. A krigagem em bloco é mais importante quando o efeito pepita é grande. Na Figura 2 são apresentados os mapas construídos utilizando-se a krigagem pontual e a krigagem em blocos.

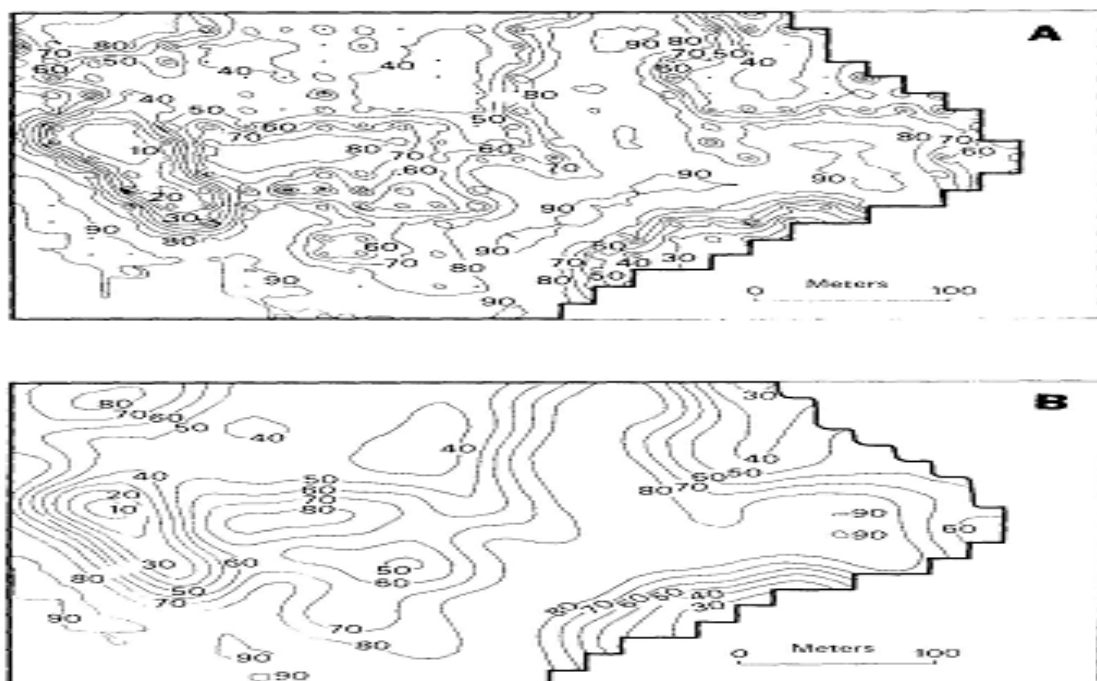


Figura 2. Krigagem pontual (A) e krigagem em blocos (B).

2.6.1.2.3 Semivariograma cruzado

O semivariograma cruzado é uma ferramenta geoestatística que permite verificar a continuidade cruzada entre as variáveis regionalizadas, tornando possível avaliar se a variabilidade de uma série é acompanhada pela da outra, de forma direta como indireta. Por exemplo, propriedades do solo e atributos da planta, condutividade hidráulica e retenção de água, as quais são difíceis e caras para se medir, tais como a granulometria da camada superficial do solo. A facilidade de se utilizar os teores granulométricos em estimativas tem atraído o interesse de pesquisadores que utilizam modelos para predição da produtividade das culturas, erosão e potencial de produção. Em situações nas quais há a correlação espacial entre duas propriedades, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas, que são expressas no semivariograma cruzado, sendo o método chamado de co-krigagem, o qual pode ser mais preciso do que o da krigagem em si (VIEIRA et al., 2010).

2.6.1.2.4 Co-krigagem

Algumas variáveis apresentam grande dificuldade de determinação, qual seja quanto ao tempo para a análise, ou quanto ao custo das análises (GUIMARÃES, 2000). O conhecimento das relações entre as variáveis pode contribuir para a realização de estimativas de variáveis em função de outros atributos (KIEHL, 1979), isto quando existir correlação espacial entre duas variáveis, modelada pelo semivariograma cruzado, sendo possível estimar o valor de uma variável para um determinado local não amostrado pela técnica de co-krigagem, com base na correlação espacial de outra variável. A co-krigagem é uma técnica de avaliação geoestatística que permite estimar uma variável primária de interesse por intermédio de uma variável secundária. Para que sua aplicação seja possível é necessário que ambas estejam correlacionadas, para que o variograma cruzado seja representativo (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Ela pode ser utilizada para estimar valores de uma propriedade do solo de difícil mensuração (como exemplo, a condutividade hidráulica), com base em uma outra medição mais fácil (por exemplo, o teor de argila), desde que sejam correlacionadas espacialmente. Essa estimativa pode ser até mais precisa do que a krigagem de uma variável simples, quando o semivariograma cruzado mostrar dependência espacial entre duas variáveis (VIEIRA et al., 2010).

2.6.1.2.5 Exclusão da tendência quando da não-formação da estacionariedade

No caso da não-estacionariedade de um atributo qualquer pôde-se efetuar a retirada da tendência dos dados pela técnica do refinamento 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. Assim, por se tratar de variável não-estacionária, se decompõe em:

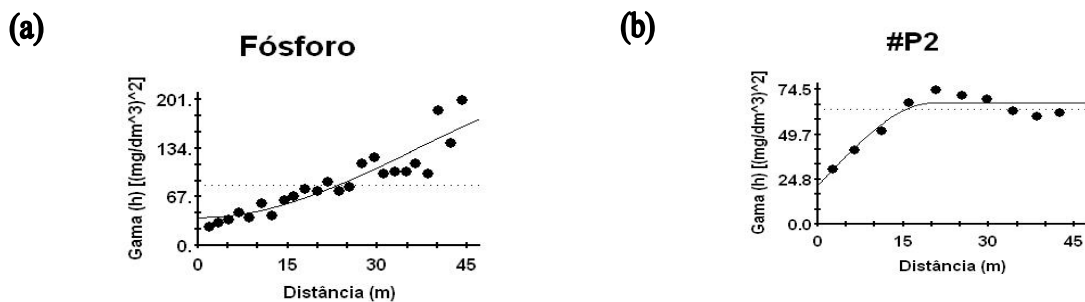


Figura 3. Exemplo de semivariogramas: (a) não-estacionário, e (b) estacionário.

$$Z(s) = m(s) + R(s) \dots \dots \dots (7)$$

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

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

$$m(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y.....(8)$$

$$m(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy.....(9)$$

$$m(x,y) = a_0 + a_1.x + a_2.y + a_3.x^2 + a_4.y^2 + a_5.xy + a_6.x^3 + a_7.y^3 + a_8.x^2y + a_9.y^2x.....(10)$$

Dessa forma, a eleição da tendência **m(s)**, efetuada pelo ajuste dos mínimos quadrados para cada modelo, é obtida pela escolha daquele que apresentar o maior coeficiente de determinação. Definido o modelo, pode-se calcular o resíduo **R(x,y)**, a partir da eq. (10), efetuando-se:

$$R(x,y) = Z(x,y) - m(x,y).....(11)$$

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:

$$Z^*(x,y) = m^*(x,y) + R^*(x,y).....(12)$$

onde: **Z*(x,y)** é a estimativa da variável não-estacionária **Z(s)**, **m(x,y)** é a tendência da variável **m(s)**, e **R*(x,y)** é a estimativa do resíduo resultante da krigagem. Desta forma, pode-se calcular 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 possa aparecer o valor original 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 o **m*(x,y)**, a partir dos coeficientes adjuntos calculados pela expressão ajustada anteriormente. A partir do conhecimento do **R*(x,y)** e do **m*(x,y)** podem ser calculados os valores do atributo retrotransformado pelo uso da Equação (9). Com isso, retorna-se ao GS⁺ e efetua-se a

krigagem com tais valores retrotransformados (ξatributo), obtendo-se o mapa de krigagem final.

2.6.1.2.6 Análise multivariada

A estatística multivariada é um conjunto de técnicas estatísticas utilizados em situações nas quais várias variáveis são oriundas de um mesmo conjunto de pontos amostrais, no caso de dados do solo. De acordo com Mingoti (2005), a análise de dados, que apresentam um grande número de variáveis correlacionadas entre si torna-se complexa e de difícil interpretação, ao utilizarmos os métodos comuns de estatística univariada. Portanto, estudos em Ciência do Solo as interações de inúmeros atributos podem ser estudadas por métodos estatísticos multivariados, pois permitem, por exemplo, o agrupamento daquelas observações amostrais com características similares permitindo um melhor entendimento das variações dos processos que ocorrem no solo (FIDALSKI et al., 2007; ALMEIDA Jr, 2012; ARAÚJO et. al, 2013). Em adição, novos estudos são necessários para a criação de zonas específicas de manejo do solo por meio de técnicas multivariadas, como a análise de componentes principais e correlação canônica aliadas à métodos geoestatísticos como a interpolação por krigagem ordinária, entre os componentes produtivos de vegetal com os do solo (JIANG & THELEN, 2004; MARTÍN ET AL., 2005; DALCHIAVON et al., 2011; MONTANARI et al., 2012).

A análise de componentes principais (ACP) pode ser aplicada para todas as variáveis de solo, a fim de explicar a estrutura de variância dos dados avaliados, tendo um conjunto menor de variáveis sem inter-relações em consideração (CP), a partir de combinações lineares entre as variáveis originais (HAIR et al., 2005). A análise de agrupamento é uma análise hierárquica, que serve para agrupar os acessos mais similares (FREDDI et al., 2008). Neste estudo, a distância euclidiana e o algoritmo de Ward são usados para o agrupamento.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Registro, no município de Registro (SP), na Lat. 24°32'08" e na Long. 47°51'55", com uma precipitação média anual é de 1.500 mm, enquanto a sua temperatura média é de 25° C. O clima é do tipo Af, segundo Köppen-Geiger, caracterizado como tropical sem estação seca.

A caracterização do tipo de solo está definindo como sistema de planícies e terraços fluviais do Ribeira do Iguape, descrito como terreno planos no baixo ribeira e/ou região da depressão tectônica do Ribeira, de sedimentos modernos, em solos aluviais argilosos do tipo Cambissolos Eutróficos em áreas de montante e hidromórficos eutróficos em solos de planície.

O preparo do solo foi realizado por meio de subsolagem em 09 de janeiro de 2012. Em 19 de janeiro de 2012 foi realizado a gradagem aradora. Em 20 de janeiro de 2012 realizou-se a correção do solo com $1,5\text{ t ha}^{-1}$ e em seguida realizada a gradagem niveladora.

A adubação de plantio contou com 150 g do formulado NPK (4-14-08) e de manutenção foram realizadas de acordo com as análises de solo. Foi aplicado no primeiro ano de plantio a adubação de cobertura com $60\text{ kg ha}^{-1}\text{ N}$; $30\text{ kg ha}^{-1}\text{ P}_2\text{O}_5$ e $40\text{ kg ha}^{-1}\text{ K}_2\text{O}$ + 1250 kg ha^{-1} de FTE banana (Ca 7 %, S 5,7 %, B 1 %, Cu 1 %, Mn 1 %, Mo 0,1 % e Zn 18 %), sendo todas as aplicações ao redor da planta. No segundo ano foi aplicado $100\text{ kg ha}^{-1}\text{ N}$, $50\text{ kg ha}^{-1}\text{ P}_2\text{O}_5$ e $60\text{ kg ha}^{-1}\text{ K}_2\text{O}$ + 100 kg ha^{-1} de FTE banana e calcário 1000 kg ha^{-1} . O plantio foi realizado em 24 de janeiro de 2012, da UNESP Campus Experimental de Registro, SP, e as coletas de planta e solo foram realizadas dia 25 de abril de 2014.

O espaçamento utilizado para a instalação do experimento foi de 2×1 (entrelinhas $\times$ planta). A área contendo 54 pontos foi georreferenciada com o auxílio de um receptor GPS Garmin, de forma a representar toda a área de amostragem de aproximadamente 1 ha , sendo a coleta realizada ao entorno da planta. Para a coleta de atributos da planta utilizou uma régua graduada de 2 m para determinar a altura (**Alt**). O diâmetro (**Diam**) foi coletado a uma altura de 50 cm do solo com o auxílio de um paquímetro digital. E, para o número de folhas e perfilhos (**NF e Perf**) foram feitos a contagem manualmente.

Foram determinados nas amostras de solo a **MO**, **pH**, **P**, **K⁺**, **Ca²⁺**, **Mg²⁺**, **H+Al** (AP), soma de bases (**SB**), capacidade de troca catiônica (**CTC**), saturação por bases (**V%**) e saturação por alumínio (**m%**), segundo procedimentos descritos por Raij et al. (1991). As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Fertilidade de Solo do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Ilha Solteira. E também a metodologia empregada para determinação dos atributos físicos do solo foi àquela determinada pela Embrapa (1997). A RP foi obtida com o penetrômetro de impacto. A expressão utilizada para o cálculo foi a de Stolf (1991), está representada pela equação:

$$\mathbf{RP} = \{5,581 + 6,891 \times [\mathbf{N} / (\mathbf{P} - \mathbf{A}) \times 10]\} \times 0,0981 \text{ (MPa)} \dots\dots\dots(13)$$

em que: **RP** é a resistência mecânica à penetração (MPa); **N** é o número de impactos efetuados com o martelo do penetrômetro para a obtenção da leitura; e **A** e **N** são as leituras antes e depois da realização dos impactos (cm).

Para a umidade gravimétrica (**UG**) utilizou-se o trado de caneca. Com isso, determinou-se a Umidade Volumétrica (**UV**) de acordo com a equação:

$$\mathbf{UV} = \mathbf{UG} \times \mathbf{DS} \dots\dots\dots(14)$$

em que: **UV** é a umidade volumétrica (m³ m⁻³); **UG** é a umidade gravimétrica (kg kg⁻¹); e **DS** é a densidade do solo (kg dm⁻³). As amostras para determinação da Densidade do Solo (**DS**), determinada pelo método do anel volumétrico, e análise granulométrica (**Areia, Argila e Silte**) foi por meio de trincheiras.

Os atributos de plantas foram: Número de folhas (**NF**); Diâmetro do caule (**Diam**), cm; Altura (**Alt**), m e Perfilhos (**Perf**). Já os atributos de solo foram: resistência mecânica à penetração (**RP**) MPa; umidade gravimétrica (**UG**), kg kg⁻¹; umidade volumétrica (**UV**), m³ m⁻³; densidade do solo (**DS**), kg dm⁻³; densidade da partícula (**DP**), kg dm⁻³; porosidade total (**PT**), m³ m⁻³; Areia g kg⁻¹; Argila g kg⁻¹ e Silte g kg⁻¹. Todos os atributos do solo foram coletados na profundidade de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m.

Para cada atributo estudado, efetuou-se a análise descritiva clássica, com auxílio do software estatístico SAS (SCHLOTZHAVER; LITTELL, 1997), em que foram calculados a média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio-padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e distribuição de frequência. Posteriormente, realizou-se a identificação dos *outliers*, efetuando a substituição dos seus valores pelo valor médio dos circunvizinhos contidos na malha.

Para testar a hipótese de normalidade, ou de lognormalidade, foi utilizada a estatística de Shapiro e Wilk a 5 %. Também, foi montada a matriz de correlação, objetivando efetuar as correlações lineares simples para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados, assim como apresentar as análises de regressões para os pares de maior interesse. Assim, selecionaram-se aqueles de maior correlação linear e que, portanto, poderiam apresentar semivariograma cruzado e a consequente co-krigagem. Isoladamente para cada atributo, foi analisada sua dependência espacial, pelo cálculo do semivariograma simples. Contudo, para aqueles que apresentaram interdependência espacial, calcularam-se também

seus semivariogramas cruzados, com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote *Gamma Design Software* (GS⁺, 2004).

Os ajustes dos semivariogramas simples e cruzados, em função de seus modelos, foram efetuados prioritariamente pela seleção inicial de: a) menor soma dos quadrados dos desvios (SQD); b) maior coeficiente de determinação (r^2), e c) maior avaliador da dependência espacial (ADE). A decisão final do modelo que representou o ajuste foi realizada pela validação cruzada, assim como para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionou a melhor malha de krigagem e/ou co-krigagem, realizadas por meio da krigagem em blocos. Para cada atributo, foram relacionados o efeito pepita (C_0), o alcance (A_0) e o patamar ($C_0 + C$). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme a seguinte expressão (GS⁺, 2004):

$$ADE = [C/(C + C_0)] \cdot 100 \dots \dots \dots (15)$$

onde: **ADE** é o avaliador da dependência espacial; **C**, a variância estrutural; e **C + C₀**, o patamar.

A interpretação proposta para o ADE foi a seguinte: ADE (≤ 20 % indicou variável espacial com *muito baixa* dependência; $20\% < ADE \leq 40\%$ indicou variável espacial com *baixa* dependência; $40\% < ADE \leq 60\%$ indicou variável espacial com *média* dependência; $60\% < ADE \leq 80\%$ indicou variável espacial com *alta* dependência e de $80\% < ADE \leq 100\%$ indicou variável espacial com *muito alta* dependência (DALCHIAVON; CARVALHO, 2012).

Por outro lado, sabe-se que a validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas simples e cruzados, que respectivamente efetuarão a krigagem e a co-krigagem. Na sua análise, cada ponto contido dentro do domínio espacial é removido individualmente, sendo seu valor estimado como se não existisse. Dessa forma, pode-se construir um gráfico de valores estimados *versus* observados para todos os pontos. O coeficiente de correlação (r) entre tais valores reflete a eficiência do ajuste, dado pela técnica da soma dos quadrados dos desvios, representando a equação de regressão linear em questão. Um ajuste perfeito teria o coeficiente de regressão igual a 1 e a linha do melhor ajuste coincidiria com o modelo perfeito, isto é, com o coeficiente linear igual a zero e o angular igual a 1 (GS⁺, 2004). Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação, os mapas de krigagem e de co-krigagem, para análise da dependência e da interdependência espacial entre os atributos. Os componentes

geoestatísticos determinados foram o semivariogramas simples, semivariograma cruzado, validação cruzada, krigagem e a co-krigagem.

