

MATHEUS DUARTE DE BRITO

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO COMO FERRAMENTA À
SILVICULTURA DE PRECISÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

B862c
2014 Brito, Matheus Duarte de, 1988-
Condutividade elétrica aparente do solo como
ferramenta à silvicultura de precisão / Matheus Duarte de
Brito. - Viçosa, MG, 2014.
ix, 89f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.
Orientador : Daniel Marçal de Queiroz.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Solos florestais.
3. Eucalipto. 4. Florestas - Administração. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

MATHEUS DUARTE DE BRITO

**CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO COMO FERRAMENTA À
SILVICULTURA DE PRECISÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 14 de Julho de 2014.

Vicente Paulo Soares

Fernando Palha Leite

Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Coorientador)

Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

Aos meus pais Otílio e Maria Auxiliadora,
à minha irmã Tatiana, aos meus sobrinhos
Francisco, Estela e Tomás e à Mariana,
manifestações do amor puro em minha
vida.

DEDICO

*“Nascer, morrer, renascer ainda e progredir
sempre, tal é a lei.”*

(Allan Kardec)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pelo acolhimento;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa;

À Celulose Nipo-Brasileira (CENIBRA), pelo apoio técnico;

Ao professor Daniel Marçal de Queiroz, pela confiança, amizade, incentivo, e por ser exemplo acadêmico e moral;

Aos professores Francisco de Assis Carvalho Pinto, Domingos Sárvio Valente e Igor Rodrigues de Assis, pelas enriquecedoras sugestões e incentivo;

Aos doutores Fernando Palha Leite e Guilherme Luiz de Jesus, por acreditarem neste trabalho e pela amizade construída;

Aos amigos Larissa, Laís, Michael, Anderson Rocha e Gilson Galderetto pelo auxílio nas árduas coletas de campo. Sem vocês não seria possível este trabalho!

Aos amigos Gracielly, Frederico, Anderson Costa e Flora pelos conselhos acadêmicos, além dos sorrisos confortadores que foram compartilhados;

Aos colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola, pela amistosa recepção e pelos momentos de aprendizados proporcionados;

Aos grandes amigos Ronan e Daniel, pela companhia segura durante os anos de graduação e mestrado;e

Aos amigos de república, Jonas, Isaías, Douglas, Paulo Roberto, Vitor e Fernely pela prazerosa e enriquecedora convivência.

BIOGRAFIA

MATHEUS DUARTE DE BRITO, filho de Otílio Evangelista de Brito e Maria Auxiliadora Duarte Brito, nasceu em Itabira, Minas Gerais, no dia 19 de maio de 1988.

Em março de 2007 iniciou o curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Viçosa (UFV), obtendo o título de Engenheiro Florestal em novembro de 2012.

Em novembro de 2012 ingressou no curso de Mestrado em Engenharia Agrícola da UFV, na linha de pesquisa Agricultura de Precisão, submetendo-se a defesa de dissertação em junho de 2014

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	0
OBJETIVOS	3
CONTEÚDO DO TRABALHO	4
LITERATURA CITADA.....	5

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SOLOS FLORESTAIS A PARTIR DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE	7
Resumo	7
Abstract	8
1.1. Introdução	9
1.2. Material e métodos	12
1.3. Resultados	18
1.4. Discussão	27
1.5. Conclusão	29
1.6. Referências bibliográficas	30

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA NO PADRÃO ESPACIAL DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO ..	38
Resumo	38
Abstract	39
2.1. Introdução	40
2.2. Material e métodos	42
2.3. Resultados	44
2.4. Discussão	46
2.5. Conclusão	48
2.6. Referências bibliográficas	49

CAPÍTULO 3

DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO PARA UM PLANTIO DE *Eucalyptus grandis* x *urophylla*, BASEADAS NA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE, UMIDADE E TEOR DE ARGILA DO SOLO.54

Resumo54

3.1. Introdução56

3.2. Material e métodos59

3.3. Resultados63

3.4. Discussão66

3.5. Conclusão68

3.6. Referências bibliográficas69

4. CONCLUSÃO GERAL74

5. APÊNDICES76

APÊNDICE - A77

APÊNDICE - B81

APÊNDICE C85

APÊNDICE D88

RESUMO

BRITO, Matheus Duarte de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2014. **Condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta à silvicultura de precisão.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Domingos Sárvio Magalhães Valente.

O conceito de silvicultura de precisão, fundamentado na eficiência operacional, aplica-se a todas as etapas do ciclo de produção de uma floresta, desde o preparo do solo até a colheita das árvores. Compreender a variabilidade espacial de uma característica intrínseca à produção resume o princípio proposto por esse novo modelo de gestão florestal. A variabilidade da fertilidade do solo tem recebido atenção especial por parte de produtores e pesquisadores, pelos efeitos diretos que impõe sobre a produtividade. Porém, identificar precisamente essa variabilidade é uma tarefa dispendiosa, uma vez que grande quantidade de amostras de solo seria necessária a fim de garantir uma boa representação da área. Métodos geofísicos têm sido utilizados na agricultura para esse fim, como, por exemplo, a determinação da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a). Essa característica é relacionada a outros atributos químicos e físicos do solo, por isso é utilizada na avaliação da qualidade de solos. Este trabalho teve como objetivos aplicar esta tecnologia a povoamentos florestais e contribuir para sua difusão como ferramenta à silvicultura de precisão. O trabalho foi realizado no município de Naque, Minas Gerais, em um plantio clonal de *Eucalyptus urophylla x grandis*. Para tanto, foi verificado, *a priori*, a correlação da CE_a com outras propriedades de um solo florestal, utilizado para o cultivo do eucalipto, e também com atributos topográficos. As correlações encontradas com as características topográficas do terreno foram baixas, entretanto, foram elevadas para a maioria dos atributos do solo. Dessa forma, a CE_a pode ser utilizada na avaliação da qualidade de sítios, por exemplo, além de melhorar o método tradicional de amostragem de solos. De forma a elucidar a utilização da CE_a procurou-se definir o momento adequado para os levantamentos em campo, bem como os possíveis efeitos da colheita mecanizada no seu padrão espacial. Apesar de terem sido verificados maiores valores da CE_a após a colheita, o alto coeficiente de correlação encontrado entre os mapas interpolados para as duas ocasiões indicou que o padrão espacial se manteve próximo. Por último, foi proposta e avaliada a utilização da CE_a em combinação com teor de água do solo e argila para

a definição de zonas de manejo, utilizando o algoritmo *fuzzy k-means*. As análises do índice de performance fuzzy e da entropia da partição modificada indicaram que o número ideal de zonas de manejo para a área estudada foi igual a dois. A maioria das características do solo diferiram, estatisticamente, entre as duas classes. O processo de validação indicou que as zonas de manejo geradas representaram satisfatoriamente a variação espacial dos nutrientes no solo e reforçou o uso potencial da CE_a como ferramenta à silvicultura de precisão.

ABSTRACT

BRITO, Matheus Duarte de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2014. **Apparent electrical conductivity as tool in precision forestry** Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Co-adviser: Francisco de Assis de Carvalho Pinto and Domingos Sárvio Magalhães Valente.

This concept of precision forestry, which is based on operational efficiency, is applicable in all steps of the forest production cycle, from soil preparation to harvesting. Understanding the spatial variability of production's characteristics summarizes the ideology proposed by this model. The soil variability across a field has received special attention from farmers and researches due its direct effects on productivity and wood quality. However, determining subfield areas based on nutrients concentration and other soil properties is difficult and laborious, because a high sampling density would be required in order to achieve a good field variability representation. Geophysical methods have been used in agriculture to this goal, for instance, the geospatial measurements of apparent electrical conductivity (EC_a). This soil characteristic is correlated with others soil attributes, what justify its using in soil quality evaluating. The objective of this study was apply the use of EC_a in forestry plantations, and contribute to its diffuse as a precision forestry tool. Thereby, was evaluated, a priori, the correlation between EC_a and soil properties in a forestry soil, besides topographic attributes. EC_a was not well correlated with topographic characteristics, but the correlation was high with the most soil properties considered. Thus, the EC_a might be used as an instrument to evaluate site quality as well as to improve the traditional soil sampling method. To elucidate EC_a use it was also discussed the appropriate time to collect field data as well as possible harvesting effect over its spatial pattern. Although it was found higher EC_a values after-harvesting, the correlation coefficient between the two krigged maps (before and after-harvesting) indicated that the spatial patterns remains close. Finally, it was proposed and evaluated the combined use of EC_a , soil wetness and clay content to delineate homogenous management zones, through fuzzy-k-means algorithm. An analysis of fuzzy performance index and modified partition entropy indicated two as the ideal number of management class. The validation process indicated that management zones delineated a good variability representation of soil properties and reinforced the potential EC_a use as tool to precision forestry.