Também foram aplicados três métodos estatísticos multivariados, visando classificar os acessos (cada um dos 54 pontos amostrais) em grupos: análise de agrupamentos hierárquica, análise de agrupamentos não-hierárquica (k-means) e análise de componentes principais (ACP). Todas as análises multivariadas foram realizadas após a padronização das variáveis em que cada uma ficou com média 0 e variância unitária (1).

Nas análises de agrupamentos, o objetivo foi buscar uma classificação de acordo com as relações que as amostras apresentaram, formando grupos de pontos amostrais que tenham maior similaridade dentro dos grupos e maior dissimilaridade entre os grupos. Na análise de agrupamento hierárquica foi estabelecida uma ordem, ou estrutura em forma de árvore, que produziu sequências de partições em classes cada vez mais vastas (dendrogramas). A análise de agrupamentos hierárquica (SNEATH; SOKAL, 1973) foi realizada calculando-se a distância euclidiana entre os pontos amostrais, para o conjunto das variáveis, e utilizando o algoritmo de Ward para a obtenção dos agrupamentos de acessos similares. Após adotar uma quantidade de grupos que melhor caracterizou a estrutura de grupos contida nos dados originais, foi feita a análise de agrupamento por método não-hierárquico utilizando o algoritmo k-means (HAIR JUNIOR et al., 2005) que permitiu caracterizar o padrão das variáveis por grupo considerado. Na análise de agrupamento não-hierárquica (k-means), a sequência de partições não ocorreu como na análise hierárquica, ou seja, foram produzidos diretamente, uma partição em um número (k) fixo de grupos.

A estrutura multivariada contida no conjunto inicial de dados foi avaliada pela análise de componentes principais que condensou a informação relevante em um conjunto menor de variáveis latentes ortogonais que são denominados componentes principais (autovetores), gerados por combinações lineares das variáveis originais a partir dos autovalores da matriz de covariância. ACP é uma técnica estatística multivariada, que condensa as variáveis medidas em novas variáveis não medidas, na tentativa de avaliar o poder discriminatório das variáveis originais. Cada par de componentes principais (CPs) gera uma representação bidimensional do espaço amostral original, denominado biplot, onde é possível explicar a estrutura de variáveis direcionando feixes de variáveis nas regiões de máxima variabilidade. Foram considerados os componentes principais cujos autovalores foram superiores à unidade (KAISER, 1958). Os coeficientes das funções lineares, que definem os CPs, foram utilizados

na interpretação de seu significado, usando o sinal e o tamanho relativo dos coeficientes como uma indicação do peso a ser atribuído para cada variável. Somente coeficientes com altos valores foram considerados para a interpretação, usualmente aqueles maiores ou iguais a 0,50 em valor absoluto. Fez-se a ACP de todas as variáveis de solo e planta estudadas, esses componentes foram construídos pela combinação da correlação entre as variáveis, sendo extraídas em ordem decrescente de importância, em termos de sua contribuição para a variação total dos dados (SILVA et al., 2010), utilizando-se o pacote estatístico Statistica.

Estas correlações foram classificadas de acordo com Coelho (2003), onde o critério para classificação dos autovetores (valores que representam o peso de cada caractere, em cada componente, e variam de -1 a +1) foi: valor absoluto $< 0,30$, classificado como pouco significativo; $0,30-0,40$, considerado medianamente significativo; e $\geq 0,50$, tido como altamente significativo. E então as variáveis que tiveram autovetores com peso $\geq 0,50$ (altamente significativo) foram submetidas a uma nova ACP, para ranquear os componentes com maior carga fatorial (escore).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise descritiva dos dados

4.1.1 Atributos dos componentes produtivos da cultura da pupunha e dos físicos do solo

De acordo com Pimentel Gomes e Garcia (2002), a variabilidade dos atributos podem ser classificados conforme a magnitude de seu coeficiente de variação (CV). Suas classes foram determinadas como baixa ($CV \leq 10\%$), média ($10\% < CV \leq 20\%$), alta ($20\% < CV \leq 30\%$) e muito alta ($CV > 30\%$). No Quadro 2, o número de folhas (NF) apresentou média variabilidade, com coeficiente de variação de 19,7%. Já para os atributos Diam, Alt e Perf apresentaram muito alta variabilidade, com coeficientes de 41,5%; 33,8% e 36,2%, respectivamente.

Em todas as profundidades do solo, a resistência mecânica a penetração (PR), umidade gravimétrica (UG) e umidade volumétrica (UV) apresentaram média variabilidade, com coeficientes de variação entre 11,5-18,2%, porém, a argila e o silte, apresentaram média variabilidade (13,2 e 10,6%), apenas na profundidade de 0,10-0,20 m. Para os demais atributos de solo (DS1, DS2, DP1, DP2, PT1, PT2, AREIA1, AREIA2, ARGILA1 e SILTE1), sua variabilidade foi baixa (Quadro 2). Provavelmente, esta baixa variabilidade pode estar

atribuída ao fato de serem atributos que variam pouco devido ao fator de formação do solo tempo.

Quando uma variável estatística qualquer possuir distribuição de frequência do tipo normal a medida de tendência central mais adequada para representá-la deve ser a média. Em contrapartida, pela mediana, ou pela média geométrica, caso seja do tipo lognormal (ROSA FILHO et al., 2009). Portanto, a medida de tendência central a representar os atributos Diam, Alt, Perf, UG1, UG2, UV1, UV2, DS1, DS2, PT1, PT2, AREIA1, AREIA2, ARGILA1, ARGILA2, SILTE1 e SILTE2 deverá ser a média. Isso por que, apresentaram distribuição de frequência do tipo normal, com coeficientes de assimetria positiva, entre 0,018 e 0,497, assim como, negativa entre -0,0001 e -0,469. Já os coeficientes de curtose positiva ficaram entre 0,134 e 1,871, assim como, as negativas entre -0,513 e -0,052. Contudo, e independentemente de tais coeficientes, todos foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk, uma vez que tal probabilidade variou entre 0,1654 e 0,7308 (Quadro 2). Já para NF, RP1, RP2, DP1 e DP2 a distribuição de frequência foi tida como indeterminada.

Para os componentes da cultura da pupunha, o valor médio do número de folhas foi de 5,6. Já para o diâmetro a média observada foi de 6,3 cm. A média da altura foi de 1,16 m, enquanto a média do número de perfilhos foi de 6,7. Bovi et al. (2007) estudando a utilização do lodo de esgoto e produção de palmito em pupunheira em um Neossolo encontraram equação de regressão significativa com um valor de r^2 de 0,97 que com o aumento do diâmetro aumenta a produtividade da cultura da pupunheira.

Em todas as camadas trabalhadas, os baixos valores da densidade do solo ($DS1=1,261 \text{ kg dm}^{-3}$, $DS2=1,254 \text{ kg dm}^{-3}$) e da resistência à penetração ($RP1=1,095 \text{ MPa}$, $RP2=2,007 \text{ MPa}$) atestaram que, durante toda a condução do experimento, o solo encontrava-se não compactado. Esse fato tornou-se um fator favorável para o máximo desenvolvimento da cultura pupunha, o que favorece o crescimento tanto da parte radicular quanto da parte vegetativa.

Quadro 2. Análise descritiva dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP

Atributos ⁽¹⁾	Medidas estatísticas descritivas									Teste de Probabilidade ⁽²⁾	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficientes			Pr<w		DF
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria			
Atributos de Planta											
NF	5,611	6	3	8	1,106	19,7	0,044	-0,118	0,0081	IN	
Diam (cm)	6,342	6,5	2,1	13	2,632	41,5	-0,478	0,315	0,2076	NO	
ALT (m)	1,169	1,140	0,5	2,180	0,395	33,8	-0,105	0,497	0,2804	NO	
PERF	6,703	7	2	12	2,431	36,2	-0,494	0,220	0,1654	NO	
Atributos físicos do solo											
RP1 (MPa)	1,095	1,094	0,801	1,562	0,177	16,2	0,433	0,854	0,0096	IN	
RP2 (MPa)	2,007	2,027	1,460	3,071	0,364	18,2	2,052	1,138	0,0001	IN	
UG1 (kg kg ⁻¹)	0,206	0,200	0,142	0,271	0,028	13,8	-0368	0,103	0,5692	NO	
UG2 (kg kg ⁻¹)	0,222	0,222	0,154	0,279	0,026	11,5	0,134	-0,260	0,6342	NO	
UV1 (m ³ m ⁻³)	0,260	0,259	0,167	0,334	0,039	15,2	-0,290	-0,022	0,2668	NO	
UV2 (m ³ m ⁻³)	0,279	0,277	0,165	0,353	0,039	14,0	0,038	-0,118	0,1892	NO	
DS1 (kg dm ⁻³)	1,261	1,270	1,115	1,402	0,065	5,1	-0,291	-0,075	0,7308	NO	
DS2 (kg dm ⁻³)	1,254	1,262	1,055	1,400	0,083	6,6	-0,067	-0,493	0,2113	NO	
DP1 (kg dm ⁻³)	2,481	2,488	2,410	2,532	0,025	1,0	1,104	-0,961	0,0001	IN	
DP2 (kg dm ⁻³)	2,494	2,500	2,410	2,532	0,027	1,1	0,691	-0,575	0,0001	IN	
PT1 (m ³ m ⁻³)	0,490	0,487	0,432	0,548	0,028	5,8	-0,513	-0,0001	0,4427	NO	
PT2 (m ³ m ⁻³)	0,496	0,494	0,441	0,575	0,034	6,8	-0,357	0,384	0,1532	NO	
AREIA1 (g kg ⁻¹)	630,3	630,5	566	701	22,480	3,6	1,862	0,076	0,1867	NO	
AREIA2 (g kg ⁻¹)	604,7	604,0	529	691	31,273	5,2	0,778	-0,042	0,6093	NO	
ARGILA1 (g kg ⁻¹)	216,1	214,5	170	280	19,451	9,0	1,334	0,344	0,4645	NO	
ARGILA2 (g kg ⁻¹)	241,2	239,5	173	317	31,821	13,2	-0,052	0,018	0,4249	NO	
SILTE1 (g kg ⁻¹)	152,0	152,0	114	180	12,186	8,0	0,681	-0,469	0,5267	NO	
SILTE2 (g kg ⁻¹)	154,1	155,0	102	197	16,372	10,6	1,871	-0,121	0,0789	NO	

⁽¹⁾ NF, Diam, ALT, PERF, são respectivamente o número de folhas, diâmetro, altura e número de perfilhos; RP, UG, UV, DS, DP, PT, Areia, Argila e Silte, 1 e 2, são respectivamente resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total, areia, argila e silte, nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m; ⁽²⁾ DF: distribuição de frequência; NO e IN representam, respectivamente, normal e indeterminada.

Uma vez que a camada superficial do solo perde mais intensamente água pelo processo de evapotranspiração, os já esperados valores crescentes da umidade gravimétrica (UG) em profundidade ficaram em consonância com aqueles de Montanari et al. (2010). A magnitude da UG (0,206 e 0,222 kg kg⁻¹) atestou que os dados da RP foram colhidos num ponto ótimo de umidade do solo, uma vez que encontrava-se na sua máxima friabilidade (Quadro 2).

A porosidade total afeta a movimentação de água, ar, nutrientes e raízes no perfil do solo. Sendo assim, a média encontrada no presente estudo, de 0,49 m³ m⁻³ para ambas as profundidades ficando próximas das de Souza et al. (2004) que estudando um Latossolo Amarelo sob a cultura da pupunha observaram valores de porosidade total semelhantes ao da presente pesquisa (Quadro 2). Para Kiehl (1979) estes valores de porosidade total estão próximos a um solo agrícola ideal, que preconiza 0,50 m³ m⁻³ como sendo adequado para aumento da produtividade agrícola.

Já para os atributos granulométricos foram observadas as seguintes médias para areia (630 e 604 g kg⁻¹); silte (152 e 154 g kg⁻¹) e argila (216 e 241 g kg⁻¹) para as duas profundidades pesquisadas. Também foram verificadas para o atributo densidade da partícula médias de 2,48 kg dm⁻³.

A resistência mecânica à penetração de raízes apresentou em ambas as profundidades valores que segundo Arshad et al. (1991), são tidos como moderado com valores de 1,095 e 2,007 MPa para ambas profundidades (Quadro 2).

Oliveira et al. (2013) estudando a variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas com malhas de 70 x 70 m ou aproximadamente 0,49 ha, no qual o solo foi amostrado nos pontos de cruzamento da malha, com espaçamentos regulares de 10 em 10 m, perfazendo um total de 64 pontos amostrais em cada malha pois compararam o sistema agroflorestal, cana-de-açúcar e mandioca. Para os atributos físicos do solo, para o sistema agroflorestal que mais se assemelha a ao ambiente de produção de pupunha, tais como PT e DS que foram de 34% e 1,31 kg dm⁻³ discordando dos encontrados na presente pesquisa (49% e 1,26 kg dm⁻³, respectivamente). Já para areia, silte e argila Oliveira et al. (2013) observaram valores de 220, 549 e 230 g kg⁻¹, também sendo valores diferentes da presente pesquisa que foram de 630, 152 e 216 g kg⁻¹ para a profundidade de 0-0,10 m.

4.1.2 Atributos químicos do solo

Para os atributos K (51,2 %; 41,9 %), Ca (48,9 %; 45,6 %), Mg (62,3 %; 61,4 %), Al (94,3 %; 51,2 %), SB (52,9 %; 48,2 %), v% (42,6 %; 45,1 %) e m% (97,3 %; 55,5 %) em todas as profundidades e para P (36,0 %) na segunda camada e H+Al (35,7 %) na primeira camada apresentaram muito alta variabilidade. Os atributos P1 e H+Al2 apresentaram alta variabilidade. Já a CTC em ambas as profundidades, MO2; pH1 apresentaram média variabilidade. E, os demais atributos MO1 e pH2 apresentaram baixa variabilidade sendo de (9,8 % e 4,6 %, respectivamente) (Quadro 3).

Assim, para MO em todas as profundidades; pH1 e H+Al1 neste aspecto discordou daqueles obtidos por Montanari et al. (2013a) estudando Produção de matéria seca da braquiária de acordo com os atributos químicos de um Latossolo em Selvíria, Mato Grosso do Sul, num grid geoestatístico regular foi alocado, constituído de 11 transeções com 160 m de largura na direção dos eixos cartesianos. As transeções foram espaçadas de 20 m, com pontos de amostragem na forma de 20 m x 20 m, contendo 81 deles. Também, foram alocados dentro da grande malha mais 40 pontos, com espaçamentos menores que os mencionados, com o objetivo de refinamento da distância entre os pontos, para se apurar a obtenção do alcance da dependência espacial, com espaçamentos de 7,5; 5,0 e de 7,5 m entre eles. Portanto, no total foram amostrados 121 pontos, em uma área global de estudo de 25.600 m² encontraram valores de alta variabilidade para MO nas duas profundidades (MO1=20% e MO2=24%) e baixa variabilidade para pH1 (3%) e média variabilidade para H+Al1 (15,9%). Já para pH2 e H+Al2 corroboram com valores de coeficientes de variação encontrados pelo respectivo autor, sendo de 4% e 21%, respectivamente. Para os atributos K, Ca e Mg em ambas as profundidades corroboram com aqueles encontrados por Dalchiavon et al. (2011) que trabalhando em um Latossolo Vermelho distroférico, também encontraram muito alta variabilidade, variando entre 31,9 a 38,5 %.

A medida de tendência central que representará os atributos MO1, MO2, H+Al2, Al2 e m%2 deverá ser a média, em razão de eles terem apresentado distribuição de frequência do tipo normal, com coeficientes de assimetria positiva, entre 0,122 e 0,530. Já os coeficientes de curtose positiva ficaram entre 0,011 e 1,175, e da negativa, com valores entre -0,105 e -0,890. Contudo, e independentemente desses

Quadro 3. Análise descritiva dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP

Atributos ⁽¹⁾	Medidas estatísticas descritivas								Teste de probabilidade ⁽²⁾	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficientes				
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria		
									Pr<w	DF
Atributos do solo										
P1 (mg dm ⁻³)	6,296	6,000	4,0	12	1,839	29,2	0,578	0,829	0,0009	IN
P2 (mg dm ⁻³)	4,000	4,000	2,0	8,0	1,441	36,0	1,188	1,061	0,0001	IN
MO1 (g dm ⁻³)	18,648	19,00	15	23	1,824	9,8	0,011	0,218	0,1181	NO
MO2 (g dm ⁻³)	15,796	16,00	10	22	2,513	15,9	-0,237	0,136	0,4436	NO
pH1	4,824	4,600	4,0	6,1	0,573	11,9	-0,296	0,899	0,0001	IN
pH2	4,354	4,300	4,0	5,0	0,201	4,6	1,222	0,875	0,0065	IN
K1 (mmol _c dm ⁻³)	1,772	1,650	0,6	3,8	0,907	51,2	-0,748	0,581	0,0015	IN
K2 (mmol _c dm ⁻³)	0,991	1,000	0,4	1,8	0,415	41,9	-1,100	0,275	0,0050	IN
Ca1 (mmol _c dm ⁻³)	19,056	16,000	5,0	42	9,316	48,9	-0,114	0,870	0,0005	IN
Ca2 (mmol _c dm ⁻³)	11,333	10,500	3,0	23	5,169	45,6	-0,563	0,579	0,0089	IN
Mg1 (mmol _c dm ⁻³)	16,093	12,500	3,0	45	10,021	62,3	0,672	1,096	0,0002	IN
Mg2 (mmol _c dm ⁻³)	9,537	8,000	2,0	26	5,853	61,4	1,013	1,184	0,0001	IN
H+Al1 (mmol _c dm ⁻³)	40,074	43,500	16	72	14,297	35,7	-0,434	0,216	0,0256	IN
H+Al2 (mmol _c dm ⁻³)	50,389	50,000	25	84	11,801	23,4	1,175	0,530	0,1094	NO
Al1 (mmol _c dm ⁻³)	5,315	5,000	0	20	5,012	94,3	0,411	0,923	0,0001	IN
Al2 (mmol _c dm ⁻³)	11,000	10,500	0	24	5,637	51,2	-0,640	0,216	0,4373	NO
SB1 (mmol _c dm ⁻³)	37,013	29,600	8,8	88,9	19,596	52,9	0,212	0,978	0,0001	IN
SB2 (mmol _c dm ⁻³)	21,583	20,500	5,7	50	10,399	48,2	0,109	0,820	0,0001	IN
CTC1 (mmol _c dm ⁻³)	77,943	75,300	51,6	110,9	12,307	15,8	0,961	0,985	0,0007	IN
CTC2 (mmol _c dm ⁻³)	72,655	72,150	53,1	104,7	10,907	15,0	1,116	0,834	0,0322	IN
V1 (%)	47,500	41,000	11	88	20,255	42,6	-0,867	0,347	0,0456	IN
V2 (%)	30,296	28,000	6,0	60	13,650	45,1	-0,591	0,547	0,0165	IN
m1 (%)	15,426	14,000	0	56	15,009	97,3	0,551	0,987	0,0001	IN
m2 (%)	35,852	34	0	78	19,906	55,5	-0,890	0,122	0,3784	NO

⁽¹⁾ NF, Diam, Alt, Perf, são, respectivamente, o número de folhas, diâmetro, altura e perfilhos; P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, Al, SB, CTC, V% e m%, 1 e 2, são, respectivamente, o fósforo, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, potássio, magnésio, acidez potencial, alumínio, soma de bases, capacidade de troca de capacidade, saturação por bases, saturação por alumínio, nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m; ⁽²⁾ DF: distribuição de frequência; NO e IN representam, respectivamente, normal e indeterminado.

coeficientes, foram significativos a 5 % pelo teste de normalidade de Shapiro e Wilk, uma vez que essa probabilidade variou entre 0,1094 e 0,4373 (Quadro 3). As médias dos valores de P (P1 de 6,296 mg dm⁻³; P2 de 4,000 mg dm⁻³), dos valores do teor de matéria orgânica, MO (MO1 de 18,648 g dm⁻³ e MO2 de 15,796 g dm⁻³), dos valores de K (K1 de 1,7 mmol_c dm⁻³ e K2 de 0,9 mmol_c dm⁻³), dos valores de Ca (Ca1 de 19,05 mmol_c dm⁻³ e Ca2 de 11,33 mmol_c dm⁻³), dos valores de Mg (Mg1 de 16,05 mmol_c dm⁻³ e Mg2 de 9,5 mmol_c dm⁻³), são tidos como baixo, refletindo assim, numa baixa soma de bases com valores de SB (SB1 de 37 mmol_c dm⁻³ e SB2 de 22 mmol_c dm⁻³) e de saturação por bases, com valores de V% (V%1 de 48 mmol_c dm⁻³ e V%2 de 30 mmol_c dm⁻³), sendo considerado um solo distrófico (Novais et al., 2007). As médias dos valores de pH de 4,8 e 4,4 para as profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para a presente pesquisa são tidos como de muito baixo a baixo.

Os valores médios de P (P1 de 6,296 mg dm⁻³, P2 de 4,000 mg dm⁻³), MO (MO1 de 18,648 g dm⁻³ e MO2 de 15,796 g dm⁻³), pH (pH1 de 4,824 e pH2 de 4,354), K (K1 de 1,772 mmol_c dm⁻³ e K2 de 0,991 mmol_c dm⁻³), Ca (Ca1 de 19,056 mmol_c dm⁻³ e Ca2 de 11,333 mmol_c dm⁻³) e Mg (Mg1 de 16,093 e Mg2 de 9,537) sofreram uma diminuição em profundidade provavelmente devido ao efeito do preparo do solo lixiviação dos nutrientes.

4.2 Análise de regressão

4.2.1 Matriz de correlação e equação de regressão entre os componentes produtivos da cultura da pupunha e dos atributos físicos do solo

As correlações entre a planta e atributos do solo (Quadro 4) apresentaram significância entre os pares NF x ARGILA1 ($r = -0,281^*$), Diam x UG1 ($-0,332^*$), Diam x UG2 ($-0,275^*$), Diam x AREIA1 ($0,294^*$), Diam x ARGILA1 ($-0,419^{**}$) e Diam x SILTE1 ($0,324^*$), Alt x UG1 ($-0,433^{**}$), Alt x UG2 ($-0,331^*$), Alt x AREIA2 ($0,321^*$), Alt x ARGILA1 ($-0,430^{**}$) e Alt x ARGILA2 ($-0,333^*$) foram significativas, as quais variaram respectivamente de forma inversa e direta. A relação inversa (ou seja, quando aumenta o valor de um atributo, diminui o valor do outro atributo) dos pares apresentados mostrou que quando aumenta o Diam e a Alt, aumentará o número de folhas e quando aumenta a o teor de argila diminuirá o número de folhas. Provavelmente, a diminuição da altura e do diâmetro da pupunheira com o aumento do teor de argila e de umidade do solo, se dá pelo fato do elevado teor de umidade do solo, praticamente saturado com água, diminuindo, assim, a respiração radicular pela redução da macroporosidade do solo (ar do solo), atenuando a absorção de alguns nutrientes de transporte

Quadro 4. Matriz de correlação linear simples entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP.

Atributos ⁽¹⁾	Coeficiente de correlação (h)																
	NF	Diam	Alt	Perf	RP1	RP2	UG1	UG2	UV1	UV2	DS1	DS2	DP1	DP2	PT1	PT2	SILTE1
Diam	0,697**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alt	0,667**	0,927**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Perf	0,188	0,115	0,120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RP1	0,251	0,314*	0,320*	-0,098	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RP2	0,101	0,051	0,018	-0,020	0,558**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG1	-0,133	-0,332*	-0,433**	0,212	-0,353	-0,118	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UG2	-0,083	-0,275*	-0,331*	0,174	-0,404**	-0,143	0,544**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UV1	-0,135	-0,316*	-0,435**	0,162	-0,384**	-0,149	0,539**	0,187**	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UV2	-0,061	-0,222	-0,281	0,218	-0,317*	-0,118	0,765**	0,891**	0,783**	-	-	-	-	-	-	-	-
DS1	-0,057	-0,061	-0,143	-0,088	-0,225	-0,171	0,143	0,192	0,471**	0,299*	-	-	-	-	-	-	-
DS2	-0,022	0,001	-0,040	0,111	0,010	0,001	0,202	0,156	0,295*	0,577**	0,337*	-	-	-	-	-	-
DP1	-0,104	-0,057	0,036	-0,112	-0,076	-0,298	-0,348**	-0,180	-0,323*	-0,131	-0,014	0,008	-	-	-	-	-
DP2	-0,037	-0,065	-0,087	-0,099	-0,188	0,092	0,048	0,137	0,075	0,198	0,103	0,188	-0,078	-	-	-	-
PT1	0,001	-0,015	0,082	0,049	0,178	0,112	-0,177	-0,178	-0,489**	0,289*	-0,955**	-0,350**	0,204	-0,168	-	-	-
PT2	0,014	-0,006	0,037	-0,158	-0,024	0,006	-0,220	-0,158	-0,316*	-0,571**	-0,344*	-0,978**	0,003	-0,022	0,346*	-	-
ARI	0,058	0,112	0,196	-0,013	-0,009	-0,119	-0,390**	-0,259	-0,331*	-0,180	0,057	0,030	-0,030	-0,077	-	-	-
AR2	0,138	0,294*	0,321*	-0,066	0,107	-0,043	-0,599**	-0,640**	-0,564**	-0,584**	-0,098	-0,147	0,019	-0,126	0,099	0,137	0,509**
ARG1	-0,281*	-0,419**	-0,430**	0,081	0,128	-0,141	0,321**	0,429**	0,434**	0,355**	-0,083	0,046	-0,112	0,026	0,071	-0,054	-0,717**
ARG2	-0,128	-0,249	-0,333*	0,064	-0,251	-0,051	0,568**	0,598**	0,547**	0,134	0,168	0,099	-0,108	0,099	0,160	-0,161	-0,447**
SIL1	0,193	0,324*	0,220	-0,045	-0,009	0,001	0,150	0,098	0,191	0,101	0,181	0,035	-0,189	0,135	-0,221	0,005	-0,451**
SIL2	0,020	-0,086	0,030	0,007	0,281*	0,181	0,042	0,062	0,016	0,049	0,074	0,047	0,176	0,050	0,122	0,056	-0,103
																	-0,230
																	0,054
																	-0,288*
																	0,066
																	0,055

(1) NF, Diam, Alt, Perf, são respectivamente o número de folhas, diâmetro, altura e perfilho; RP, UG, UV, DS, DP, PT, AREIA, ARGILA e SILTE, 1 e 2, são respectivamente resistência à penetração, unidade gravimétrica, unidade volumétrica, densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total, areia, argila e silte, nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m; (2) ** e *: significativo a 1 e 5 %, respectivamente.

passivo na rizosfera, como por exemplo, o potássio que necessita de gasto de energia (respiração) para ser absorvido pela planta. Segundo a classificação convencional de Will (2002), que classifica a correlação da seguinte maneira: a) 0,1; pequena, b) 0,3; moderada, c) 0,5; grande, d); 0,7 muito grande, e) 0,9; quase perfeita e f) 1; perfeita. Assim, o atributo NF x ARGILA1, Diam x SILTE1, Diam x AREIA2, Diam x RP1, Diam x UG1, Diam x UG2, Alt x RP1, Alt x UG2, Alt x AREIA2 e Alt x ARGILA2 apresentaram moderada significância. Já para Diam x ARGILA1, Alt x UG1 e Alt x ARGILA1 teve grande significância. Para NF x Diam e NF x Alt obtiveram elevada significância. E para Diam x Alt, foi o que teve a melhor significância, sendo apresentada como quase perfeita.

No Quadro 4 estão apresentadas as correlações significativas com os componentes produtivos da cultura da pupunha. Pelo fato do elevado número de correlações, foi discutido no presente trabalho apenas as que o autor indicou serem as de maior relevância que foi a resistência à penetração na profundidade de 0,00-0,10 m *versus* Diam e Altura. Na Figura 4 foram apresentadas as equações de regressão entre os referidos atributos, dada pelo seguintes modelos: a) potencial direto de regressão e b) exponencial direto de regressão:

a) Diam = 5,358 x RP1^{0,9346}.....(r = 0,31*).....(16)

onde: **Diam** é o diametro da pupunha (cm) e **RP1** é a resistência à penetração estabelecida na camada entre 0,00-0,10 m.

b) Alt = 0,544e^{0,6456xRP1}.....(r = 0,33*).....(17)

onde: **Alt** é a altura da pupunha (m) e **RP1** é a resistência à penetração estabelecida na camada entre 0,00-0,10 m.

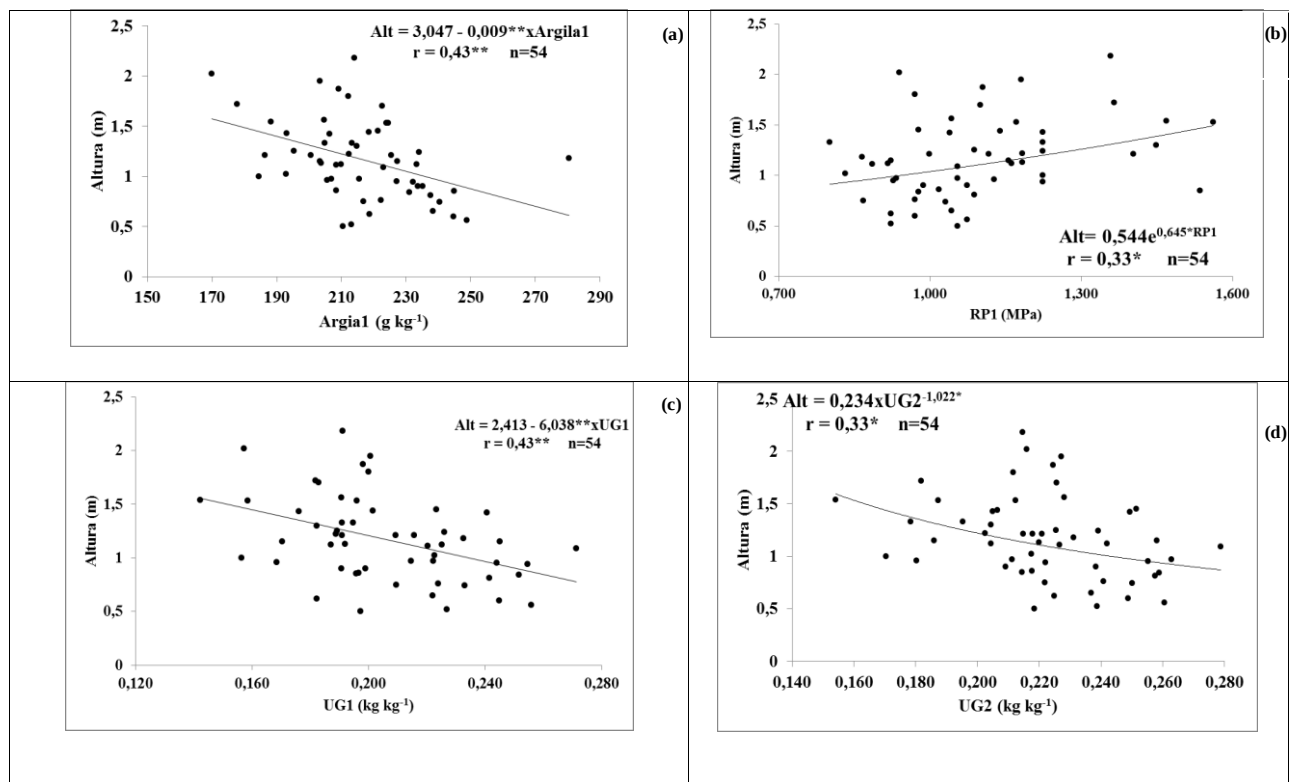


Figura 4. Equação de regressão entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP

(continua...)

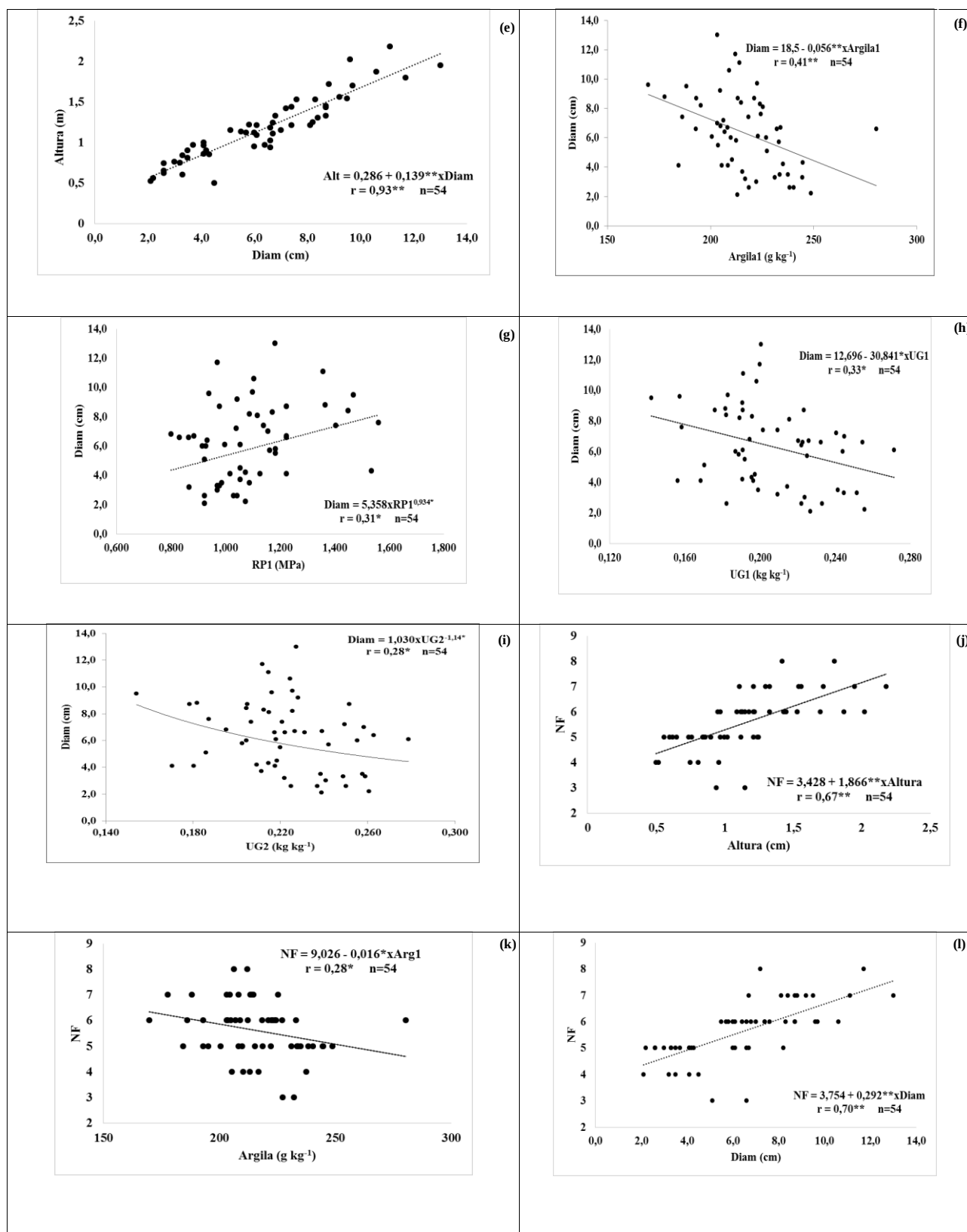


Figura 4. Equação de regressão entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP.