I. INTRODUÇÃO GERAL

Na produção de florestas plantadas deve-se buscar o equilíbrio entre altos índices de produtividade, menor custo e redução dos impactos ambientais. Um caminho para alcançar esse equilíbrio é a adesão ao modelo de produção conhecido como silvicultura de precisão. Essa forma de manejo florestal considera a variabilidade espacial e temporal de características biológicas e ambientais que são intrínsecas ao processo de produção como, por exemplo, atributos do solo, topografia, microclima, ocorrência de pragas e doenças, etc. (ZHANG *et al.*, 2014). O manejo sítio específico tem se tornado importante ferramenta, principalmente, na elaboração de complexos modelos de fertilização para grandes áreas. Classificar os solos florestais de acordo com sua fertilidade pode ser muito útil e deve ser considerado o primeiro passo da silvicultura de precisão (FERNÁNDEZ-MOYA *et al.*, 2014). No entanto, o mapeamento da variabilidade espacial das propriedades do solo possui custos elevados, principalmente pela alta demanda por mão de obra.

Países com maior desenvolvimento tecnológico em agricultura de precisão tem utilizado a condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) no monitoramento e entendimento de algumas características de um solo. Os componentes físicos e químicos do solo apresentam diferentes níveis de condutividade elétrica, fato que justifica em parte seu uso na agricultura (LUND *et al.*, 1998) e florestas (McBRIDE *et al.*, 1990). Por definição, condutividade elétrica é a propriedade que um material tem em transmitir (conduzir) corrente elétrica e é intrínseca ao mesmo. A sua determinação em campo vem sendo utilizada com sucesso devido a rapidez com que é determinada e a boa resolução dos mapas gerados (SUDDUTH *et al.*, 2013), além de ser um bom parâmetro para avaliar os atributos do solo associados à fertilidade (SUDDUTH *et al.* 2005). A CE_a também pode atuar como indicador de outras características do solo, como salinidade, quantidade de água, densidade, matéria orgânica, lixiviação, classes de drenagem, recarga de lençol freático, entre outras (CORWIN; LESCH, 2005).

Os sensores utilizados para medir a CE_a podem ser baseados nos princípios da indução eletromagnética (IEM) ou da resistividade elétrica (RE), esses últimos conhecidos como sensores de contato direto (RHOADES; CORWIN, 1984). Os

dispositivos que utilizam a RE são mais vantajosos em virtude da facilidade de ajuste da profundidade de mensuração. Nos aparelhos baseados na IEM esse ajuste é complexo e limitado (CORWIN; LESCH, 2003). Há dois modelos disponíveis no mercado de sensores por contato direto, aqueles tracionados por trator ou caminhonete, que possuem o uso restrito a áreas planas ou levemente onduladas; e os portáteis, que apresentam menor custo de aquisição, podem ser utilizados em regiões montanhosas e em culturas já estabelecidas. Poucos trabalhos fizeram uso de modelos portáteis para mapear a CE_a , na literatura consultada, possivelmente em razão do maior tempo de amostragem requerido. Entretanto, há casos onde somente é possível e viável economicamente utilizar os sensores portáteis, como por exemplo, no mapeamento dos solos da região da Zona da Mata de Minas Gerais, onde há grande concentração de pequenos produtores florestais e o relevo montanhoso.

Ao considerar a CE_a como uma propriedade indicativa da qualidade de solos, o seu mapeamento nas áreas de produção poderá auxiliar no planejamento e no direcionamento da amostragem de solos (FAROOQUE *et al.*, 2012). Porém, em função da grande quantidade de variáveis que influenciam simultaneamente a CE_a é recomendado que em cada campo de produção seja determinado aquelas de maior relevância (CORWIN *et al.*, 2003).

Na literatura científica são encontrados inúmeros trabalhos para elucidação das relações espaciais entre a CE_a e propriedades de solos destinados à culturas agrícolas. Porém, em solos utilizados para culturas florestais - solos florestais, como definido por Rovedder *et al.* 2013 - trabalhos dessa natureza são raros. Estes solos exibem características particulares adquiridas sob influência de três fatores pedogenéticos não comumente encontrados em outros solos: resíduos florestais, raízes das árvores e organismos específicos, cuja existência depende da cobertura florestal (WILDE, 1958). As características específicas deste tipo de solo também estabelecem uma relação particular com a CE_a .

Discutir a respeito do momento adequado para os levantamentos da CE_a contribui para consolidar a utilização desta variável seja na avaliação da qualidade de solos florestais ou para geração de zonas de manejo. Da mesma forma, verificar a magnitude das modificações no seu padrão espacial contribuirá para compreender melhor a sua interação com as propriedades dos solos florestais. A colheita florestal

mecanizada, por exemplo, é uma das etapas da produção que modifica a estrutura física do solo, logo é possível que a CE_a seja passível à mudanças em decorrência do tráfego de máquinas.

Mapear atributos do solo representa o primeiro passo à geração de zonas de manejo (ZH). Por definição, uma zona de manejo é uma área que apresenta características semelhantes entre fatores que limitam a produtividade e/ou qualidade do produto, passíveis de receberem um mesmo tratamento agrícola (VALENTE, 2012). A CE_a tem sido muito utilizada em estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo, a fim de delimitar zonas de manejo (SCUDIERO *et al.*, 2013; PERALTA *et al.*, 2013; PERALTA; COSTA, 2013; BENEDETTO *et al.*, 2013; HEIL; SCHMIDHALTER, 2012; SUN *et al.*, 2012; FULTON *et al.*, 2011; GHOLIZADEH *et al.*, 2011).

Quando é adotado o manejo sítio específico, por intermédio da CE_a , por exemplo, há otimização no uso dos insumos agrícolas. Nessa condição a aplicação de fertilizante é conduzida de modo a atender as necessidades de uma subárea (aplicação à taxa variável). Essa forma de manejo também pode conduzir a maiores níveis de produtividade, além de minimizar os impactos negativos ao meio ambiente. Assim, trabalhos relacionados à melhor compreensão do uso CE_a para o manejo de solos florestais (sistemas complexos), na perspectiva da silvicultura de precisão, são essenciais, pois além de contribuir para maior sustentabilidade da produção, vai de encontro a grandes desafios globais como redução do desmatamento e mitigação do aquecimento global.

II. OBJETIVOS

Analisar a variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo a fim de utilizá-la como ferramenta à silvicultura de precisão.

Objetivos Específicos

- I) Determinar a CE_a com sensor portátil de contato direto a 20 cm de profundidade e analisar sua variabilidade espacial e correlação com atributos físico e químicos de um solo florestal
- II) Definir o momento adequado para realizar a coleta de dados da CE_a bem como os possíveis efeitos da colheita florestal no seu padrão espacial; e
- III) Definir e avaliar zonas para o manejo diferenciado do solo com base em atributos de maior interesse agrônomo.

III. CONTEÚDO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em uma introdução geral, objetivos, três capítulos no formato de artigo científico, conclusão geral e uma seção contendo os apêndices. A introdução geral apresenta informações para a compreensão do tema como um todo.

No primeiro capítulo, analisou-se a correlação da condutividade elétrica aparente com características topográficas e outros atributos do solo em uma área destinada à produção de eucalipto clonal, levando em consideração a variabilidade espacial. Também se discutiu, nesse capítulo, a possibilidade de utilização da condutividade elétrica aparente para a geração de zonas de manejo.

No segundo capítulo, é apresentada uma discussão do momento adequado à realização dos levantamentos em campo da CE_a bem como dos possíveis efeitos da colheita florestal mecanizada sobre o seu padrão espacial. Portanto, é apresentada análise de correlação entre os mapas interpolados da CE_a antes e pós colheita, e também as vantagens e desvantagens da coleta de dados em ambas circunstâncias.

No terceiro capítulo foram definidas zonas de manejo a partir de uma forma precisa e considerada de baixo custo utilizando-se a condutividade elétrica aparente, teor de água do solo e quantidade de argila. Também foi apresentada uma forma de avaliação da qualidade das zonas de manejo propostas.

Na conclusão geral, resumiram-se os principais resultados e aplicações que foram encontrados neste trabalho. Por último, o item apêndices foi subdividido em quatro seções: A, B, C e D. A seção “A” apresenta os semivariogramas ajustados que foram utilizados no processo de krigagem ordinária; a seção “B”, os gráficos da validação cruzada entre os dados obtidos em campo e aqueles estimados pela modelagem numérica; na seção “C” encontram-se os mapas das zonas de manejo, obtidos a partir das propriedades do solo, com duas classes cada; e, finalmente, no apêndice D, estão os valores corrigidos para a significância dos coeficientes da correlação de Pearson entre as variáveis trabalhadas.

IV. LITERATURA CITADA

BENEDETTO, D. D.; CASTRIGNANÒ, A.; RINALDI, M.; RUGGIERI, S.; SANTORO, F.; FIGORITO, B.; GUALANO, S.; DIACONO, M.; TAMBORRINO R. An approach for delineating homogeneous zones by using multi-sensor data. **Geoderma** v.199 p.117–127, 2013.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture. **Agron. J.**, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.

CORWIN, D.L.; LESCH, S.M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.46, p.11-43, 2005.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M.; SHOUSE, P. J.; SOPPE, R.; AYARS, J. E. Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 2, p. 352-364, 2003.

FAROOQUE, A.A.; ZAMAN, Q.U.; SCHUMANN, A.W.; MADANI, A.; PERCIVAL, D.C.. Delineating management zones for site specific fertilization in wild blueberry fields. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 28, n. 01, p. 57-70, 2012.

FERNÁNDEZ-MOYA, J.; ALVARADO, A.; MORALES, M.; SAN MIGUEL-AYANZ, A.; MARCHAMALO-SACRISTÁN, M. Using multivariate analysis of soil fertility as a tool for forest fertilization planning. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, p. 1-13, 2014.