Para a Figura 4g, quando ocorrer o mínimo valor da RP1 (0,801 MPa) implicará num valor mínimo do diâmetro da pupunha (4,35 cm). Assim, para o máximo da RP1 (1,562 MPa) ocorrerá o valor máximo do diâmetro da pupunha (8,13 cm). Já para a Figura 1b, quando ocorrer o mínimo valor da RP1 (0,801 MPa) implicará num valor mínimo da altura da pupunha (0,91 m). Assim, para o máximo da RP1 (1,562 MPa) ocorrerá o valor máximo da altura da pupunha (1,49 m). Com isso, quando se tem uma maior resistência do solo à penetração, ocorrerá um aumento no diâmetro e consequentemente na altura, possivelmente pelo fato da cultura da pupunha se adaptar a uma grande diversidade de solos e ser bastante vigorosa, sendo utilizado em recuperação de áreas degradadas. Também pelo fato do elevado teor de umidade do solo, faltando agregação entre as partículas do solo com as raízes, indicando que se aumentar a RP aumenta Alt e Diam.

4.2.2 Matriz de correlação e equações de regressão entre os componentes produtivos da cultura da pupunha e dos atributos químicos do solo

A correlação entre os componentes produtivos da pupunha (NF, Diam, Alt e Perf) e os atributos químicos do solo (Quadro 5) apresentou significância exclusivamente para os pares: NF x K1 ($r = -0,300^*$), Diam x P1 ($r = 0,290^*$), Diam x K1 ($r = -0,360^{**}$), Diam x Al2 ($r = -0,294^*$), Diam x CTC2 ($r = -0,295^*$), Alt x P1 ($r = 0,280^*$), Alt x K1 ($r = -0,381^{**}$), Alt x Al2 ($r = -0,272^*$) e Alt x CTC2 ($r = -0,306^*$). Nas Figuras 1a, 1b, 1c e 1d foram apresentadas as equações de regressão principalmente para os atributos Diam, Alt, P1 e K1, dada pelos seguintes modelos de (Eqs. 18, 19, 20 e 21):

a) regressão linear direta:

$$\text{Diam} = 3,726 + 0,416\text{P1} \dots \dots \dots (18)$$

$$\text{Alt} = 0,790 + 0,060\text{P1} \dots \dots \dots (19)$$

b) regressão linear inversa:

$$\text{Diam} = 8,197 - 1,047\text{K1} \dots \dots \dots (20)$$

$$\text{Alt} = 1,464 - 0,166\text{K1} \dots \dots \dots (21)$$

em que Diam é o Diâmetro (cm), Alt (m) é a altura da pupunha e P1 e K1 (kg dm^{-3}) correspondem à Fósforo e Potássio respectivamente estabelecidas nas camadas entre 0,00-0,10 m. Suas correlações, ainda que baixas, foram altamente significativas. Assim, quando ocorrer o máximo valor da P1 (12 g dm^{-3}) implicará nos máximos estimados de Diam e Alt (8,718 cm e 1,513 m). Já para regressão linear inversa, quando ocorrer os máximos valores de

Quadro 5. Matriz de correlação linear simples entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP

Coeficiente de correlação (b)									
Atributos ^(a)	NF	Diam	Alt	Perf	Atributos ^(a)	NF	Diam	Alt	Perf
Diam	0,697**	-	-	-	-	-	-	-	-
Alt	0,667**	0,927**	-	-	-	-	-	-	-
Perf	0,188	0,115	0,120	-	-	-	-	-	-
P1	0,243	0,290*	0,280*	0,058	H+Al1	-0,101	-0,097	-0,041	0,039
P2	-0,095	-0,032	-0,032	0,123	H+Al2	-0,162	-0,261	-0,257	0,049
MO1	0,099	0,091	0,042	-0,203	Al1	-0,035	-0,053	-0,010	0,093
MO2	-0,015	0,016	0,023	-0,020	Al2	-0,112	-0,294*	-0,272*	0,025
pH1	0,140	0,141	0,081	-0,062	SB1	0,022	-0,067	-0,124	-0,073
pH2	0,096	0,200	0,165	-0,098	SB2	0,120	0,043	0,006	-0,094
K1	-0,300*	-0,360**	-0,381**	0,103	CTC1	0,037	-0,057	-0,119	-0,121
K2	-0,238	-0,243	-0,245	0,082	CTC2	-0,153	-0,295*	-0,306*	-0,081
Ca1	0,022	-0,037	-0,107	-0,101	V%1	0,126	0,093	0,010	-0,108
Ca2	0,139	0,131	0,069	-0,115	V%2	0,083	0,104	0,077	-0,124
Mg1	0,046	0,064	-0,111	-0,056	m%1	0,025	0,005	0,090	0,121
Mg2	0,027	-0,069	-0,065	-0,108	m%2	-0,038	-0,151	-0,129	0,134

⁽¹⁾ NF, Diam, Alt, Perf, são, respectivamente, o número de folhas, diâmetro, altura e Perfis; P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, Al, SB, CTC, V% e m% 1 e 2, são, respectivamente, o fósforo, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, potássio, cálcio, magnésio, acidez potencial, alumínio, soma de bases, capacidade de troca de capacidade, saturação por bases, saturação por alumínio em profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m; ⁽²⁾ ** e *: significativo a 1 e 5 %, respectivamente.

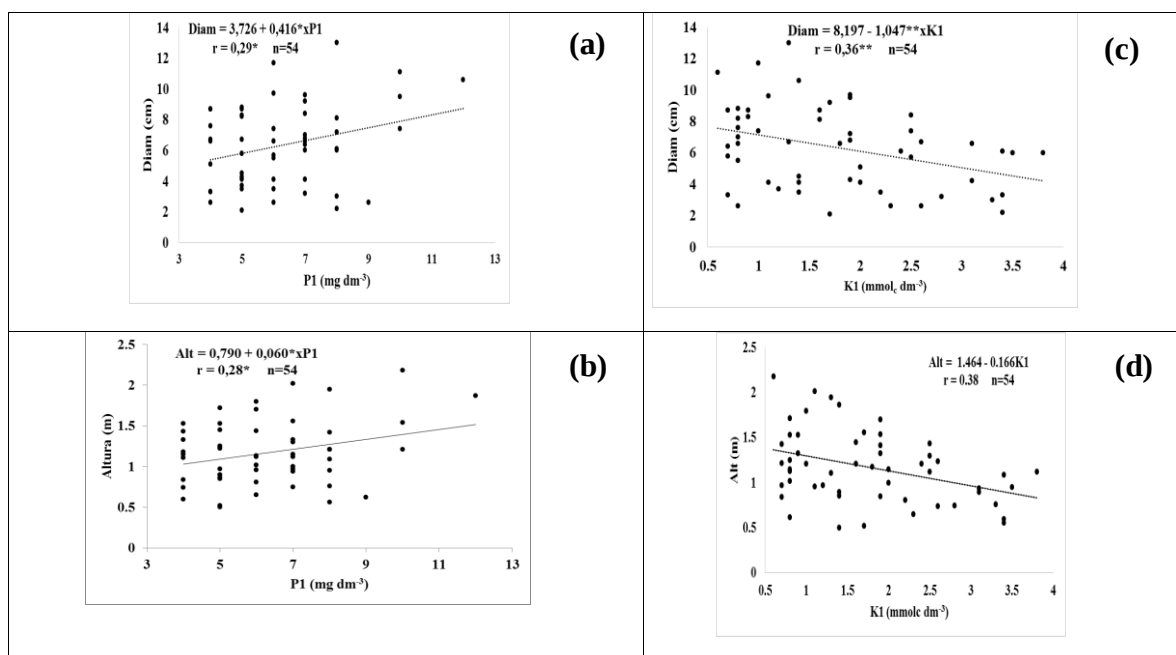


Figura 5. Equação de regressão entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP

K1 (3,8 mmol_c dm⁻³), implicará nos mínimos estimados de Diam e Alt (12,175 cm e 0,833 m) Figura 5).

4.3 Análise geoestatística

4.3.1 Análise dos componentes produtivos da pupunha e dos atributos físicos do solo

No Quadro 6, os atributos NF, DIAM, RP1, RP2, UG2, UV2, DS1, PT1 e SILTE1 apresentaram dependência espacial muito alta (ADE=83,3-96,9 %) e alta (RP2; ADE=78,8%), cujos modelos de semivariogramas foram do tipo exponencial, esférico e gaussiano.

Quadro 6. Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados entre os componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo em Registro, SP

Atributos ⁽¹⁾	Parâmetros										
	Modelo (²)	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ + C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ⁽³⁾	ADE ⁽⁴⁾		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
<i>γ(h) simples de atributos de planta</i>											
NF	exp. (51)	2,280x10 ⁻¹	1,367	13,3	0,972	3,430x10 ⁻³	83,3	MA	2,15	0,620	0,33
DIAM	esf. (51)	2,200x10 ⁻¹	7,126	8,43	0,894	2,96x10 ¹	96,9	MA	5,32	0,161	0,09
ALT	epp.	1,532x10 ⁻¹	1,532x10 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-
PERF	epp.	6,56	6,56	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>γ(h) simples dos atributos físicos do solo</i>											
RP1	esf. (51)	1,600x10 ⁻³	2,73x10 ⁻²	7,2	0,649	7,504x10 ⁻⁶	94,1	MA	1,10	-0,012	0,00
RP2	gaus. (50)	2,690x10 ⁻²	1,268x10 ⁻¹	6,3	0,555	2,545x10 ⁻⁴	78,8	AL	1,37	0,310	0,109
UG1	epp.	7,860x10 ⁻⁴	7,860x10 ⁻⁴	-	-	-	-	-	-	-	-
UG2	exp. (51)	5,600x10 ⁻⁵	5,710x10 ⁻⁴	10,95	0,768	4,110x10 ⁻⁹	90,2	MA	2,1x10 ¹	0,074	0,032
UV1	epp.	1,540x10 ⁻³	1,540x10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-	-
UV2	exp. (51)	1,940x10 ⁻⁴	1,568x10 ⁻³	9,6	0,805	1,620x10 ⁻⁸	87,6	MA	1,2x10 ¹	0,581	0,237
DS1	gaus. (51)	3,100x10 ⁻⁴	4,160x10 ⁻³	9,25	0,919	2,289x10 ⁻⁷	92,5	MA	1,2x10 ¹	0,908	0,962
DS2	epp.	7,210x10 ⁻³	7,210x10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-	-
DP1	epp.	5,800x10 ⁻⁴	5,800x10 ⁻⁴	-	-	-	-	-	-	-	-
DP2	epp.	6,630x10 ⁻⁴	6,630x10 ⁻⁴	-	-	-	-	-	-	-	-
PT1	esf. (51)	1,340x10 ⁻⁴	8,510x10 ⁻⁴	12,42	0,965	2,966x10 ⁻⁹	84,3	MA	1,0x10 ¹	0,795	0,474
PT2	epp.	1,156x10 ⁻³	1,156x10 ⁻³	-	-	-	-	-	-	-	-
AREIA1	epp.	5,243x10 ²	5,243x10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-
AREIA2	epp.	9,945x10 ²	9,945x10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-
ARGILA1	epp.	3,377x10 ²	3,377x10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-
ARGILA2	epp.	1,036x10 ³	1,036x10 ³	-	-	-	-	-	-	-	-
SILTE1	exp. (51)	1,450x10 ¹	1,459x10 ²	10,6	0,435	5,100x10 ²	90,1	MA	1,24x10 ²	0,179	0,077
SILTE2	epp.	2,356x10 ²	2,356x10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>γ(h) semivariograma cruzado entre planta x solo</i>											
NF=f(RP1)	gaus. (51)	1,000x10 ⁻²	5,870x10 ⁻²	9,94	0,619	6,394x10 ⁻⁴	99,8	MA	3,51	0,372	0,279

⁽¹⁾NF, Diam, ALT, PERF, são respectivamente o número de folhas, diâmetro, altura e perfilhos; RP, UG, UV, DS, DP, PT, AREIA, ARGILA e SILTE, 1 e 2, são respectivamente a resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total, areia, argila e silte nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m; parêntesis depois do modelo = número de pares no primeiro lag; ⁽²⁾esf: esférico, exp: exponencial, gaus: gaussiano, ⁽³⁾SQR: soma dos quadrados dos resíduos, ⁽⁴⁾ADE: avaliador da dependência espacial, e AL: alta dependência, e MA: muito alta dependência.

Já aqueles restantes (ALT, PERF, UG1, UV1, DS2, DP1, DP2, PT2, AREIA1, AREIA2, ARGILA1, ARGILA2 e SILTE2) apresentaram efeito pepita puro. No tocante ao desempenho dos semivariogramas, a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial (r^2) foi a seguinte: 1) NF (0,972); 2) PT1 (0,965); 3) DS1 (0,919); 4) DIAM (0,894); 5) UV2 (0,805); 6) UG2 (0,768); 7) RP1 (0,649); 8) RP2 (0,555) e 9) SILTE1 (0,435). Também, com relação ao avaliador da dependência espacial (ADE), a referida relação foi: 1) DIAM (96,9); 2) RP1 (94,1); 3) DS1 (92,5); 4) UG2 (90,2); 5) SILTE1 (90,1); 6) UV2 (87,6); 7) PT1 (84,3); 8) NF (83,3) e 9) RP2 (78,8).

No Quadro 6, a relação decrescente dos alcances da dependência espacial foi a seguinte: 1) NF (13,3 m), 2) PT1 (12,42 m), 3) UG2 (10,95 m), 4) SILTE (10,6 m) 5) UV1 (9,6 m), 6) DS (9,25 m), 7) Diam (8,3 m), 8) RP1 (7,2 m) e 9) RP2 (6,3 m). Portanto, exclusivamente com base na presente pesquisa, assim como, visando auxiliar a pesquisa futura, na qual os mesmos atributos estejam envolvidos, os valores dos alcances da dependência espacial a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, no geral, não deverão ser menores do que 6,3 m para os atributos do solo. Por outro lado, exclusivamente para o atributo da planta, não menores do que 8,43 m.

Em se tratando de análise geoestatística para Oliveira et al. (2013) para o alcance encontraram os seguintes valores: PT (12,42 m), DS (9,25 m), areia (68,31 m), silte (18,26 m) e argila (33,27 m). Já o presente trabalho os alcances foram os seguintes: PT (67,9 m), DS (45,5 m), areia (epp), silte (10,6 m) e argila (epp).

Os modelos dos atributos PT, DS, Areia, silte e argila de Oliveira et al. (2013) foram exponencial e esférico corroborando com os modelos obtidos no presente estudo que também foram exponencial e esférico com exceção areia e argila que não obtiveram dependência espacial sendo efeito peita puro.

Na comparação inicial do mapa de krigagem simples do componente produtivo (NF), cujos parâmetros dos semivariogramas encontram-se no Quadro 6, foi verificada elevada semelhança espacial direta entre a NF e a RP1. Dessa forma, na Figura 6 pôde-se constatar que nos sítios onde ocorreram as maiores e/ou menores RP1 houve o mesmo com a NF. Entretanto, para o restante dos atributos do solo, tal fato não ocorreu.

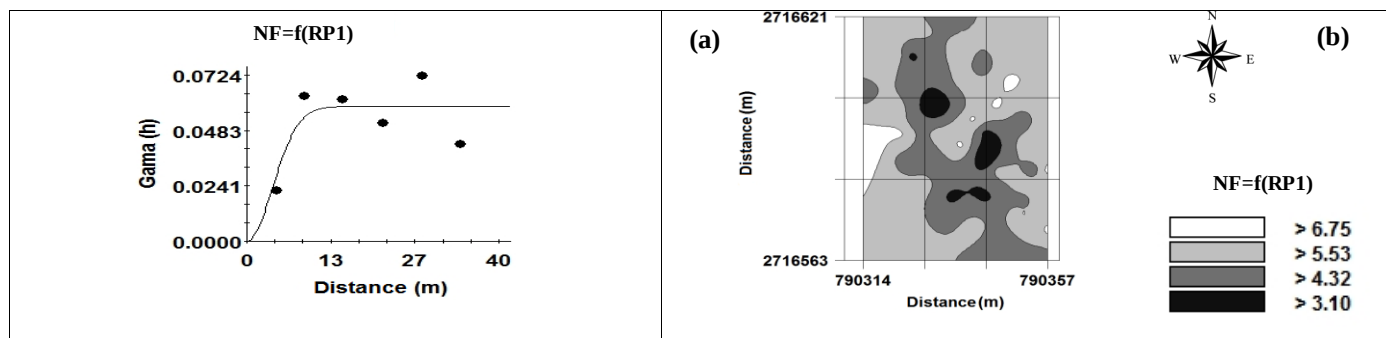


Figura 6. Semivariograma cruzado e mapa de co-krigagem para o número de folhas em função da resistência à penetração para a profundidade de 0,00-0,10 m num Cambissolo em Registro, SP

A co-krigagem existente entre NF x RP1 (Quadro 6, Fig. 6) pode sugerir que tais atributos resultaram-se como bons indicadores de planta e de qualidade física do solo, quando o objetivo for o de implantar a cultura da pupunha. Sendo assim, podem ser recomendadas específicas práticas conservacionistas do solo, dirigidas aos sítios onde a RP1 resultou seus maiores valores, visando-se elevar a respectiva produtividade da pupunheira. (Quadro 6, Fig. 6).

4.3.2 Análise dos componentes produtivos da pupunha e dos atributos químicos do solo

A análise geoestatística (Quadro 7) atestou que os atributos Alt, Perf, P1, P2, MO2, H+Al1, H+Al2, Al1, Al2, CTC1 e m1% apresentaram efeito pepita puro, não apresentando dependência espacial. Em todos os demais atributos que apresentaram dependência espacial, no tocante ao desempenho dos semivariogramas, a relação decrescente deles, analisada pela grandeza do coeficiente de determinação espacial (r^2), foi a seguinte: 1) NF (0,972); 2) K1 (0,938); 3) Diam (0,894); 4) K2 (0,829); 5) pH2 (0,822); 6) m%2 (0,761); 7) pH1 (0,860); 8) CTC2 (0,653); 9) V%1 (0,639); 10) V%2 (0,597); 11) MO1 (0,530); 12) Mg1 (0,483); 13) Mg2 (0,386); 14) Ca1 (0,279); 15) SB1 (0,267); 16) SB2 (0,230) e 17) Ca2 (0,219). Assim, em relação ao primeiro (NF), que teve elevado coeficiente de determinação espacial, observou-se o seguinte: o seu valor do r^2 (0,979) indicou ser o atributo de melhor ajuste semivariográfico. Para o alcance do pH1 do presente trabalho (11,4 m) foi um menor do que aquele encontrado por Montanari et al. (2013b), que foi de 16,5 m. Já para o ADE, a forte dependência verificada (ADE = 88,5 %) encontrado também concordaram com o referido autor.