FULTON, A.; SCHWANKL, L.; LYNN, K.; LAMPINEN, B.; EDSTROM, J.; PRICHARD, T. Using EM and VERIS technology to assess land suitability for orchard and vineyard development. **Irrigation Science**, v. 29, p. 497-512, 2011.

GHOLIZADEH, A.; AMIN, M.S.M.; ANUAR, A.R.; AIMRUN, W.. Apparent electrical conductivity in correspondence to soil chemical properties and plant nutrients in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.42, p.1447-1461, 2011.

HEIL, K.; SCHMIDHALTER, U.; Characterisation of soil texture variability using the apparent soil electrical conductivity at a highly variable site, **Computers & Geosciences**, v. 39, p. 98-110, fev. 2012.

LUND, E.D.; COLIN, P.E.; CHRISTY, D.; DRUMMOND, P.E. Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. In: International Conference on Precision Agriculture, 4rd, St. Paul, p. 1089-1100, 1998.

MCBRIDE, R. A.; SHRIVE, S. C.; GORDON, A. M. Estimating Forest Soil Quality from Terrain Measurements of Apparent Electrical Conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 1, p. 290-293, 1990.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L.; Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management, **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 218-226, Nov. 2013.

PERALTA, N.R., COSTA, J.L., BALZARINI, M., ANGELINI, H.; Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. **Canadian Journal of Soil Science** v. 93, p. 205–218, 2013.

RHOADES, J.; CORWIN, D. Monitoring soil salinity. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 39, n. 3, p. 172-175, 1984.

ROVEDDER, A. P. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALMOLIN, R. S. D.; REICHERT, J. M.; SCHENATO, R. B. Compreensão e aplicabilidade do conceito de solo florestal. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 517-528, 2013.

SCUDIERO, E.; TEATINI, P.; CORWIN, D. L.; DEIANA, R.; BERTI, A.; MORARI, F.; Delineation of site-specific management units in a saline region at the Venice Lagoon margin, Italy, using soil reflectance and apparent electrical conductivity, **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 54-64, Nov. 2013.

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R.; WIEBOLD, W. J.; BATCHELOR, W. D.; BOLLERO, G. A.; BULLOCK, D. G.; CLAY, D. E.; PALM, H. L.; PIERCE, F. J.; SCHULER, R. T.; THELEN, K. D. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3, p. 263-283, 2005.

SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; KITCHEN, N. R.; DRUMMOND, S. T. Modeling soil electrical conductivity–depth relationships with data from proximal and penetrating ECa sensors. **Geoderma**, v. 199, p. 12-21, 2013.

SUN, W.; WHELAN, B.M.; MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B.. Evaluation of a local regression kriging approach for mapping apparent electrical conductivity of soil (ECa) at high resolution. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v.000, p. 1-9, 2012.

WILDE, S. A. Forest soils, their properties and relation to silviculture. **Forest soils, their properties and relation to silviculture.**, 1958.

ZHANG, H.; ZHENG, J.; DORR, G.; ZHOU, H.; GE, Y. Testing of GPS Accuracy for Precision Forestry Applications. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 1, p. 237-245, 2014.

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE SOLOS FLORESTAIS A PARTIR DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE

RESUMO

A crescente demanda por produtos madeireiros e a resultante pressão sobre as florestas nativas tem chamado à atenção para a necessidade de elevar a produção de madeira por intermédio da ampliação das áreas de florestas plantadas, como as de eucalipto. Um caminho para atingir com eficiência esse objetivo está no conceito de silvicultura de precisão, considerando o manejo de solos localizado. A utilização da condutividade elétrica aparente (CE_a) na diagnose de características relacionadas à fertilidade dos solos é uma técnica eficaz e de baixo custo, quando comparada aos métodos tradicionais. Porém a utilização desta técnica em solos florestais é rara. Estes solos possuem características distintas dos solos agrícolas, logo são necessários estudos que verifiquem se a CE_a também é eficiente para a avaliação da qualidade destes solos. Os objetivos deste trabalho foram determinar se, a partir da CE_a obtida por um sensor de baixo custo, é possível diagnosticar de maneira precisa características físicas e químicas de um solo florestal na região do Vale do Rio Doce em Minas Gerais; e verificar se a CE_a estava relacionada a atributos topográficos da área. Na área, utilizada para o plantio de eucalipto clonal, foram coletadas e georreferenciadas 150 amostras compostas de solo, obtidas de forma aleatória, para análises químicas e físicas de rotina. A CE_a foi avaliada em 300 pontos, também aleatórios, com um sensor portátil. A correlação entre a CE_a e as demais variáveis foi avaliada pelo coeficiente de correlação de Pearson corrigido para a autocorrelação espacial, e os mapas de variabilidade foram gerados pelo método da krigagem ordinária. Os resultados indicaram forte correlação positiva da CE_a com o pH, K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} e CTC efetiva, além de uma correlação moderada com a quantidade de silte, e fósforo remanescente e fraca com fósforo e declividade. A acidez do solo apresentou correlação negativa com a CE_a . Não houve significância na correlação entre a CE_a com a altitude, teores de argila, areia grossa e areia fina. As correlações encontradas mostraram que a CE_a representa uma valiosa ferramenta para avaliação espacial da fertilidade e qualidade de solos florestais.

Palavras-chave: Silvicultura de precisão. Manejo de solos. Eucalipto.

CHAPTER 1

QUALITY ASSESSMENT OF FORESTRY SOILS FROM APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY

ABSTRACT

The growing up wood products demand and its resultant pressure over the natural forests has called the attention to the necessity of increasing wood production via planted forests, as those of eucalyptus. To find this way with efficiency, the concept of precision forestry is a potential option. This concept aims the site specific management according to the field requirements. The use of apparent electrical conductivity (EC_a) to diagnose soil characteristics is an effective technique and has low costs when compared to traditional methods. However, the utilization of EC_a in forestry soils is rare. This specific soil type has different properties than agricultural soils. Studies which verify if the EC_a was also efficient to evaluate forest soils quality are required. The objectives of this work were determine if, from the EC_a , using a low cost sensor, is possible comprehend precisely chemicals and physicals properties of a forestry soil in the region of Vale do Rio Doce, Minas Gerais, Brazil; and verify if EC_a was correlated to topographic attributes, either. In the field, used for clonal eucalyptus plantation, were collected and georeferenced 150 composite random samples, for chemical and physical analysis. The EC_a was measured in 300 random points using a portable sensor. The correlation between EC_a and other variables was evaluated by Pearson coefficient, corrected for the spatial autocorrelation, and the variability maps were designed by the ordinary kriging. The results shown high positive relation of EC_a with pH, K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} and effective CEC, moderate correlation with silt and remaining phosphorus content, and low correlation with phosphorous and slope. The soil acidy presented negative correlation with EC_a . There was no significant correlation between EC_a and clay, sand fine, sand thick, silt content and also altitude. According to the results EC_a is a valuable tool to evaluate spatially forestry soil fertility and quality.

Key-words: Precision forestry. Soil management. Eucalyptus.

1.1. INTRODUÇÃO

Entre os anos 2000 e 2012, imagens obtidas pelo satélite Landsat 7 identificaram a perda de 2,3 milhões de quilômetros quadrados de florestas naturais, em todo o mundo (HANSEN *et al.*, 2013). No Brasil, a área total desmatada nesse mesmo período ultrapassou 200 mil quilômetros quadrados, sendo que, em 2013, houve um aumento de 28% na taxa de desmatamento da região amazônica, em relação ao ano anterior (INPE, 2013). A demanda por produtos madeireiros é um dos principais fatores que causam a supressão de florestas nativas (CHAKRAVARTY, 2013). Estima-se que 350 milhões das pessoas mais pobres do mundo (incluindo 60 milhões de indígenas) utilizam as florestas intensivamente para sua sobrevivência, e que, ainda, 2 bilhões de pessoas dependam da biomassa florestal como fonte primária de energia (FAO, 2013). Toda a população do planeta utiliza variados produtos de origem florestal, como celulose, madeira serrada, biomassa, entre outros. Com o aumento da população mundial – estima-se 9,6 bilhões de habitantes até 2050 (UN, 2013) – é esperado, também, o aumento na demanda em relação aos recursos florestais, logo, reduzir o desmatamento não é uma tarefa fácil. Os plantios florestais, como aqueles de espécies do gênero *Eucalyptus*, são considerados uma alternativa sustentável importante para suprir a demanda por produtos florestais.

O Brasil assume uma posição de destaque na produção mundial de florestas plantadas, pois aproximadamente 22% de toda a área mundial ocupada por essas se encontra no país (GIT Forestry Consulting, 2009). Destaque alcançado em função dos altos investimentos em tecnologia de produção, somados às condições edáficas e climáticas favoráveis, tais como abundância de luz e períodos regulares de chuva (COPPEN, 2002). Atualmente, os plantios de eucalipto no Brasil visam atender, principalmente, os mercados de carvão vegetal, madeira serrada e celulose, sendo a produção de fibras curtas a maior do mundo (ABRAF, 2013). Manter a posição de destaque no mercado mundial exige da silvicultura brasileira constantes melhorias nas técnicas de manejo, visto que um empreendimento que não se dedica à inovação tende a perder rapidamente seu espaço em um mercado globalizado (TRINDADE, 2007).