No Quadro 7, observa-se a relação decrescente dos alcances da seguinte maneira: 1) Mg2 (28,2 m); 2) K2 (25,71 m); 3) Mg1 (23,0 m); 4) CTC2 (21,6 m); 5) v%1 (16,7 m); 6) pH2 (14,91 m); 7) v%2 (14,70 m); 8) Ca2 (14,40 m); 9) m%2 (14,10 m); 10) SB2 (13,8 m); 11) NF (13,3 m); 12) SB1 (13,2 m); 13) K1 (12,75 m); 14) Ca1 (12,45 m); 15) pH1 (11,40 m); 16) MO1 (9,09 m) e Diam (8,43 m). Portanto, nas condições da presente pesquisa, assim como, visando auxiliar pesquisas futuras, nas quais os mesmos atributos estejam envolvidos, os valores dos alcances a serem utilizados nos pacotes geoestatísticos, que alimentarão os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão, no geral, não deverão ser menores do que 8,43 m.

Quando realizado o semivariograma cruzado entre os atributos da planta, foram encontradas correlações espaciais negativas entre NF e CTC2 e NF e K1, em que se observou uma forte dependência espacial (ADE = 100,0 e 99,7 %, respectivamente); o modelo ajustado foram o Esférico e Exponencial (Quadro 7 e Figura 7).

Assim, como houve correlação linear significativa a 1 % entre ambos, houve satisfatório ajuste semivariográfico. Portanto, analisando-se a Figura 7, pode-se inferir que o teor de CTC2 apresentou-se como bom indicador da qualidade nutricional da pupunha, quando destinado a produção de número de folhas. Constatou-se, também, ajuste semivariográfico satisfatório entre a NF e a K1, pois houve correlação linear significativa a 1 %. Portanto, observando-se a Figura 7, pode-se inferir que o K mostrou-se também bom indicador da qualidade do solo, em relação à produção de número de folhas da pupunheira.

Quadro 7. Parâmetros de semivariogramas simples e cruzado dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo em Registro, SP

Parâmetros											
Atributos ^(a)	Modelo ^(b)	Efeito Pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ + C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação-cruzada		
							%	Class	a	B	r
<i>γ(h) simples de atributos de planta</i>											
NF	exp (51)	2,280x10 ⁻¹	1,367	13,30	0,972	3,430x10 ⁻³	83,3	MA	2,150	0,620	0,330
Diam	esf (51)	2,200x10 ⁻¹	7,126	8,43	0,894	2,960x10 ¹	96,9	MA	5,320	0,161	0,090
Alt	epp.	1,532x10 ⁻¹	1,532x10 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-
Perf	epp.	6,56	6,56	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>γ(h) simples dos atributos químicos do solo</i>											
P1	epp.	3,41	3,41	-	-	-	-	-	-	-	-
P2	epp.	2,061	2,061	-	-	-	-	-	-	-	-
MO1	exp. (51)	2,440x10 ⁻¹	2,964	9,09	0,530	0,213	91,8	MA	1,031x10 ¹	0,445	0,228
MO2	epp.	6,287	6,287	-	-	-	-	-	-	-	-
pH1	exp. (51)	3,660x10 ⁻²	3,172x10 ¹	11,40	0,760	1,469x10 ⁻³	88,5	MA	9,000x10 ⁻¹	0,818	0,413
pH2	exp. (51)	9,000x10 ⁻³	4,620x10 ⁻²	14,91	0,822	3,143x10 ⁻⁵	80,5	MA	2,470	0,430	0,189
K1	exp. (51)	6,700x10 ⁻²	7,600x10 ⁻¹	12,75	0,938	2,546x10 ⁻³	91,2	MA	1,400	0,200	0,105
K2	esf. (51)	6,520x10 ⁻²	1,934x10 ⁻¹	25,71	0,829	1,516x10 ⁻³	66,3	AL	4,000x10 ⁻²	0,956	0,628
Ca1	esf. (51)	8,700x10 ⁵	8,110x10 ⁴	12,45	0,279	1,260x10 ⁻⁴	89,3	MA	5,680	0,697	0,351
Ca2	exp. (51)	2,990x10 ⁴	2,551x10 ³	14,40	0,219	1,200x10 ⁴	88,3	MA	4,240	0,609	0,313
Mg1	esf. (51)	4,090x10 ¹	8,180x10 ¹	23,00	0,483	7,380x10 ²	50,0	ME	-0,430	1,035	0,457
Mg2	esf. (51)	1,539x10 ¹	3,079x10 ¹	28,20	0,386	2,270x10 ²	30,0	BA	2,510	0,731	0,095
H+Al1	epp.	2,000x10 ²	2,000x10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-
H+Al2	epp.	1,283x10 ²	1,283x10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-
Al1	epp.	2,506x10 ¹	2,506x10 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-
Al2	epp.	3,016x10 ¹	3,016x10 ¹	-	-	-	-	-	-	-	-
SB1	exp. (51)	5,200x10 ¹	3,96x10 ²	13,20	0,267	2,759x10 ¹	86,9	MA	1,388x10 ¹	0,625	0,330
SB2	exp. (51)	1,000x10 ¹	1,071x10 ²	13,80	0,230	3,399x10 ³	90,7	MA	1,043x10 ¹	0,516	0,179
CTC1	epp.	1,335x10 ²	1,335x10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-
CTC2	esf. (48)	4,940x10 ⁶	1,029x10 ⁷	21,60	0,653	7,440x10 ²	52,0	ME	2,450x10 ¹	0,660	0,319
V%1	exp. (51)	6,900x10 ¹	4,260x10 ²	16,70	0,639	1,080x10 ⁴	83,8	MA	1,175x10 ¹	0,758	0,367
V%2	exp. (49)	5,180x10 ¹	1,670x10 ²	14,70	0,597	1,016x10 ³	69,0	AL	1,718x10 ¹	0,423	0,170
m%1	epp.	2,289x10 ²	2,289x10 ²	-	-	-	-	-	-	-	-
m%2	exp. (44)	7,900x10 ¹	4,040x10 ²	14,10	0,761	3,113x10 ³	80,5	MA	1,864x10 ¹	0,486	0,207
<i>y(h) semivariograma cruzado entre planta x solo</i>											
NF=f(K1)	exp. (51)	1,000x10 ⁻³	3,220x10 ⁻¹	13,50	0,237	3,890x10 ⁻²	99,7	MA	3,510	0,372	0,279
NF=f(CTC2)	esf. (51)	1,000x10 ⁻³	-2,101	9,73	0,522	4,840x10 ⁻¹	100,0	MA	3,510	0,372	0,279

⁽¹⁾ NF, Diam, Alt, Perf, são, respectivamente, o número de folhas, diâmetro, altura e perfilhos; P, MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, Al, SB, CTC, V% e m%, 1 e 2, são, respectivamente, o fósforo, teor de matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, potássio, magnésio, acidez potencial, alumínio, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases, saturação por alumínio, nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m; parênteses após modelo: número de pares no primeiro lag; ⁽²⁾ esf: esférico, exp: exponencial, Gaus: gaussiano, (3) SQR: soma dos quadrados dos resíduos (4), ADE: avaliador da dependência espacial, e BA: baixa dependência, ME significa dependência, AL: alta dependência e MA: muito alta dependência.

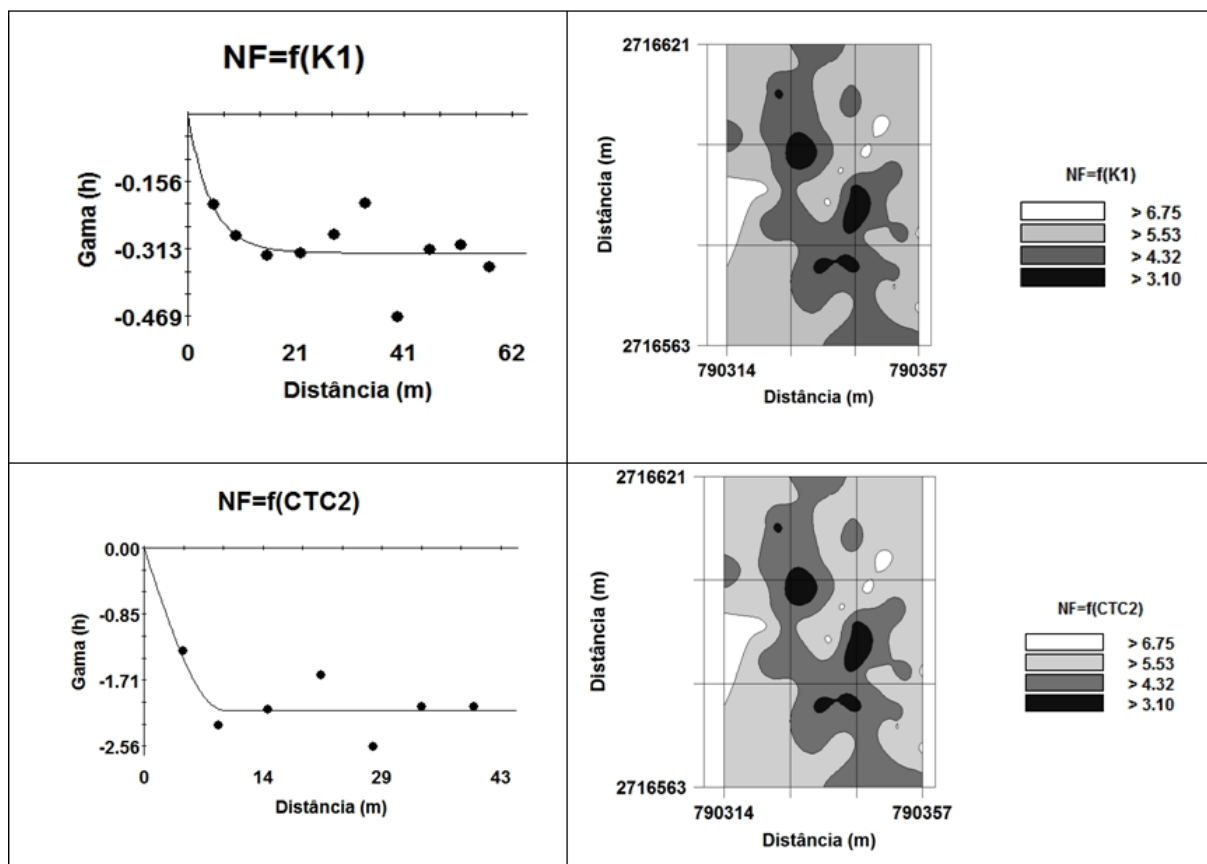


Figura 7. Semivariogramas cruzados e mapas de co-krigagem do número de folhas da pupunha em função do K de 0,00-0,10 e CTC de 0,10-0,20 num Cambissolo em Registro, SP

4.4 Análise multivariada dos atributos estudados

4.4.1 Análise dos componentes produtivos da cultura da pupunha e dos atributos físicos

Na análise de componentes principais, com as variáveis de maiores escores, os dois primeiros componentes principais explicam 68,3% da variabilidade total dos dados, de forma acumulada, conforme Quadro 8. O primeiro componente explicou 37,36 % da variabilidade total dos dados da área experimental. Este componente foi constituído pelos atributos diâmetro do caule da pupunha, resistência mecânica à penetração de raízes, umidade gravimétrica, densidade do solo e porosidade total para a profundidade de 0,00-0,10 m, onde o diâmetro do caule da pupunha, a resistência mecânica à penetração de raízes e a porosidade

total se correlacionou de maneira positiva, enquanto a umidade gravimétrica e a densidade do solo se correlacionaram negativamente. Esses atributos tiveram maior poder discriminatório, além de que a primeira componente expressa que Diam RP1 e PT, formam um contraste com DS e UG. O segundo componente principal explicou 30,92 % da variabilidade dos dados, sendo as variáveis com maior poder discriminatório foram diâmetro do caule da pupunha, densidade do solo, que também apresentaram correlações negativas, enquanto a porosidade total correlacionou-se positivamente. Mais uma vez, em analogia ao CP1, vê-se um contraste entre Diam e DS1 contra PT1.

Quadro 8. Resumo dos componentes principais (CP1 e CP2) da análise multivariada do caractere produtivo da pupunha (Diam) e de alguns atributos físicos (RP, UG, DS, PT e Argila) de um Cambissolo Eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m

Componentes Principais	CP1	CP2
Autovalor	2,242	1,856
VE (%)	37,361	30,927
Variável	Correlação	
Diam	0,497*	-0,530*
RP1	0,595*	-0,175
UG1	-0,663*	0,444
DS1	-0,722*	-0,659*
PT1	0,706*	0,672*
Argila1	-0,424	0,678

VE = Variância explicada. *correlações consideradas na interpretação do componente principal.

A representação gráfica biplot (entre CP1 e CP2) (Figuras 8 e 9) permitiu caracterizar as variáveis que mais discriminaram na formação dos agrupamentos 1 e 2. Os atributos argila (-0,42), umidade gravimétrica (-0,66) e densidade do solo (-0,72) permitiram discriminar o agrupamento 1, localizados à esquerda da CP1 (correlações negativas), enquanto o agrupamento 2, os atributos responsáveis pela discriminação foi a porosidade total (0,70), a resistência mecânica à penetração (0,59) e o diâmetro do caule da pupunha (0,49). Assim, o agrupamento 1 apresentou os maiores valores de umidade gravimétrica, umidade volumétrica e densidade do solo. Enquanto o agrupamento 2, caracterizou-se pelos maiores valores de porosidade total, resistência mecânica à penetração e diâmetro do caule da pupunha. A Figura 8 representa a variação espacial no terreno dos dois grupos. Assim, do total de 54 pontos

amostrados, 44% representam o agrupamento 1, enquanto, 56% representam o agrupamento 2. Observa-se também que a região sul do mapa (Figura 8) encontra-se uma maioria de pontos amostrados representando o agrupamento 2, agrupamento este que obteve menor diâmetro do caule da pupunha.

Silva et al. (2015) estudando a variabilidade de atributos físicos e químicos do solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação em um Latossolo vermelho distroférico numa rede geoestatística apresentando área de 2.025 m², constituída de nove transeções de 40 × 40 m, que foram espaçadas de 5,00 m, com pontos amostrais esquadrejados em 5 × 5 m, e com alguns pontos adensados de 1,67 m em alguns pontos de amostragem, visando detalhar o estudo da dependência espacial, totalizando 117 pontos amostrais. Também encontraram que a CP1 explicou 21% da variabilidade total dos dados da área experimental, sendo constituídos pelos atributos densidade do solo e porosidade total, corroborando com o primeiro componente estudado no presente estudo sendo constituído pelos mesmos atributos.

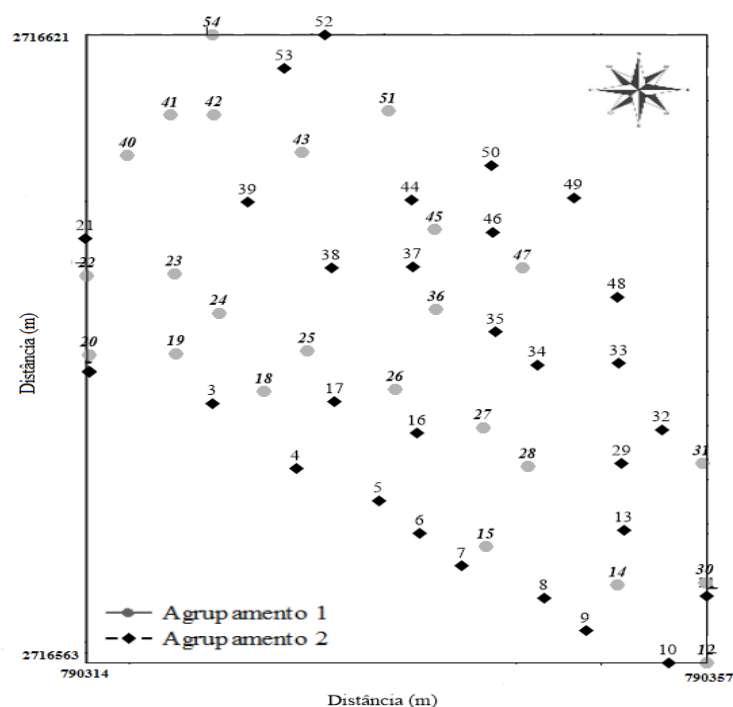


Figura 8. Distribuição espacial dos grupos gerados do diâmetro do caule da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m

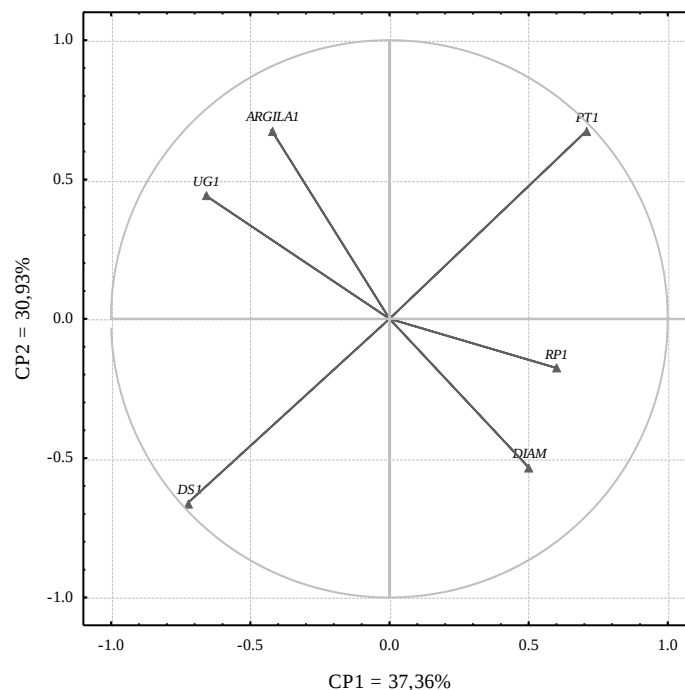


Figura 9. Dispersão (*gráfico biplot*) dos caracteres do componente produtivo da pupunha e de alguns atributos físicos de um Cambissolo eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.