Com origem na década de 80, a Agricultura de Precisão (AP) é um importante caminho para o melhor manejo da produção e aumento da lucratividade em empreendimentos agrícolas (PICK, 2005). Esse modelo de gestão agrícola fornece a possibilidade de fazer a coisa certa, no lugar certo, no tempo certo e da maneira certa (PIERCE; NOWAK, 1999). Assim, a AP baseia-se na aplicação de tecnologias para determinar o que, de fato, é “certo” (ZHANG *et al.*, 2002), por exemplo, a otimização na aplicação de insumos. A partir da agricultura de precisão, desenvolveu-se a silvicultura de precisão ou florestas de precisão (TAYLOR *et al.*, 2002). Essa técnica tem sido definida como sendo a análise da variabilidade espacial e temporal de plantios florestais com base nas características biológicas e nos recursos ambientais de uma área (por exemplo, propriedades do solo, topografia, microclima, incidência de pragas e doenças etc.). Essas informações são utilizadas na condução do manejo florestal localizado, de forma a aperfeiçoar a aplicação de insumos, minimizar os impactos ambientais negativos e maximizar a produção de madeira (ZHANG *et al.*, 2004). Atualmente, a silvicultura de precisão é aplicável em quase todo o processo de produção florestal, do manejo de solos à modelagem do crescimento volumétrico (ZHANG *et al.*, 2014).

O manejo de solos com precisão é o aspecto que tem recebido mais atenção da comunidade científica nos últimos anos. A aplicação desnecessária ou excessiva de fertilizantes pode deteriorar a qualidade da água, promover o crescimento de plantas daninhas e reduzir os lucros (CHATTHA *et al.*, 2014). Um diagnóstico preciso da variabilidade espacial da fertilidade pode conduzir a práticas de adubação mais eficientes e menos impactantes. Entretanto, há poucas técnicas capazes de realizar essa diagnose (HEIL; SCHMIDHALTER, 2012). O uso de sensores de campo portáteis, que coletam dados seguindo uma alta densidade de pontos amostrais é uma alternativa para avaliação da qualidade de solos florestais. Esses sensores têm como vantagens sobre o método tradicional de amostragem e análises de laboratório, o baixo custo e a rapidez na obtenção dos dados. Além disso, a habilidade de coletar mais pontos desses sensores pode aumentar a precisão espacial global, ainda que, a precisão individual de cada ponto seja menor (SUDDUTH *et al.*, 2013).

A condutividade elétrica aparente (CE_a) é uma valiosa ferramenta na agricultura de precisão para avaliar a qualidade do solo em diferentes contextos,

visto que é função dos atributos químicos e físicos (ALLAIRE *et al.*, 2014; YAO *et al.*, 2014; WETTERLIND *et al.*, 2013; MEDEIROS, 2013; SUN *et al.*, 2012; VALENTE *et al.*, 2012; CORWIN; LESH, 2005). Entretanto, o fato da CE_a sofrer influência simultânea de diferentes características do próprio solo dificulta a interpretação dos resultados obtidos, levando à necessidade de se identificar, em cada campo de produção, aqueles atributos que mais a influenciam (MEDEIROS, 2013; SUDDUTH *et al.*, 2005).

Em solos florestais, onde os *inputs* de matéria orgânica são mais contínuos ao longo de um período de tempo maior, as relações entre os atributos do solo podem ser mais complexas e estarem mais relacionadas entre si que em solos agrícolas (MCBRIDE *et al.*, 1990). Acredita-se que o potencial do uso da CE_a para avaliar a qualidade de solos florestais pode ser alto, especialmente em virtude da importância que tem sido atribuída às propriedades do solo como indicadoras da qualidade de sítio (BONTEMPS; BOURIAUD, 2014). Contudo, para a utilização da CE_a com este fim, são necessários estudos que a relacione com os demais atributos do solo.

Diante do potencial que a utilização da CE_a apresenta para o manejo de solos em silvicultura de precisão, o presente trabalho foi realizado com os seguintes objetivos: I) determinar se, a partir da CE_a obtida de um sensor de baixo custo, é possível diagnosticar características físicas e químicas de um solo florestal na região leste de Minas Gerais; e II) verificar se a CE_a está relacionada com atributos declividade e altitude.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1. Área experimental

A coleta das amostras de solo e o mapeamento da CE_a foram realizados durante o mês de outubro de 2013, em uma área de, aproximadamente, 35 hectares no município de Naque, região leste do estado de Minas Gerais. Nessa área, havia um plantio clonal estabelecido de eucalipto híbrido (*Eucalyptus. grandis* Hill. x *Eucalyptus. urophylla* S.T. Blake) com sete anos de idade, espaçamento de 3 m entre plantas e 2,5 m entre linhas, e produtividade estimada em 242 m³/ha (Figura 1.1).

Na condição de pré-plantio, o local recebeu fertilização à base de cálcio e magnésio. O plantio das mudas foi realizado em 30 de novembro de 2007, quando também foi realizada adubação a base de nitrogênio, fósforo, potássio, zinco, boro e cobre. Cerca de três meses após o plantio, as áreas mais íngremes receberam adubação com fosfato reativo, aplicado de forma manual. O tipo de solo predominante na região é o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), caracterizados por serem muito intemperizados, profundos, bem drenados e com pouca diferenciação entre os horizontes (KER, 1997).

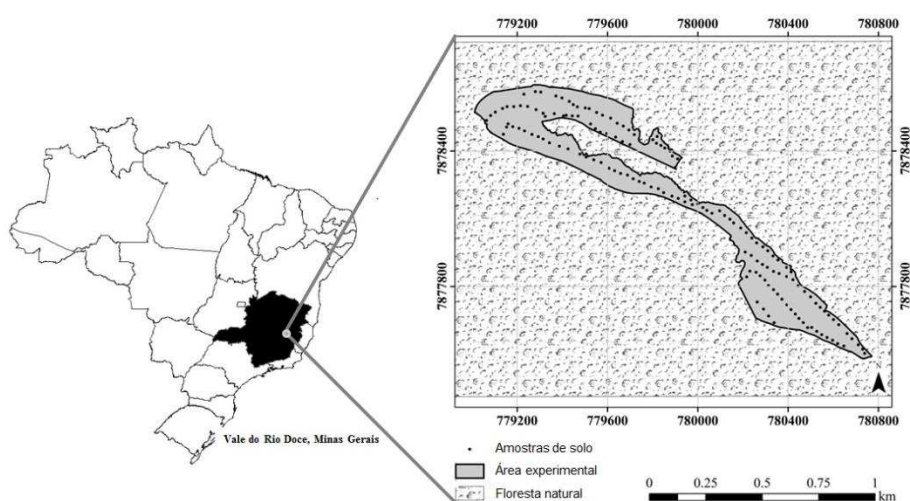


Figura 1.1. Localização da área de trabalho (UTM 23K 780033.07 mE; 7878121.47 mS SIRGAS 2000) e dos pontos onde as coletas de amostras de solo foram realizadas.

1.2.2. Coleta de dados da CE_a e de altitude

A condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) foi determinada utilizando-se o aparelho portátil LandMapper® ERM-02 (Landviser LLC, League City, TX) (Figura 1.2). O dispositivo é composto por quatro eletrodos de prova, que foram penetrados no solo até a profundidade de aproximadamente 6 cm. Dois eletrodos transmitem uma corrente elétrica alternada, enquanto os outros dois medem a diferença de potencial elétrico. A configuração da profundidade das leituras foi baseada na *Matriz de Wenner* (WENNER, 1916). Neste estudo, o sensor foi configurado para medições na camada de 0-20 cm de profundidade do solo, que é a utilizada, normalmente, para a diagnose da fertilidade em solos florestais.

Foram coletados 150 pontos de condutividade elétrica aparente do solo e da altitude (WEBSTER; OLIVER, 1992). Cada ponto foi georreferenciado pelo receptor de sinal *Global Positioning System* (GPS), Promark 3 (Magellan MiTAC International Corporation, EUA). A correção diferencial foi realizada com base nos dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC-IBGE), localizada no município de Belo Horizonte, Minas Gerais.



Figura 1.2. Medidor portátil de condutividade elétrica aparente (Landmapper), utilizado no mapeamento da variabilidade espacial do solo.

1.2.3. Amostragem e análises de solo

As amostras foram coletadas em 150 pontos (onde também foi amostrada a CE_a), da camada do solo de 0 a 20 cm de profundidade. Em cada ponto, foi obtida uma amostra de solo composta por quatro amostras simples. Estas amostras foram coletadas com o auxílio do trado motorizado modelo BT45 (Stihl), em um raio de até 2 m do ponto amostral georreferenciado. No dia seguinte à coleta, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de solos da Universidade Federal de Viçosa para as análises químicas e físicas.

A capacidade de troca catiônica total (T) foi determinada pelo método do acetato de amônio (METSON, 1956); o pH, a partir da solução solo-água (1:2,5) em suspensão; os nutrientes P e K^+ foram quantificados pela extração da solução de solo com o extrator Mehlich-1 (Mehlich, 1984); já os teores de Ca^{+2} , Mg^{+2} e Al^{+3} foram obtidos por meio do extrator KCl (1 mol L^{-1}), e o fósforo remanescente (P.rem) foi determinado por uma solução de $CaCl_2$ (10 mmol L^{-1}) (EMBRAPA, 1997). A análise granulométrica foi realizada pelo método de agitação lenta com dispersante químico NaOH, seguida de peneiramento, sedimentação da silte e secagem a 105°C (RUIZ, 2005a; RUIZ, 2005b).