O dendrograma obtido pela análise de agrupamentos hierárquica é apresentado na Figura 10, onde a variação expressiva nos valores de distância euclidiana entre os acessos, para o conjunto de variáveis consideradas, torna possível fazer uma divisão de grupos. A variação encontrada no presente trabalho foi de 16 para 20 e permitiu uma divisão exata dos acessos em dois grupos. Para a confirmação da ordenação obtida na análise de agrupamentos hierárquica, aplicou-se o método de agrupamentos não-hierárquico. Os resultados confirmaram a ordenação e, ainda, conforme análise de variância, todas as variáveis foram importantes para essa ordenação ($p < 0,01$) (Quadro 9). Freddi et al. (2008) estudando a análise multivariada na compactação de um latossolo vermelho cultivado com milho verificaram que a variação dos acessos foi inferior ao da presente pesquisa, sendo a variação de 6,5 para 12,5.

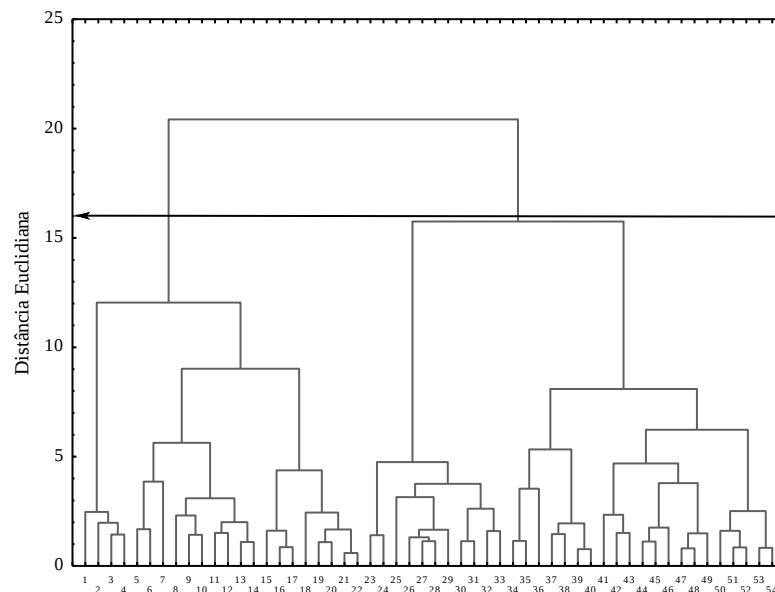


Figura 10. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo o diâmetro do caule da pupunha, a densidade do solo, a porosidade total, a umidade gravimétrica e a resistência mecânica à penetração.

Quadro 9. Médias do atributo de planta (Diam) e solo (RP, PT, UG e DS) dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos k-means

Grupos	Variáveis				
	Diam (cm)	RP (MPa)	PT (m ³ m ⁻³)	UG (kg kg ⁻¹)	DS (kg dm ⁻³)
1	7,2	1,200	0,500	0,200	1,200
2	5,7	1,000	0,500	0,200	1,300
Média geral	6,45	1,100	0,500	0,200	1,250
F	48,67*	44,45*	25,10 **	43,61**	26,39 **

**: diferença significativa a 0,01 % de probabilidade.

Essa divisão em grupos mostrou um resultado muito importante que foi a ordenação dos acessos segundo o diâmetro do caule da pupunha. Onde, no agrupamento 1 ficaram os acessos que possuíam os maiores valores do diâmetro do caule da pupunha (diam) e no agrupamento 2 os menores valores do diâmetro do caule da pupunha, segundo os atributos físicos do solo (RP, UG, DS, PT e Argila) para a profundidade de 0,00-0,10 m (Figuras 11 e 16).

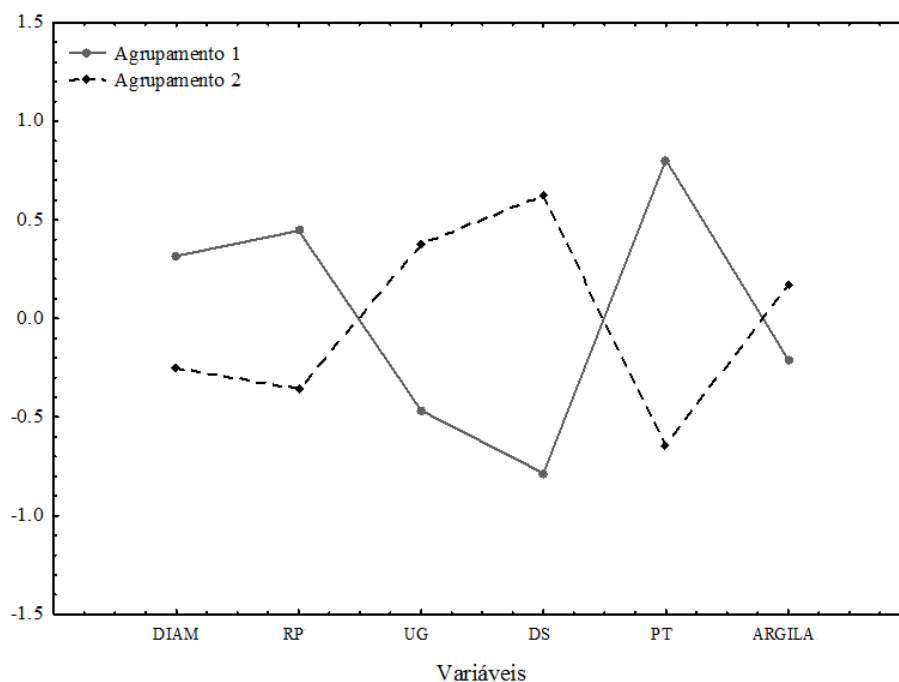


Figura 11. Médias padronizadas do diâmetro do caule da pupunha (diam) e alguns atributos físicos do solo (DS, PT, UG, RP e Argila) para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica k-means

Em relação às médias dos atributos físicos (Quadro 9), verificou-se que o solo apresentou nos agrupamentos 1 e 2 valores de densidade do solo de respectivamente de $1,200 \text{ kg dm}^{-3}$ e $1,300 \text{ kg dm}^{-3}$, valores estes abaixo do nível crítico para solos argilosos (ARSHAD et al., 1996), que afirma que o nível crítico situa-se em torno de $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$, que poderiam dificultar o desenvolvimento radicular. Nos agrupamentos 1 e 2 a porosidade total encontrada foi a ideal, onde o solo ideal para a produção agrícola deve apresentar porosidade total próxima a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (KIEHL, 1979).

A Figura 11 apresenta as médias padronizadas do diâmetro da pupunha e dos atributos físicos do solo para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica k-means. Observou-se que, na condição de uma elevada resistência à penetração, ocorreram os menores valores de umidade gravimétrica e densidade do solo e os maiores valores de porosidade total em relação às outras condições. Dados estes que corroboram com Schaffrath et al. (2008) e também com Freddi et al. (2008) que ambos trabalhando com um Latossolo Vermelho, encontraram uma correlação negativa para a densidade do solo. De Maria et al. (1999), também encontraram uma correlação positiva entre a densidade do solo e a umidade do solo trabalhando em um Latossolo Vermelho. Já para as condições de maiores densidades do solo

(Agrupamento 2), observa-se um comportamento oposto, onde houve uma diminuição da porosidade total e um aumento da umidade gravimétrica em relação à outra condição.

4.4.1 Análise dos componentes produtivos da cultura da pupunha e dos atributos químicos

De todos os atributos estudados, sendo eles, número de folhas (NF), diâmetro (Diam), altura (Alt), perfilhos (perf), fósforo (P), matéria orgânica (MO), potencial hidrogeniônico (pH), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H+Al) e Alumínio (Al), a análise multivariada permitiu que apenas o diâmetro, perfilho, matéria orgânica, potássio, magnésio, alumínio, capacidade de troca catiônica e saturação por alumínio se destacassem como componentes principais.

Na análise de componentes principais com as variáveis de maiores escores, foram extraídos dois componentes principais que, de forma acumulada, explicam 56,62 % da variabilidade total dos dados, conforme Quadro 10. O primeiro componente explicou 39,54 % da variabilidade total dos dados da área experimental. Este componente foi constituído pelos atributos potássio, magnésio, alumínio, capacidade de troca catiônica e saturação por alumínio para a profundidade de 0,00-0,10 m, onde o potássio, magnésio e a capacidade de troca catiônica se correlacionaram de maneira negativa, enquanto alumínio e a saturação por alumínio se correlacionaram positivamente.

Quadro 10. Resumo dos componentes principais (CP1 e CP2) da análise multivariada dos caracteres produtivos da pupunha (Diam e Perf) e de alguns atributos Químicos (MO, K, Mg, Al, CTC e m) de um Cambissolo Eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m

Componentes Principais	CP1	CP2
Autovalor	3,163	1,366
VE (%)	39,54	17,08
Variável	Correlação	
Diam	0,119	-0,261
Perf	0,153	0,454
MO	-0,329	-0,777*
K	-0,582*	0,337
Mg	-0,931*	-0,008
Al	0,792*	-0,330
CTC	-0,671*	-0,476
m	0,855*	-0,193

VE = Variância explicada. *correlações consideradas na interpretação do componente principal.

O segundo componente principal explicou 17,08 % da variabilidade dos dados, sendo constituída apenas pelo atributo matéria orgânica que apresentou correlação negativa.

A representação gráfica biplot (entre CP1 e CP2) (Figuras 12 e 14) permitiu caracterizar as variáveis que mais discriminaram na formação dos agrupamentos 1 e 2. Os atributos potássio (-0,58), magnésio (-0,93), capacidade de troca catiônica (-0,67) e matéria orgânica (-0,33) permitiram discriminar o agrupamento 1, localizados à esquerda da CP1 (correlações negativas), enquanto o agrupamento 2, os atributos responsáveis pela discriminação foram o perfilho (0,15), a saturação por alumínio (0,85), o alumínio (0,79) e o diâmetro do caule da pupunha (0,12). Assim, o agrupamento 1 apresentou os maiores valores de matéria orgânica, potássio, magnésio e capacidade de troca catiônica. Enquanto, o agrupamento 2, caracterizou-se pelos maiores valores de diâmetro do caule da pupunha, perfilho, alumínio e a saturação por alumínio. A Figura 12 representa a variação espacial no terreno dos dois grupos. Assim, do total de 54 pontos amostrados, 59,26% representam o agrupamento 1, enquanto, 40,74% representam o agrupamento 2. Observa-se também que a

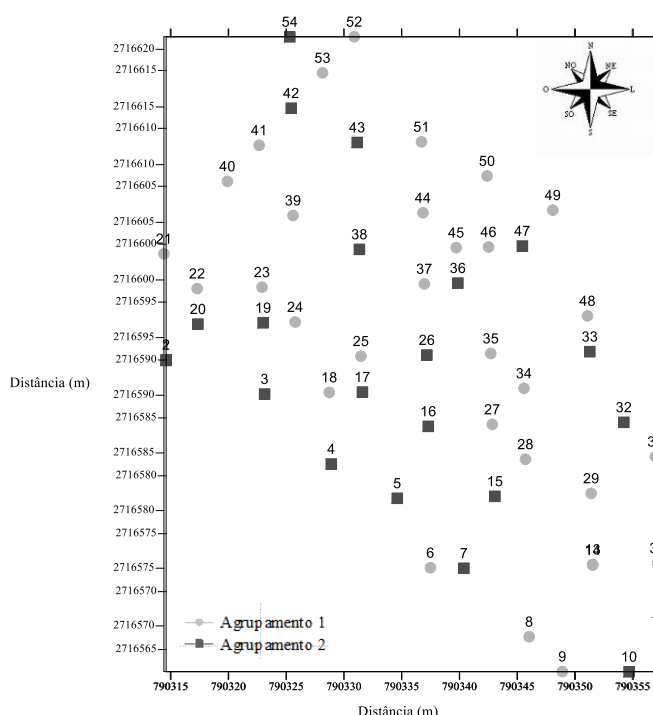


Figura 12. Distribuição espacial dos grupos gerados do diâmetro do caule e Perfilhos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m

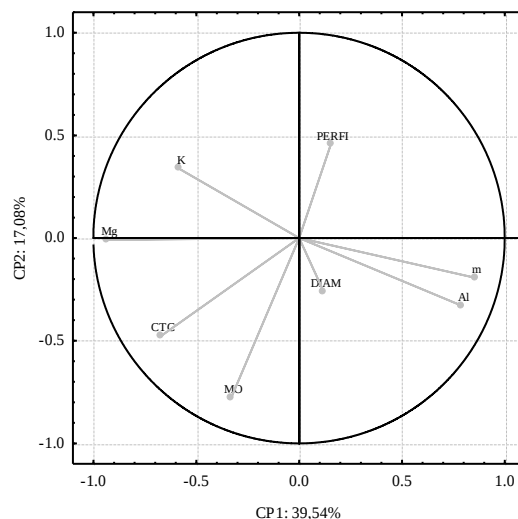


Figura 13. Dispersão (*gráfico biplot*) dos caracteres dos componentes produtivos da pupunha e de alguns atributos químicos de um Cambissolo Eutrófico para a profundidade de 0,00-0,10 m.

região sudeste do mapa (Figura 12) encontra-se uma maioria de pontos amostrados representando o agrupamento 2, agrupamento este que obteve o maior diâmetro do caule da pupunha. Enquanto o agrupamento 1, a maioria dos pontos amostrados se encontram ao norte da Figura 1, onde se obteve o menor diâmetro do caule da pupunha. O dendrograma obtido pela análise de agrupamentos hierárquica realizado com os oito componentes principais é apresentado na Figura 14, onde a variação expressiva nos valores de distância euclidiana entre os acessos, para o conjunto de variáveis consideradas, torna possível fazer uma divisão de dois grupos de parcelas homogêneas. Silva et al. (2010) estudando a variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo cultivado com café também encontraram a formação de dois grupos de parcelas homogêneas, quando estudados somente os componentes principais.

A variação encontrada no presente trabalho foi de 18 para 56 e permitiu uma divisão exata dos acessos em dois grupos (Quadro 11).

Quadro 11. Médias dos atributos de planta (Diam e Perf) e solo (MO, K, Mg, Al, CTC e m%) dos grupos formados pela análise não-hierárquica de agrupamentos k-means

Grupos	Variáveis							
	Diam (cm)	Perf	MO (g dm ⁻³)	K (mmolc dm ⁻³)	Mg (mmolc dm ⁻³)	Al (mmolc dm ⁻³)	CTC (mmolc dm ⁻³)	m (%)
1	6,1	6,8	18,2	1,5	9,5	8,3	72,6	24,7
2	6,6	6,6	19,4	2,1	25,7	1,0	85,7	1,9
Média geral	6,35	6,7	18,8	1,8	17,6	4,65	79,15	13,3
F	52,49	52,97	47,28*	47,45*	19,01**	26,06**	38,33**	22,89**

**: diferença significativa a 0,01 % de probabilidade.

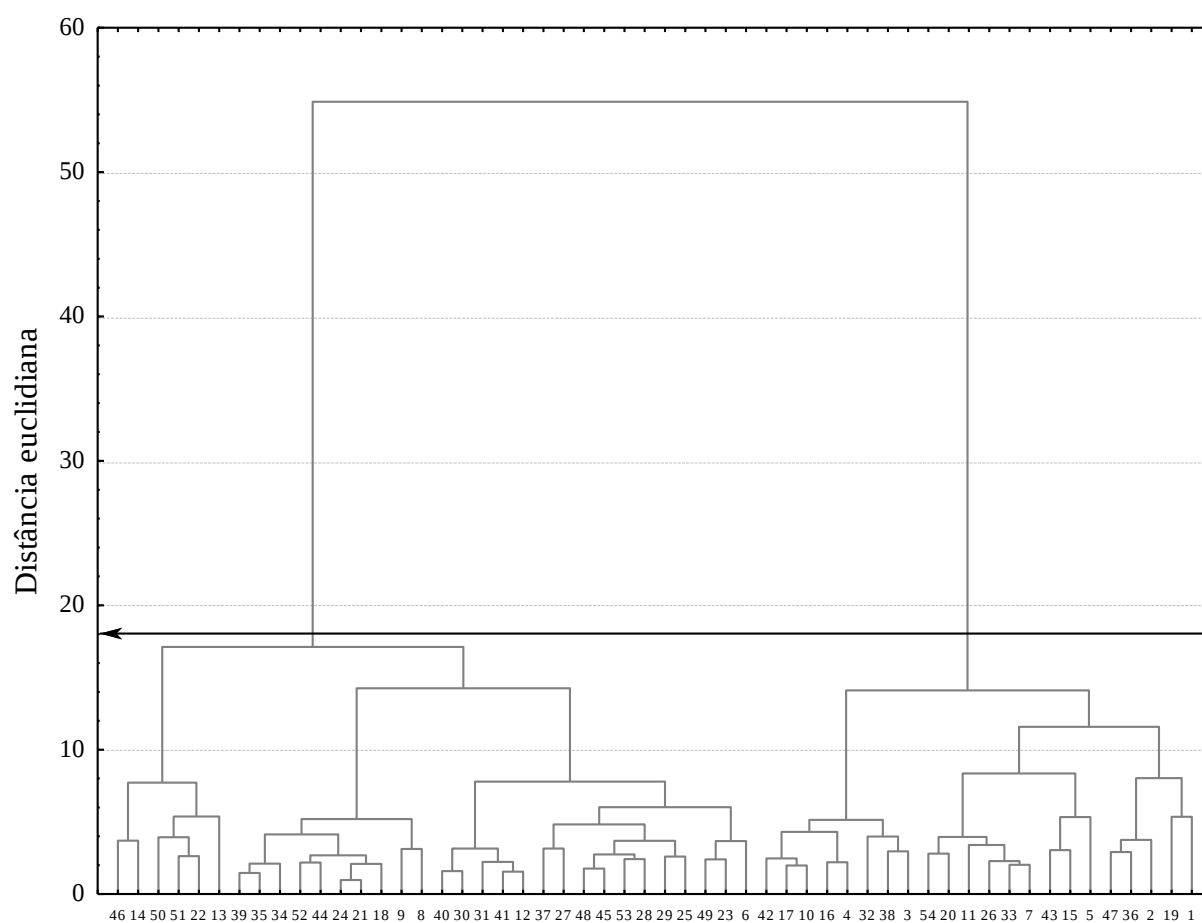


Figura 14. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo o diâmetro do caule e Perfilhos da pupunha, a matéria orgânica, o potássio, o magnésio, o Alumínio, a Capacidade de troca catiônica e a saturação por alumínio

A variação encontrada no presente trabalho foi de 18 para 56 e permitiu uma divisão exata dos acessos em dois grupos. Para a confirmação da ordenação obtida na análise de agrupamentos hierárquica, aplicou-se o método de agrupamentos não-hierárquico.

Os resultados confirmaram a ordenação e, ainda, conforme análise de variância, todas as variáveis foram importantes para essa ordenação ($p < 0,01$) (Quadro 11).

Essa divisão em grupos mostrou um resultado muito importante que foi a ordenação dos acessos segundo o diâmetro do caule da pupunha e o número de perfilhos. Onde, no agrupamento 1 e 2 não houve diferença significativa nos valores de diâmetro do caule da pupunha e o número de perfilhos. Porém, para os atributos químicos matéria orgânica, potássio, magnésio e capacidade de troca catiônica obtiveram os maiores valores no agrupamento 2 e os menores valores no agrupamento 1 (Figuras 15 e 17).

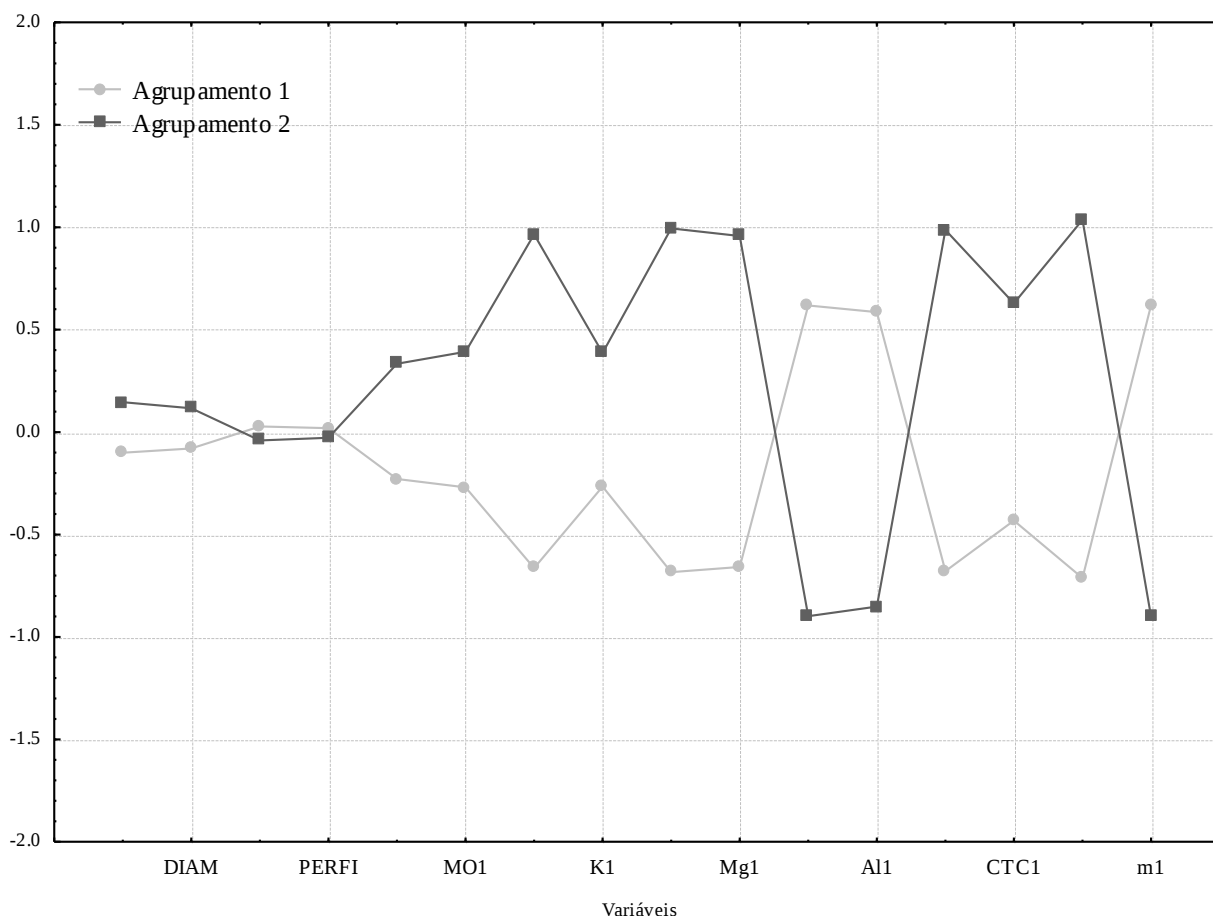


Figura 15. Médias padronizadas do diâmetro do caule e do Perfilhos da pupunha (diam e Perf) e alguns atributos químicos do solo (MO, K, Mg, Al, CTC e m) para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica k-means

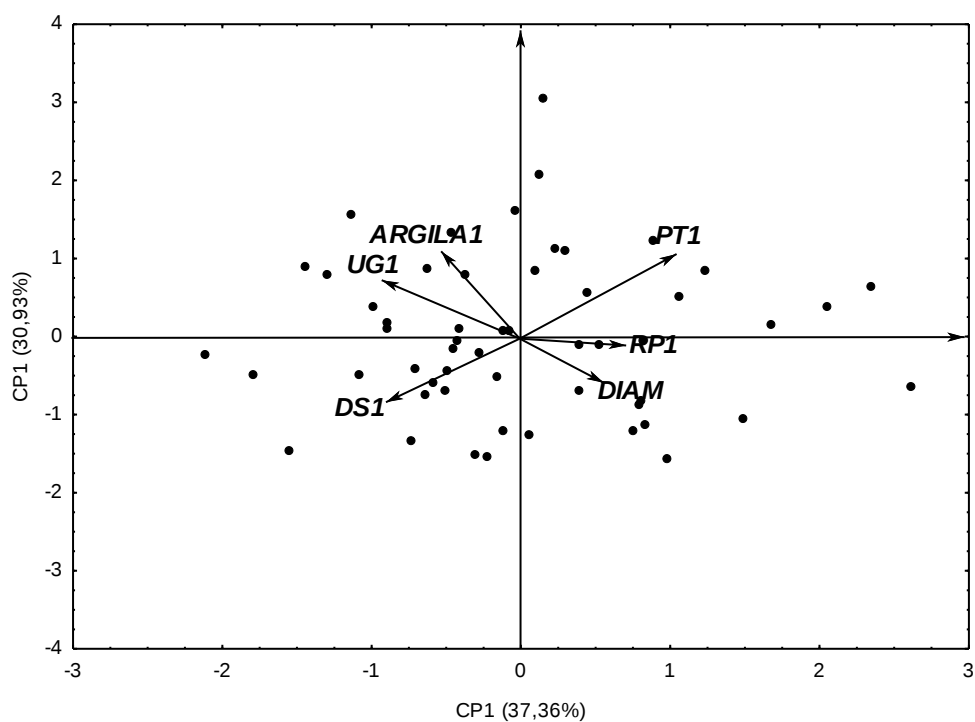


Figura 16. Biplot para os componentes da cultura da pupunha e dos atributos físicos do solo

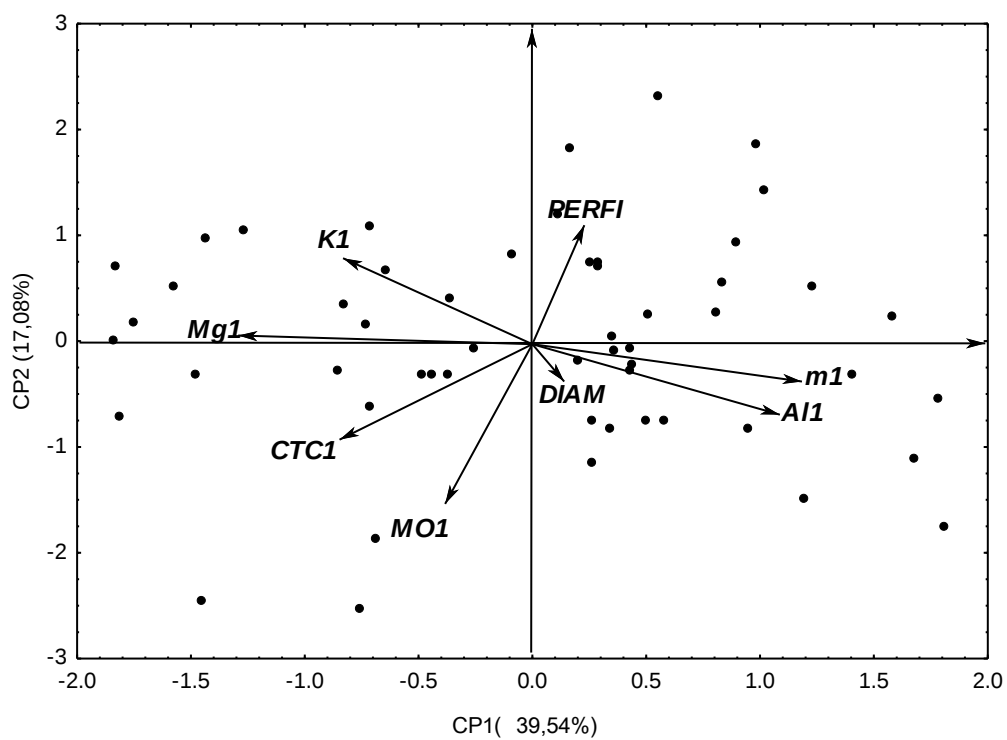


Figura 17. Biplot para os componentes da cultura da pupunha e dos atributos químicos do solo

Já para o alumínio e a saturação por alumínio, foi o inverso, encontrou-se maiores valores no agrupamento 1 e menores valores no agrupamento 2 para a profundidade de 0,00-0,10 m (Figura 15).

Em relação às médias dos atributos químicos (Quadro 11), verificou-se que o solo apresentou nos agrupamentos 1 e 2 valores de teor de matéria orgânica de respectivamente de 18,2 g dm⁻³ e 19,4 g dm⁻³, valores considerados baixos para solos da região do cerrado (LOPES; COX 1977). Para o potássio, os valores médios apresentados para cada agrupamento foram obtidos como muito baixa, sendo o ideal acima de 3,0 mmolc dm⁻³. Já para o magnésio os valores obtidos para ambos os agrupamentos foram muitos altos, acima de 4,0 mmolc d⁻³ (RAIJ et al., 1991).

A Figura 15 apresenta as médias padronizadas do diâmetro da pupunha, número de perfilhos e dos atributos químicos do solo para cada grupo, segundo análise de agrupamentos não-hierárquica k-means. Observou-se que, na condição de uma elevada quantidade de matéria orgânica houve-se uma diminuição no teor de potássio.

5 CONCLUSÕES

Valores médios de densidade do solo e resistência à penetração estavam nos respectivos alcances de 1,254-1,261 kg dm⁻³ e 1,095-2,007 MPa, promoveu uma diminuição substancial dos componentes produtivos da pupunheira.

Quanto ao ponto de vista linear, diâmetro do caule e altura da pupunha foi explicada pelo modelo potencial direto e exponencial, que foi altamente significativo, devido à resistência mecânica à penetração.

Espacialmente falando, número de folhas pode ser estimada através de co-krigagem direta com a resistência mecânica à penetração. Assim, valores superiores a 1,00 MPa para este atributo do solo indicaram regiões com maior rendimento.

Os alcances obtidos demonstraram menor variabilidade da área experimental, em razão provavelmente do menor impacto das práticas agrícolas.

A análise de componentes principais indica que os atributos que melhor explicam a variabilidade do diâmetro do caule da pupunha são os físicos do solo, como densidade do solo, porosidade total, umidade gravimétrica e resistência mecânica à penetração;

A classificação multivariada da qualidade física do solo pode contribuir para melhorar o planejamento e controle da produtividade da pupunha, bem como a execução das atividades de manejo do solo.

Os teores médios de matéria orgânica, fósforo cálcio e magnésio, nas respectivas profundidades foram considerados ideais para o desenvolvimento da pupunha.

Do ponto de vista linear, os componentes vegetativos da pupunha foram explicados por modelos exponenciais e esféricos altamente significativo, dado em função do potássio e da CTC.

Os componentes vegetativos da pupunha podem ser estimados por meio da co-krigagem direta com o potássio. Assim, valores inferiores a $0,991 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ desse atributo do solo indicaram sítios com redução na quantidade do número de folhas.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA JR, J. Aplicações da análise multivariada em solos que podem ser utilizados em melhorias de processos produtivos agrícolas. In: VII Simpósio da Engenharia de Produção da Região Nordeste, 2012, Mossoró. Anais... Mossoró: SEPRONe, 2012.

AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J.; JÚNIOR, G. G.; PONTELLI, C. B.; ESPÍNDOLA, M. C. G. & PEDRUZZI, C. Qualidade de solos derivados de areias quartzosas da fronteira sudoeste do RS: indicadores químicos. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2, Santa Maria, 1998. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998. p. 275-278.

ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; BASSO, F. C.; PARIZ, C. M.; AZENHA, M. V.; VERCESE, F. Produtividade da soja correlacionada com a porosidade e a densidade de um Latossolo Vermelho do cerrado brasileiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 3, p. 520-526, 2010.

ARKCOLL, D. B.; AGUIAR, J. P. L. Peach palm (*Bactris gasipaes* H.B.K.), a new source of vegetable oil from the wet tropics {Pupunha, uma nova fonte de óleo vegetal dos trópicos úmidos. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Chichester, v. 35, n. 5, p. 520-526, 1984.

ARMESTO, M. V. **Variabilidade espacial e temporal da erosión en solos de cultivo**. 1999. 118 f. Tese (Doutoral) - Faculdade de Ciências, Universidade Da Coruña, La Coruña, 1999.

ARSHAD, M. A.; LOWER, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141. (Special Publication, 49).

ARAÚJO, A. O. et. al. Modificações nas propriedades do solo de uma área de manejo florestal na chapada do Araripe. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa v. 37, p. 754-762, 2013.

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.

BATISTA, I. F. **Variabilidade espacial da umidade do solo em irrigação por gotejamento sob cultivo protegido**. 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

BAVER, L. D. **Física de suelos**. México: Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, 1973. 529 p.

BECKETT, P. H. T.; WEBSTER, R. **Soil variability: a review**. **Soils and Fertilizers**, England, v. 34, n. 1, p. 1-15, 1971.

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

BERTOLANI, F. C.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 987-995, 2001.

BIASSUSI, M. **Estudo da deformação de um vertissolo através da tomografia computadorizada de dupla energia simultânea**. 1996. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1996.

BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1994. 2 v.

BISSANI, C. A.; MEURER, E. J.; BOHNEN, H. Solos ácidos e solos afetados por sais. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Genesis, 2004. Cap. 6, p. 1-290.

BOVI, M. L. A.; JÚNIOR, G. G.; COSTA, E. A. D.; BERTON, R. S.; SPIERING, S. H.; VEGA, F. V. A.; CEMBRANELLI, M. A. R. ; MALDONADO, C. A. B. Lodo de esgoto e produção de palmito em pupunheira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 1, p. 153-166, 2007.

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

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 31, n. 3, p. 315-331, 1980.

BUSSAB, W.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 4. ed. São Paulo: Atual, 1987.

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

CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; GUERRA, J. G. M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistema tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 27-40.

CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; SANTOS, L. A. C.; MANTOVANELLI, B. C. Distribuição espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo em uma área de agrofloresta na região de Humaitá, AM. **Comunicata Scientiae** (Online), v. 5, n. 4, p. 509-517, 2014.

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

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de uma associação de solos sob videira (*Vitis vinifera* – L) de Vitória do Brasil (SP). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E COPNSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 13., 2000, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: [s.n.], 2000. 1 CD-ROM.

CÁSSARO, F. A. M. **Tomografia de dupla energia simultânea para caracterização física de um meio poroso deformável**. 1994. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física e Química, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M. & BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 997-1003, 1999.

CHAIMSOHN F. P. **Cultivo de pupunha e produção do palmito**. Viçosa: Aprenda Fácil. 2000. 121 p.

CLEMENT, C. R. The potential use of the pejibaye palm in agroforestry systems {Usos potenciais da pupunha em sistemas agroflorestais}. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 7, p. 201-212.

CLEMENT, C. R. Domesticated palms. **Principes**, Austin, v. 36, n. 2 p. 70-78, 1989.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e da cultura. In: CURI, N. et al. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p. 249-290.

COLLARES, G. L. **Compactação em Latossolos e Argissolos e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 106 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

CONCEIÇÃO, P. C. **Indicadores de qualidade do solo visando a avaliação de sistemas de manejo do solo**. 2002. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

CORRÊA J. C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho-Amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p. 203-209, 2002.

CORREA, A. R.; MONTANARI, R.; LAURA, V. A.; MELOTTO, A. M.; SILVA, E. N. S.; PELLIN, D. M. P.; SANTOS, A. S. Aspects of the silvopastoral system correlated with properties of a typic quartzipsamment (entisol) in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 438-447, 2015.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n.4, p. 908-916, 2011.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P. Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. **Semina Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 541-552, 2012.