O teor de água do solo foi determinado utilizando-se o sensor portátil FieldScout TDR 300 (Spectrum Technologies, Aurora, IL), que baseia-se no princípio da reflectometria no domínio do tempo (TDR- *Time Domain Reflectometry*). A técnica do TDR consiste na medição da velocidade e do tempo de propagação de um pulso eletromagnético, para então estimar a constante dielétrica do meio, no caso o solo. O sensor, por sua vez, mede o tempo transcorrido entre a emissão do pulso de voltagem e a recepção do pulso ressoante (GARZELLA; MOLIN, 2004).

1.2.4. Estimativa da declividade

A declividade foi estimada a partir do mapa de altitude, obtido pela krigagem, com tamanho do pixel 5x5 metros. Foi verificada a máxima variação em relação aos

oito vizinhos mais próximos de um pixel – que corresponde, basicamente, à descida mais íngreme a partir deste pixel.

1.2.4. Análises estatísticas e geoestatísticas

A análise descritiva ou exploratória dos dados foi realizada com o objetivo de se conhecer o comportamento das variáveis trabalhadas, ou seja, sintetizar valores de mesma natureza e identificar *outliers* (observações discrepantes). Para a identificação destes, foram utilizados o primeiro e o terceiro quartil definindo-se o limite superior e inferior do intervalo aceitável dos dados (Equações 1.1 e 1.2) (HOAGLIN *et al.*, 1992):

$$L_S = Q_s + 1,5A_i \quad (1.1)$$

$$L_I = Q_i - 1,5A_i \quad (1.2)$$

Em que:

L_S	- Limite superior;
L_I	- Limite inferior;
Q_s	- Quartil superior;
Q_i	- Quartil inferior;
A_i	- Amplitude interquartílica.

Antes de excluir um valor considerado como *outlier*, foi observado se o mesmo de fato assumia um comportamento discrepante, quando comparado aos vizinhos mais próximos (HOAGLIN *et al.* 1992; LIBARDI *et al.*, 1996). Em seguida foram estimadas as semivariâncias experimentais, pela Equação 1.3 (ISAAKS; SRISVASTAVA, 1989), considerando a distância que separa duas amostras como 60 metros (distância mínima entre os pontos amostrados).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \quad (1.3)$$

Em que:

- $\gamma(h)$ - Semivariância experimental;
- $Z(x_i)$ - Valor da variável medida na posição x_i ;
- $Z(x_{i+h})$ - Valor da variável medida na posição x_{i+h} ;
- N - Números de pares de dados para a distância de separação (h);
- i - Posição da amostra; e
- h - Distância que separa duas amostras.

Utilizando-se as semivariâncias, foram gerados os semivariogramas isotrópicos, que consideram a dependência espacial equivalente em todas as direções. A distância máxima considerada foi 900 metros (46% da máxima distância entre amostras). A escolha do modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi baseada na soma de quadrado de resíduos (SQR) e no coeficiente de determinação (R^2). Por meio dos semivariogramas foi verificada a dependência espacial das variáveis. O grau de dependência espacial (IDE) foi estimado de acordo com a Equação 1.4, e avaliado da seguinte maneira: menor ou igual a 25%, considerada fraca; entre 25 e 75%, moderada; e maior que 75%, foi considerada forte (ZIMBACK, 2001). A validação cruzada dos ajustes é apresentada no Apêndice B.

$$IDE = \frac{C}{C+C_0} \quad (1.4)$$

Em que:

- IDE - Índice de dependência espacial;
- C - Valor máximo da semivariância; e
- $C + C_0$ - Patamar.

Identificada a dependência espacial procedeu-se à aplicação do processo de krigagem. A krigagem é um interpolador exato, ou seja, se o ponto estimado coincidir com um dos pontos amostrados, o valor estimado deverá ser igual ao amostrado (UZUMAKI, 1994).

O coeficiente de correlação de Pearson (r), com significância corrigida pelo método de Dutilleul (1993), conforme proposto por Taylor e Bates (2013), foi utilizado para definir o grau de associação entre a CE_a e as demais propriedades do solo. Foram considerados fracos valores de r entre 0,10 e 0,29; moderados, r entre 0,30 e 0,49; e forte com r entre 0,50 e 1,0 (COHEN; COHEN, 1975). A significância da correlação foi verificada pelo teste *t de Student* a 5% de probabilidade. Também foi realizada a correlação pixel a pixel entre os mapas interpolados da CE_a , atributos do solo e topográficos.

Um dos pressupostos para aplicação do coeficiente correlação de Pearson é que as amostras sejam independentes. Porém, é comum a presença de autocorrelação em dados espaciais, o que reduz a independência dos dados, levando a interpretações errôneas. O intervalo de confiança e o nível de significância (p-valor) da correlação de Pearson são dependentes do tamanho da amostra, que é considerado o número de observações independentes dentro do conjunto de dados. Para variáveis que exibem autocorrelação espacial, observações dentro de uma mesma vizinhança estarão correlacionadas, ou seja, não haverá independência uma da outra, o que viola a hipótese para aplicação do coeficiente de correlação de Pearson (TAYLOR; BATES, 2013). A solução então foi utilizar a correção de Dutilleul (1993), que utiliza a covariância dos dados amostrais para ajustar o tamanho ideal da amostra, considerando, agora, a presença da autocorrelação espacial.

1.3. RESULTADOS

A análise estatística descritiva foi importante para identificar o comportamento das variáveis em estudo, na área. As estimativas da média, valor máximo e mínimo, quartil inferior e superior, mediana, desvio padrão, coeficientes de assimetria e curtose e do coeficiente de variação são apresentadas na Tabela 1.1.

O solo na área experimental possui caráter ácido (pH médio inferior a 7,0), baixos teores de fósforo e potássio, mas elevados níveis de cálcio e magnésio, quando considerada uma produtividade média de $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e um solo argiloso (NOVAIS *et al.*, 1986). A capacidade de troca catiônica foi baixa (menor que $13 \text{ cmol}_c/\text{kg}$), uma característica comum entre os Latossolos (KER, 1997).

A Tabela 1.2 apresenta a matriz dos coeficientes de correlação corrigidos (TAYLOR; BATES, 2013) para as variáveis estudadas, e no Apêndice D são apresentados os p-valores, original e corrigido para a autocorrelação espacial. Os maiores níveis de dependência linear positiva e significativa (5% de probabilidade pelo teste t de Student) da CE_a foram com o teor de água do solo, pH, potássio, cálcio, magnésio, CTC efetiva e, conseqüentemente, com a soma de bases e saturação de bases. O teor de fósforo, fósforo remanescente e o teor de silte apresentaram correlação positiva e intermediária. Por outro lado, o teor de alumínio e a acidez total apresentaram forte correlação negativa com a CE_a (significativa a 5% de probabilidade).

A modelagem das semivariâncias, estimadas a partir das variáveis em estudo, foi o primeiro passo para a aplicação do processo de krigagem. Na Tabela 1.3, estão resumidos os parâmetros utilizados na modelagem espacial dos dados. Destaca-se o fato de o teor de fósforo apresentar efeito pepita puro, ou seja, ausência total de dependência espacial. Foi possível verificar ainda, na Tabela 1.3, que o modelo exponencial se ajustou à maioria das variáveis e que apenas a CE_a e areia apresentaram dependência espacial moderada. No Apêndice A, encontram-se os semivariogramas ajustados para todas as variáveis, indicando que a amostragem adotada foi adequada.

Tabela 1.1. Estatísticas descritivas para os dados obtidos em campo

Variáveis	Unidade	Média	Mínimo	Máximo	Quartil Inferior	Mediana	Quartil Superior	N. outliers	Desvio Padrão	CV(%) ⁽¹⁶⁾
CE _a ⁽¹⁾	mS m ⁻¹	2,10	0,11	7,82	0,50	1,52	3,16	6	1,85	88,20
Altitude	m	249,45	207,24	305,38	236,44	247,18	264,38	3	19,34	7,75
Teor de água	%	20,35	7,00	35,70	16,00	20,40	25,10	3	5,61	27,58
pH ⁽³⁾	-	5,09	4,13	6,93	4,50	4,75	5,70	0	0,70	13,68
P ⁽⁴⁾	mg dm ⁻³	4,69	3,80	7,00	4,20	4,50	4,90	14	0,68	14,49
K ⁺ ⁽⁵⁾	mg dm ⁻³	37,44	7,00	121,00	14,00	23,00	59,75	4	28,68	76,62
Ca ⁺² ⁽⁶⁾	cmol _c dm ⁻³	1,35	0,09	5,04	0,27	0,75	2,41	0	1,26	92,80
Mg ⁺² ⁽⁷⁾	cmol _c dm ⁻³	0,36	0,04	1,22	0,10	0,26	0,59	0	0,29	79,77
Al ⁺³ ⁽⁸⁾	cmol _c dm ⁻³	0,73	0,00	2,34	0,00	0,88	1,27	0	0,66	91,06
H+Al ⁽⁹⁾	cmol _c dm ⁻³	5,17	2,10	9,50	3,55	5,20	6,60	0	1,79	34,68
SB ⁽¹⁰⁾	cmol _c dm ⁻³	1,82	0,16	6,43	0,41	1,02	3,20	0	1,60	88,16
T ⁽¹¹⁾	cmol _c dm ⁻³	7,26	5,62	9,82	6,63	7,08	7,80	1	0,93	12,87
t ⁽¹²⁾	cmol _c dm ⁻³	2,45	1,12	5,28	1,70	2,21	3,10	0	0,94	38,43
V ⁽¹³⁾	%	25,90	2,10	75,40	6,40	14,70	45,78	0	21,65	83,59
m ⁽¹⁴⁾	%	39,93	0,00	91,80	0,00	47,45	75,93	0	35,77	89,58
P rem ⁽¹⁵⁾	mg L ⁻¹	23,93	17,10	35,90	20,90	24,20	26,75	0	3,98	16,62
Areia Grossa	%	29,73	16,90	50,32	24,34	29,03	34,42	3	7,23	24,30
Areia Fina	%	9,20	5,48	15,43	7,46	9,10	10,78	1	2,18	23,64
Argila	%	46,55	23,03	74,06	35,18	45,27	57,47	0	13,09	28,13
Silte	%	21,50	5,07	49,08	13,15	21,34	28,18	0	9,67	44,99