DANIEL, L. A.; CARVALHO, J. F.; JUNQUEIRA, G. S. Avaliação de camadas de solo compactado: Efeito de diferentes sistemas de preparo e cultivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 1994.

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

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 703-709, 1999.

DI BELLO, R. C. **Análise do comportamento da umidade do solo no modelo chuva-vazão SMAP II – versão com suavização hiperbólica**: estudo de caso: Região de Barreiras na Bacia do rio Grande – BA. 2005. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSAJ, 1994. p. 3-22. (Publication Number, 35).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

EPSTEIN, E.; BLOON, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.

FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Influence of pH on growth and nutrient uptake by crop species in an Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 29, n. 17, p. 2675-2682, 1998.

FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1419-1424, 2001a.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. **Influência do pH na produtividade do feijoeiro no sistema plantio direto em solo do cerrado**. Disponível em: <www.cnpfa.embrapa.br/conafe/pdf/conafe2000.pdf>. Acesso em: 29 set. 2008.

FERNANDES, F. M.; MELLO PRADO, R.; ISEPON, O. J. Residual effect of lime, nitrogen and zinc on dry matter production of *Brachiaria decumbens* in field conditions. **Zootecnia Tropical**, Caracas, v. 26, n. 2, p. 125-131, 2008.

FERREIRA, M. M. **Física do solo**. Lavras: Ed. Universitária de Lavras, [200?].

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.

FREDDI, O. S.; FERRAUDO, A. S.; CENTURION, J. F. Análise multivariada na compactação de um latossolo vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 953-961, 2008.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SCAPIM, C. A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.9-19, 2007.

FORSYTE, W. **Física del suelos**: manual de laboratorio. Costa Rica: Iica, 1985. 212 p.

FORSYTE, W.; LEGARDA, L. Critérios de água y espacio aéreo del suelo para producción máxima del frijol 27-R. In. PROGRAMA COOPERATIVO CENTROAMERICANO PARA EL MEJORAMIENTO DE CULTIVOS ALIMENTICIOS, 19, 1973, San José. **Memoria...** Guatemala: IICA, 1973.

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, v. 28, p. 477-484, 2004.

GERARD, C. J.; MEHTH, H. C.; HINOJOSA, F. Root growth in a clay soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 114, p. 37-49, 1972.

GUIMARÃES, E. C.; AQUINO, L. H.; OLIVEIRA, M. S. A variabilidade espacial do pH e da argila dispersa em água em um Latossolo roxo no município de Lavras, MG. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 12-17, 1992.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. 2000. 89 f. Tese (Doutorado em Água e Solo) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 703-707, 2001.

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

HAIR, J. F. J. et al. **Análise multivariada de dados**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAKKANSON, I.; VOORHEES, W.; B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 239-282, 1988.

HAMLETT, J. M.; HORTON, R.; CRESSIE, N. A. C. Resistance and exploraty techniques for use in semivariogram analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 868-75, 1986.

HAIR JUNIOR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.

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

HODGSON, A. S.; MACLEOD, D. A. Use of oxygen flux density to estimate critical air-filled porosity of a Vertisol. **Soil Science American Journal**, Madison, v. 53, p. 355-361, 1989.

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

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

JIANG, P.; THELEN, K. D. Effect of soil and topographic properties on crop yield in a north-central corn-soybean cropping system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 252–258, 2004.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor-analysis. *Psychometrika*, v. 23, n. 3, p. 187-200, 1958.

KLAR, A. E. O sistema solo-água. In: _____. **A água no sistema solo-planta atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1984. p. 57-81.

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

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

KNIGHTON, R. E.; JAMES, D. W. Soil test phosphorus as a regionalized variable in leveled land. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 3, p. 675-679, 1985.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; BERTON, A. L. **Compactação e descompactação de solos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 20 p. (Embrapa Trigo. Documentos, 19).

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 37-51, 1994. (Special Publication Number, 35).

LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 1-12, 1996.

LOPES, A.S. & COX, F.R. A survey of the fertility status of surface soils under “cerrado” vegetation in Brazil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 41, n. 4, p. 742-747, 1977.

LOPES, A. S. **Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo**. Piracicaba: Potafós, 1983. 162 p.

MACEDO, A. **Construção e uso de um tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em ciências do solo e do ambiente**. 1997. 129 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

MARTÍN, N. F.; BOLLERO, G.; BULLOCK D. G. Associations between field characteristics and soybean plant performance using canonical correlation analysis. **Plant and Soil**, v. 273, p. 39-55, 2005.

MARTINS FILHO, M. V.; LICCIOTI, T. T.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR J., SANCHEZ, R. B. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 8-18, 2009.

MATHERON, G. **Traite de geostatistique appliquee**. Technip: Memories Du Bureau De Recherches Geologiques Et Minières, 1962. Tome 1 and 2.

McBRIDE, M. B.; BLASIAK, J. J. Zinc and copper solubility as a function of pH in an acid soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 866-870, 1979.

McBRATNEY, A.; FIELD, D.J. The dimensions of soil security. **Geoderma**. Amsterdam, v. 213, p. 203-213, 2014.

MELSTED, S. W.; PECK, T. R. The principles of soil testing. In: WALSH, L. M. BEATON, J. D. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Society of America, 1973. Cap. 2, p. 13-21.

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

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 197-202, 1999.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Gênese, 2000. 174 p.

MEURER, E. J.; RHEINHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômeno de sorção em solos. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p. 117-162.

MINGOTI, S. A. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. 1ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MONTANARI, R. et al. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 1, p. 69-77, 2005.

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

MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; DLACHIAVON, F. C.; LOVERA, L. H.; HONORATO, M. A. O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 1811-1822, 2010.

MONTANARI, R.; SOUZA, G. S. A.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; SIQUEIRA, G. M. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 13, p. 542-552, 2012.

MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. ; DALCHIAVON, F. C. Produção de matéria seca da braquiária de acordo com os atributos químicos de um Latossolo em Selvíria, Mato Grosso do Sul. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, p. 519-527, 2013a.

MONTANARI, R.; RODRIGUES, G. G. CARVALHO, M. P.; DALCHIAVON, F. C.; MACHADO, F. C.; GONZALEZ, A. P. Atributos químicos de um Latossolo espacialmente relacionados com a produtividade e componentes de produção do feijão em Selvíria (MS). **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 12, p. 271-281, 2013b.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. IV – Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo: relação solo-planta**. Viçosa: UFV, 2007. Cap. 4, p. 133-204.

OADES, J. M.; GILLMAN, G. P.; UEHARA, G.; HUE, N. V.; van NOORDWIJK, M.; ROBERTSON, G. P.; WADA, K. Interactions of soil organic matter and variable-charge clays. In: COLEMAN, D. C. et al. **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Hawaii: University of Hawaii, 1989. p. 69-95.

O'HALLORAN, I. P.; KACHANOSKI, R. G.; STEWART, J. W. B. Spatial variability of soil phosphorus as influenced by soil texture and management. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 65, p. 475-487.

OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1103-1112, 2013.

PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; NACHTIGALL, G. R. Produtividade do arroz irrigado em sistema de cultivo contínuo e em rotação com soja e milho. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 18, 1989, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1989. p.150-160.

PÉREZ GOMAR, E.; REICHERT, J. M.; REINERT, D.J.; GARCIA, F. Atributos do solo e biomassa radicular após quatro anos de semeadura direta de forrageiras de estação fria em campo natural dessecado com herbicidas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 211-23, 2002.

PETTER, R. L. **Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo**. 1990. 144 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.

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

PORTA, J.; LÓPEZ-ACEVEDO, M. E ROQUERO, C. **Edafología para la agricultura y el medio ambiente**. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2003. 929 p.

RAIJ, B. van. **Mecanismos de interação entre solos e nutrientes**. In: RAIJ, B. van. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba, Instituto da Potassa e Fósforo. pp.17-31, 1981.

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

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

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 12, p. 211-6, 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2012. 524 p.

REICHARDT, K. O solo como um reservatório de água. In:_____. **A água em sistemas agrícolas**. Piracicaba: Manole, 1990. p. 27-69.

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.

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

ROBINSON, G. W. **Los suelos: su origen, constitución y clasificación**. Barcelona: Omega, 1960. 515 p.

ROSA FILHO, G. **Produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto**. 2008. 89 f. Dissertação. (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

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, v. 33, n. 2, p. 283-293, 2009.

RUSSO, D.; BRESLER, E. Soil hydraulic properties as stochastic processes: I Na analysis of field spacial variability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p.6 87, 1981.

SANTOS, H. L.; VASCONCELOS, C. A. Determinação do número de amostras de solo para análise química em diferentes condições de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n. 2, p. 97-100, 1987.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 407-414, 2005.

SECRETARIA, M. I.; MARAVILLA, J. N. Response of hybrid coconut palms to application of manures and fertilizers from field-planting to full-bearing stage. **Plantations, Recherche, Développement**, Montpellier, v. 4, p. 126-138, 1997.

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

SCHAFFRATH, V.R.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1369-1377, 2008.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, p. 1775-1784, 1994.

SILVA, J. R.; NOGUEIRA JUNIOR, S. Cereais de inverno: entraves e possibilidade no Estado de São Paulo. **Informativo Econômico**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p. 51-57, 2001.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVA, A. M.; SILVA, E. L. Retenção de água no solo. In:_____. **Conceitos básicos para a irrigação**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1984. p. 20-23.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 253-260, 2001.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. VI - Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo: matéria orgânica**. Viçosa: UFV, 2007. Cap. 6, p. 275-356.

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

SILVA, E. N. S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variability of physical and chemical soil properties and production common bean in a minimum tillage system with irrigation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 598-607, 2015.

SNEATH, P. H. & SOKAL, R. R. Numerical taxonomy: The principles and practice of numerical classification. San Francisco, W. H. Freeman, 1973. 573p.

SOUZA, Z. M.; LEITE, J. A. ; BEUTLER, A. N. Comportamento de atributos físicos de um Latossolo Amarelo sob agroecossistemas do Amazonas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, p. 654-662, 2004.

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: Ed. UFV, 2007. Cap. 5, p. 205-274.

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**, Viçosa, v. 15, p. 229-235, 1991.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58 p. (Circular Técnica, 23).

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 45-94, 1985.

TAYLOR, D.; ARKIN, G. F. Root zone modification fundamentals and alternatives. In:_____. **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph: ASAE, 1981. p. 3-16.

TOPP, G. C. The application of time-domain reflectometry (TDR) to soil water content measurement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASUREMENT OF SOIL

AND PLANT WATER STATUS, 1987, [S.l.]. **Proceedings of the...** [S.l.: s.n.], 1987. p. 85-92.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 3, p. 333-339, 1996.

VICINI, L. Análise Multivariada da teoria à prática. Dissertação de Mestrado. Santa Maria: UFSM, CCNE. 215p. 2005.

VEZZANI, F. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

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, p. 1040-1048, 1981.

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. 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, C. et al. Efeitos das datas de plantio sobre o feijão cultivado no outono-inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 6, p. 863-873, 1991.

VIEIRA, S. R.; GUEDES FILHO, O.; CHIBA, M. K.; MELLIS, E. V. DECHEN, S. C. F.; DE MARIA, I. C. Variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade da soja em dois anos de cultivo em um latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1503-1514, 2010.

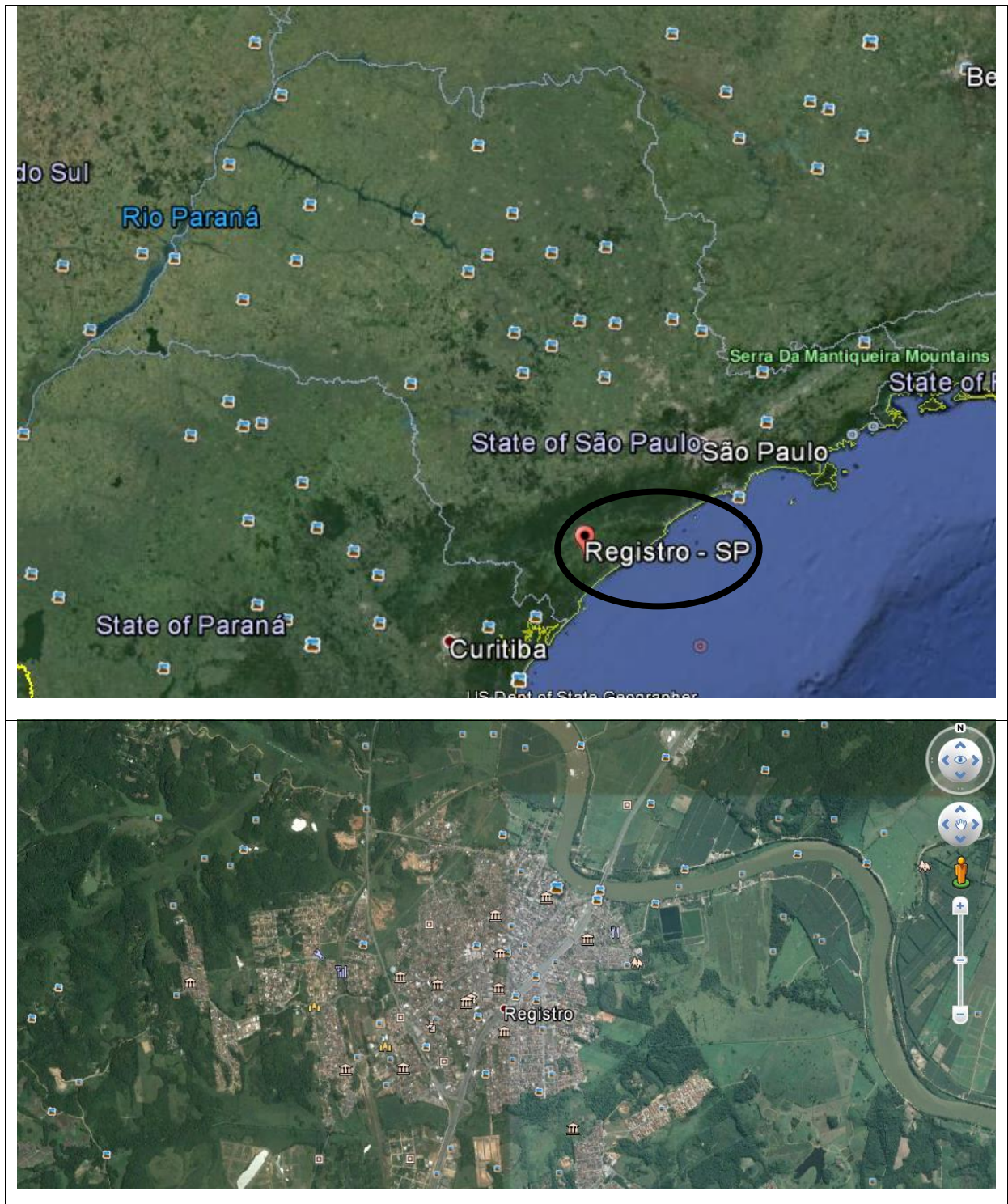
WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Statistical methods in soil and land resourcer survey**. Oxford: Oxford Univesity Press, 1990. 319 p.

WESSELING, J.; VAN WIJK, W. R. Soil physical conditions in relation to drain depth. In: LUTHIN, J. N. (Ed.). **Dranaige of agricultural lands**. Madison: American Society of Agronomy, 1957. p. 461-472. (Agronomic Series, 7).

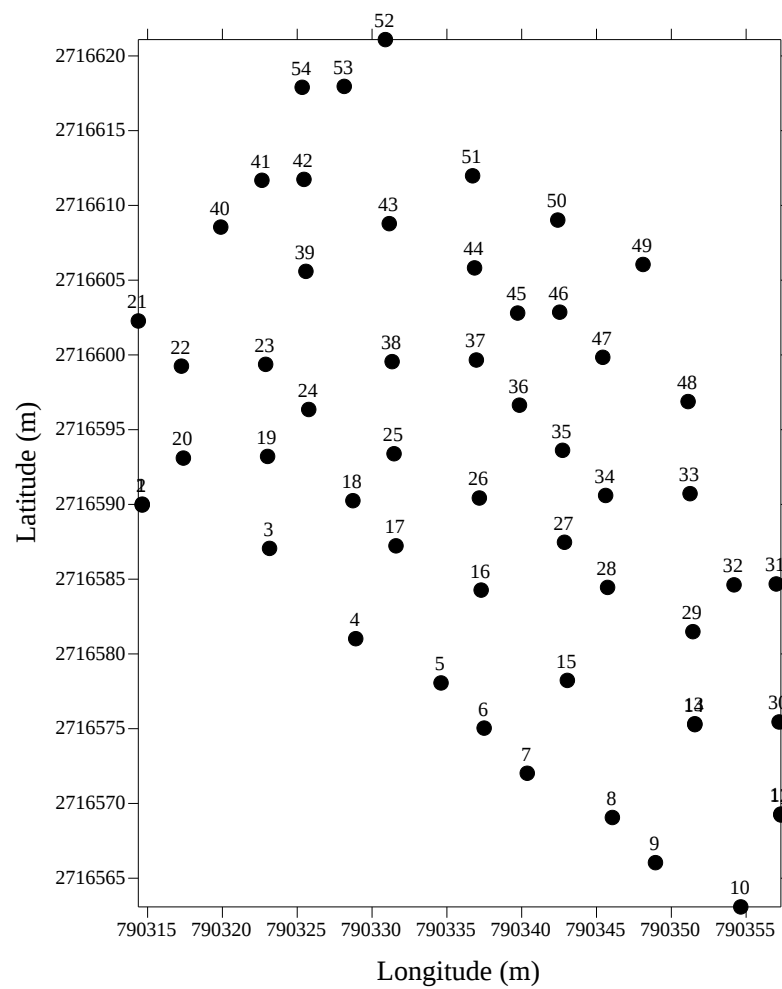
WILL G. H. Baseado (parcialmente) em: Correlação: Statistical methods for psychology, 3rd Edition, 2002.

WUTKE, E. B.; ARRUDA, F. B.; FANCELLI, A. L.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M.; AMBROSANO, G. M. B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 621-633, 2000.

ANEXOS



Anexo 1. Localização da área experimental.



Anexo 2. Grid de amostragem.