¹/N. outliers – Número de outliers ²/CE_a – Condutividade elétrica aparente ³/pH – Potencial hidrogeniônico (1:2,5) ⁴/P – Fósforo ⁵/K- Potássio ⁶/Ca – Cálcio ⁷/Mg - Magnésio ⁸/Al- Alumínio ⁹/H+Al – Acidez potencial ¹⁰/SB – Soma de bases ¹¹/T – Capacidade de troca catiônica total ¹²/t – Capacidade de troca catiônica efetiva ¹³/V – Saturação por bases ¹⁴/m – Saturação por alumínio ¹⁵/P rem – Fósforo remanescente ¹⁶/CV – Coeficiente de variação

Tabela 1.2. Coeficientes de correlação de Pearson, entre as propriedades do solo, altitude, resistência à penetração, umidade e condutividade elétrica aparente

	CE _a	Altitude	Umidade	Res.Pen	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	V (%)	m (%)	T	P.rem	AG	AF	Argila	Silte
CE _a ⁽¹⁾	1,00																				
Altitude	-0,15	1,00																			
Teor de água	0,74	-0,16	1,00																		
Res.Pen ⁽²⁾	-0,11	-0,08	-0,02	1,00																	
pH ⁽³⁾	0,61*	0,06	0,52*	-0,19*	1,00																
P ⁽⁴⁾	0,25*	0,02	0,08	0,22*	0,15	1,00															
K ⁺ ⁽⁵⁾	0,62*	0,10	0,52*	-0,16	0,81*	0,04	1,00														
Ca ⁺² ⁽⁶⁾	0,68*	0,07	0,59*	-0,16	0,95*	0,19*	0,81*	1,00													
Mg ⁺² ⁽⁷⁾	0,68*	0,03	0,63*	-0,15	0,92*	0,14	0,80*	0,94*	1,00												
Al ⁺³ ⁽⁸⁾	-0,62*	-0,07	-0,52*	0,25*	-0,88*	-0,14	-0,75*	-0,85*	-0,85*	1,00											
H+AL ⁽⁹⁾	-0,52*	-0,10	-0,42*	0,30*	-0,82*	-0,11	-0,67*	-0,76*	-0,76*	0,89*	1,00										
SB ⁽¹⁰⁾	0,69*	0,07	0,60*	-0,16	0,95*	0,18*	0,84*	1,00*	0,96*	-0,86*	-0,77*	1,00									
t ⁽¹¹⁾	0,65*	0,05	0,58*	-0,08	0,87*	0,17*	0,78*	0,95*	0,90*	-0,66*	-0,60*	0,95*	1,00								
V ⁽¹²⁾	0,67*	0,06	0,59*	-0,22*	0,97*	0,16*	0,83*	0,97*	0,95*	-0,91*	-0,85*	0,98*	0,89*	1,00							
m ⁽¹³⁾	-0,66*	-0,02	-0,60*	0,23*	-0,90*	-0,15	-0,78*	-0,89*	-0,90*	0,96*	0,82*	-0,90*	-0,75*	-0,94*	1,00						
T ⁽¹⁴⁾	0,13	-0,06	0,19*	0,25*	0,05	0,07	0,12	0,20*	0,16	0,19*	0,48*	0,19*	0,39*	0,04	0,02	1,00					
Prem ⁽¹⁵⁾	0,44*	-0,11	0,27*	-0,28*	0,56*	0,06	0,48*	0,53*	0,54*	-0,69*	-0,74*	0,54*	0,37*	0,61*	-0,63*	-0,40*	1,00				
AG ⁽¹⁶⁾	-0,17	0,06	-0,48*	-0,14	0,12	0,05	0,04	0,03	0,00	-0,22*	-0,28*	0,03	-0,10	0,08	-0,12	-0,40*	0,41	1,00			
AF ⁽¹⁷⁾	-0,08	-0,04	-0,23*	-0,21*	0,07	-0,03	0,03	0,00	-0,02	-0,02	-0,13	0,00	-0,01	0,04	-0,03	-0,20*	0,12	0,34*	1,00		
Argila	-0,18	-0,17*	0,02	0,37*	-0,49*	0,01	-0,49*	-0,41*	-0,40*	0,56*	0,65*	-0,42*	-0,28*	-0,49*	0,50*	0,42*	-0,61	-0,68*	-0,33*	1,00	
Silte	0,40*	0,28*	0,40*	-0,29*	0,53*	-0,02	0,61*	0,51*	0,53*	-0,50*	-0,55*	0,53*	0,47*	0,55*	-0,51*	-0,12	0,31*	-0,07	0,06	-0,63*	1,00

¹/CE_a - Condutividade elétrica aparente ²/Res Pen.- Resistência à penetração ³/pH - Potencial hidrogeniônico (1:2,5) ⁴/P - Fósforo ⁵/K- Potássio ⁶/Ca - Cálcio ⁷/Mg - Magnésio ⁸/Al-
⁹/H+Al - Acidez potencial ¹⁰/SB - Soma de bases ¹¹/t - Capacidade de troca catiônica efetiva ¹²/V - Saturação por bases ¹³/m - Saturação por alumínio ¹⁴/T - Capacidade de troca
a total ¹⁵/P rem - Fósforo remanescente ¹⁶/AG - Areia grossa ¹⁷/AF - Areia fina

*Significância ao nível de 5% de probabilidade

Na Figura 1.3 são apresentados os mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo, bem como seu coeficiente de correlação (r) com o mapa da CE_a . O mapa de variabilidade espacial da CE_a correlacionou-se, de maneira significativa ($p \leq 0,05$), com todos os outros mapas das demais variáveis. As correlações positivas e fortes foram com os mapas dos teores de água do solo, potássio, cálcio, magnésio, pH, fósforo remanescente, silte, argila e ainda CTC efetiva, pH, e, conseqüentemente, soma de bases e índice de saturação por bases. Por outro lado, as correlações negativas e fortes foram observadas com os mapas do teor de alumínio, e, por conseqüência, acidez total e saturação por alumínio. O mapa de altitude apresentou correlação negativa, fraca e significativa com a CE_a , enquanto o mapa da declividade apresentou correlação positiva, fraca e significativa. Os maiores níveis de potássio, cálcio e magnésio estão localizados em áreas de baixada. Nessas áreas também estão os maiores valores de pH, conseqüentemente, as maiores concentrações de alumínio e acidez, estão nas encostas. Os gráficos da validação cruzada para a interpolação são apresentados no Apêndice B.

Tabela 1.3. Modelos teóricos de semivariância ajustados para Altitude, CE_a, umidade e propriedades químicas e físicas do solo

Variável	Modelo	Alcance (A)	Patamar (C0+C)	Efeito Pepita (C0)	IDE (C/Co + C)	Dep. Espacial ⁽¹⁷⁾	SQR	R ²
Altitude	Exponencial	360	313,7	1	0,997	Forte	3710	0,943
CE _a ⁽¹⁾	Esférico	255	3,453	1,39	0,597	Moderada	0,308	0,91
Umidade	Exponencial	192	28,37	0,01	1	Forte	143	0,658
pH ⁽²⁾	Exponencial	342	0,449	0,05	0,889	Forte	0,0113	0,886
P ⁽³⁾	EF ⁽¹⁸⁾	-	-	-	-	-	-	-
K ⁺ ⁽⁴⁾	Exponencial	447	819,4	10	0,988	Forte	50312	0,907
Ca ⁺² ⁽⁵⁾	Exponencial	531	1,436	0,169	0,882	Forte	0,16	0,89
Mg ⁺² ⁽⁶⁾	Exponencial	285	0,0773	0,0049	0,937	Forte	0,004294	0,85
Al ⁺³ ⁽⁷⁾	Exponencial	639	0,421	0,062	0,853	Forte	0,0114	0,909
t ⁽⁸⁾	Exponencial	435	0,939	0,193	0,794	Forte	0,06	0,867
T ⁽⁹⁾	Exponencial	294	1,339	0,324	0,758	Forte	0,108	0,822
P rem ⁽¹⁰⁾	Exponencial	471	20,81	1,5	0,928	Forte	23	0,926
AG ⁽¹¹⁾	Esférico	560	102,3	35,1	0,657	Moderada	300	0,952
AF ⁽¹²⁾	Esférico	400	6,411	2,35	0,633	Moderada	0,848	0,953
Argila	Exponencial	852	228,7	6,2	0,973	Forte	1009	0,979
Silte	Esférico	1136	104,6	31,7	0,967	Forte	648	0,912
SB ⁽¹³⁾	Exponencial	453	2,429	0,549	0,774	Forte	0,318	0,89
H + Al ⁽¹⁴⁾	Exponencial	633	3,145	0,553	0,824	Forte	0,286	0,954
V ⁽¹⁵⁾	Exponencial	552	471	68	0,856	Forte	12879	0,911
m ⁽¹⁶⁾	Exponencial	549	1307	151	0,884	Forte	131279	0,893

CE_a – ¹/CE_a - Condutividade elétrica aparente ²/pH – Potencial hidrogeniônico (1:2,5) ³/P – Fósforo ⁴/K- Potássio ⁵/Ca – Cálcio ⁶/Mg - Magnésio ⁷/Al- Alumínio
⁸/ t – Capacidade de troca catiônica efetiva ⁹/ T – Capacidade de troca catiônica total ¹⁰/P rem – Fósforo remanescente ¹¹/AG – Areia grossa ¹²/AF – Areia fina
¹³/SB – Soma de bases ¹⁴/H+Al – Acidez potencial ¹⁵/ V – Saturação por bases ¹⁶/ m - Saturação por alumínio ¹⁷/Dep. Espacial – Dependência espacial ¹⁸/EF ⁽¹⁸⁾
– Efeito pepita puro.

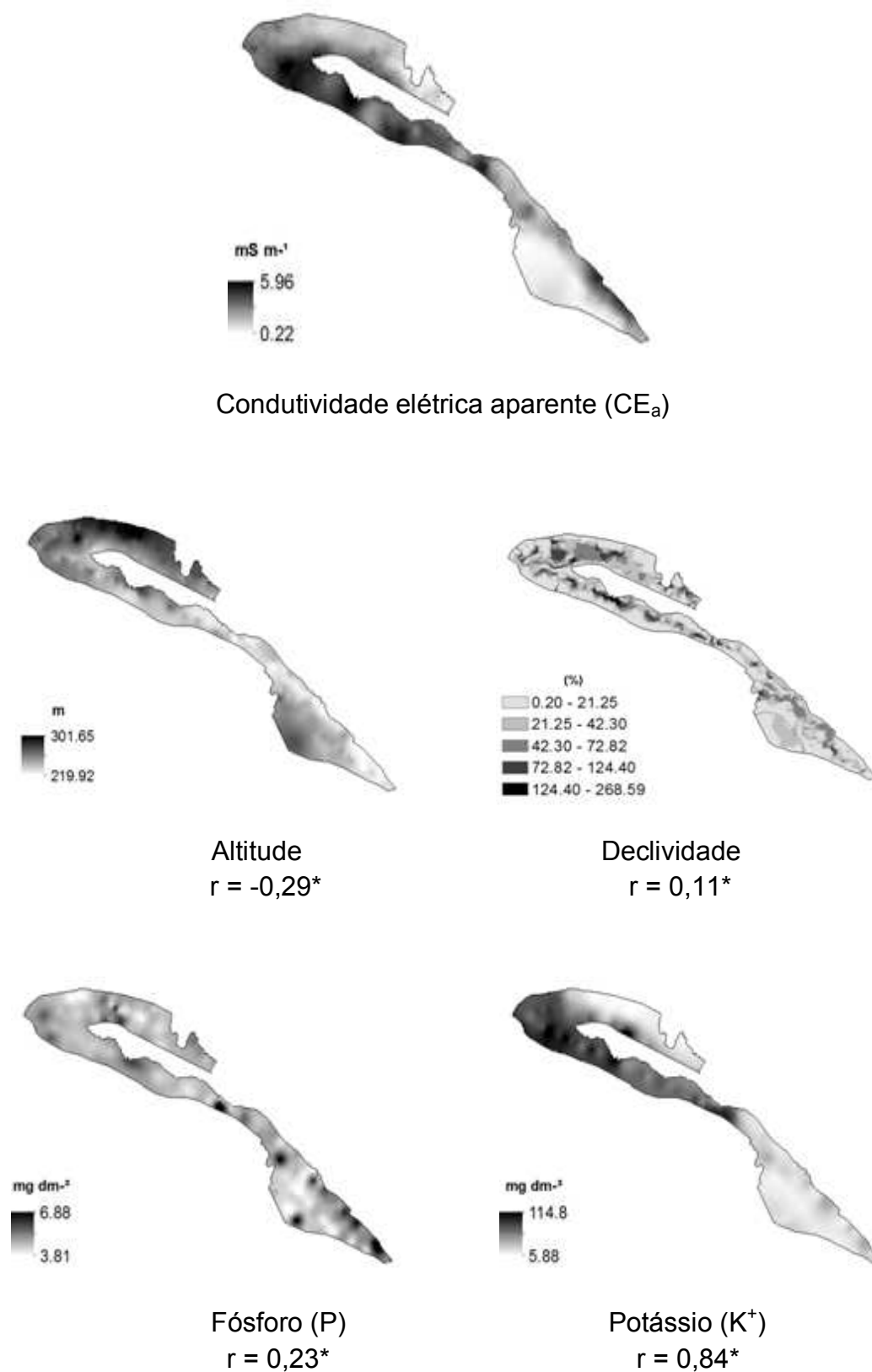


Figura 1.3. Mapas de variabilidade espacial das variáveis estudadas obtidos por krigagem ordinária e o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre os seus valores e os da condutividade elétrica (CE_a).

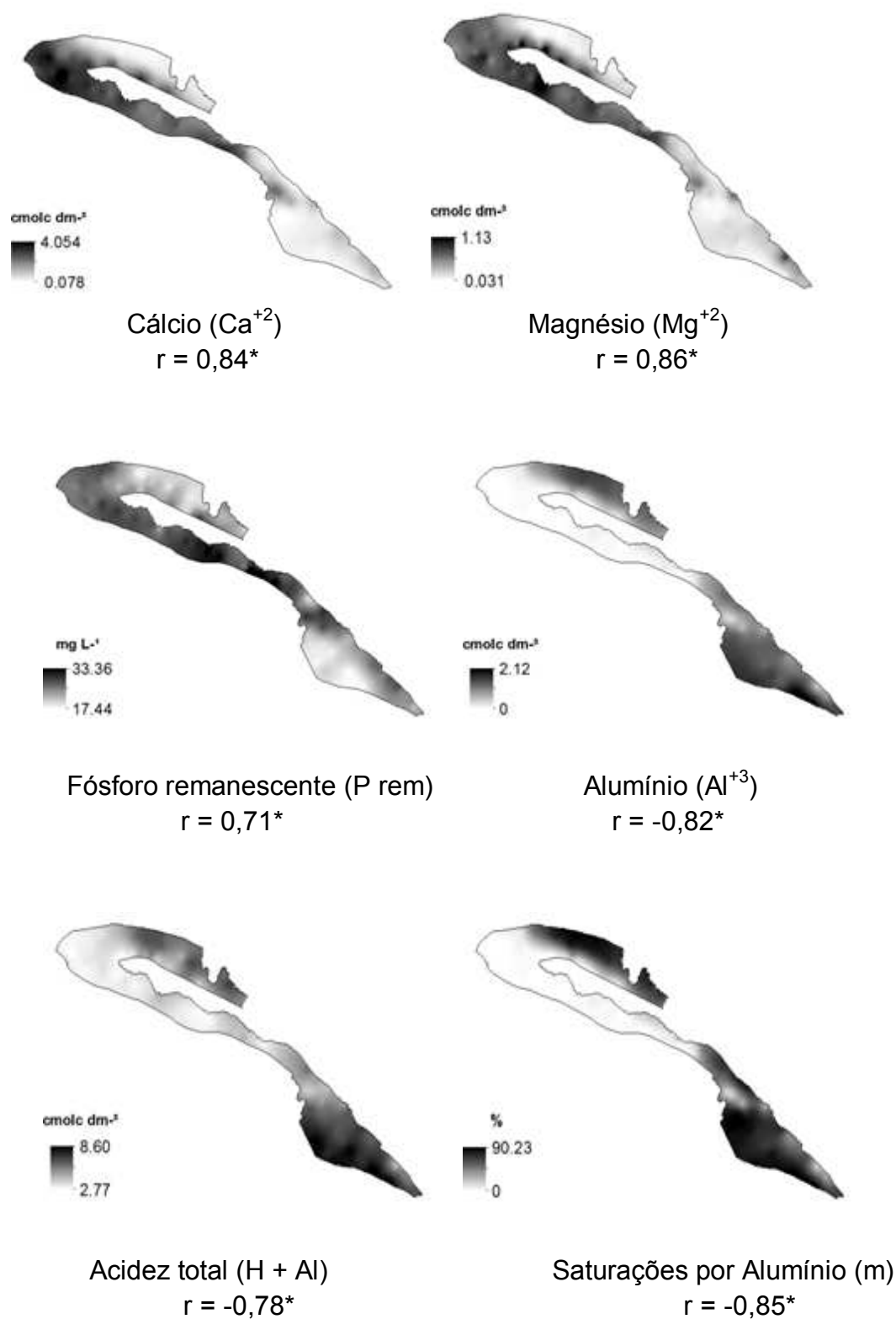


Figura 1.3. (Continuação) Mapas de variabilidade espacial das variáveis estudadas obtidos por krigagem ordinária e o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre os seus valores e os da condutividade elétrica (CE_a).

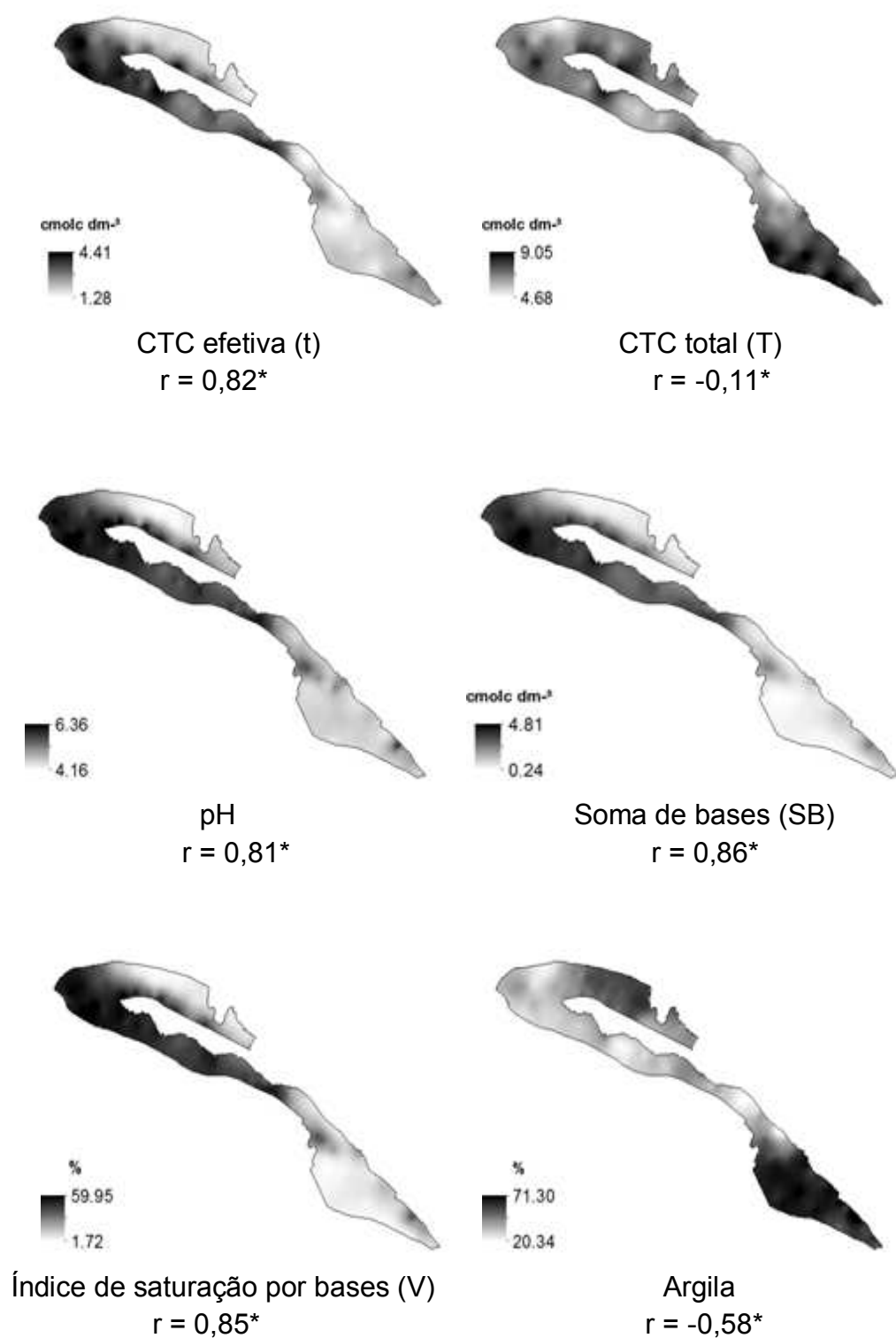


Figura 1.3. (Continuação) Mapas de variabilidade espacial das variáveis estudadas obtidos por krigagem ordinária e o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre os seus valores e os da condutividade elétrica (CE_a).

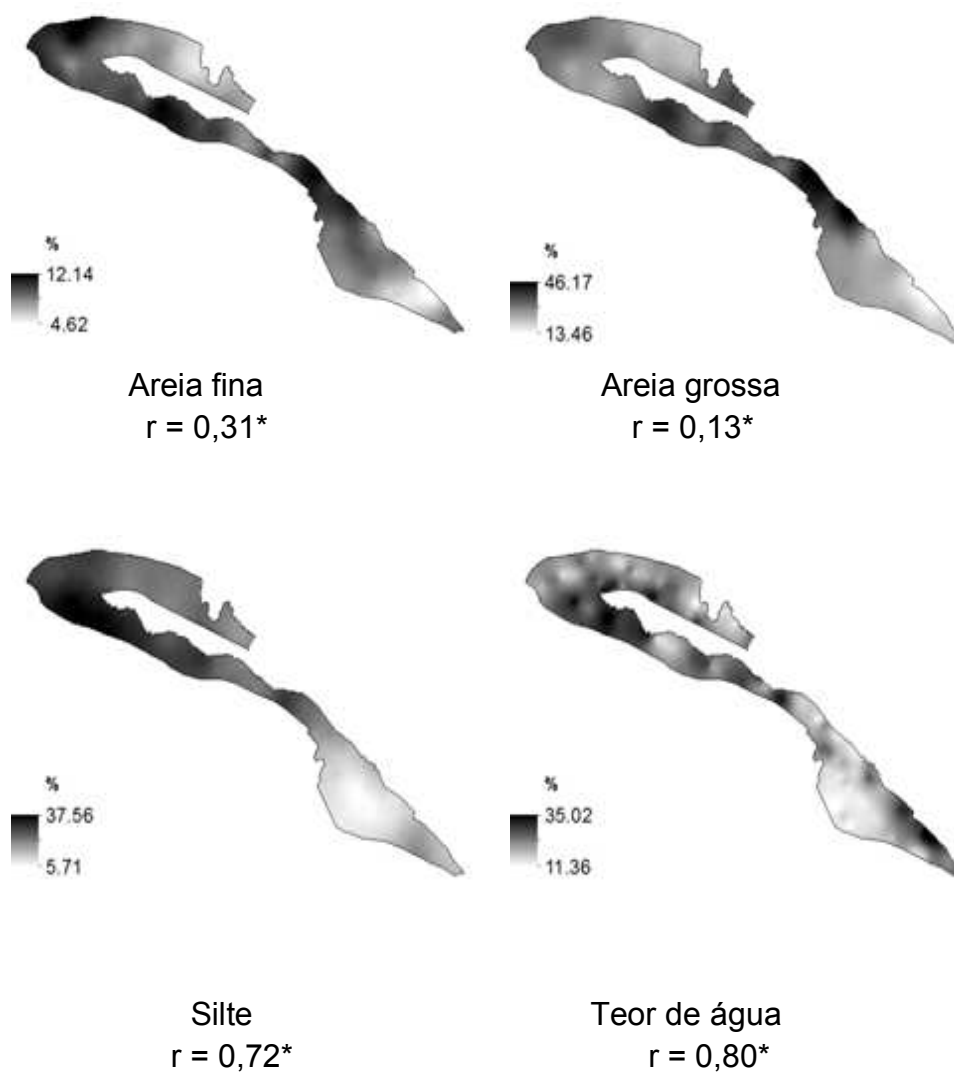


Figura 1.3. (Continuação) Mapas de variabilidade espacial das variáveis estudadas obtidos por krigagem ordinária e o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre os seus valores e os da condutividade elétrica (CE_a).

1.4. DISCUSSÃO

O coeficiente de variação estimado para a CE_a foi próximo ao encontrado por Taghizadeh-Mehrjardi *et al.* (2014) e superior àqueles encontrados por Yao *et al.* (2014), Islam *et al.* (2014) e Serrano *et al.* (2013). A alta variabilidade nos valores da condutividade elétrica pode ser atribuída à substancial presença de raízes secundárias (AMAKOR *et al.*, 2014), condição característica dos plantios de eucalipto. O valor médio da CE_a foi baixo quando comparado àqueles observados em solos sob clima temperado (HERRERO; HUDNALL, 2014; SCUDIERO *et al.*, 2013; SUDDUTH *et al.*, 2013; MORAL *et al.*, 2010). Entretanto, este valor foi próximo a outros também obtidos em solos de regiões tropicais (MEDEIROS, 2013; MOLIN; FAOLIN, 2013; VALENTE *et al.*, 2012; BRANDÃO *et al.*, 2011; BOTTEGA, 2011; ALCÂNTARA, 2010). Essa diferença na magnitude dos valores médios pode estar associada à baixa fertilidade natural da maioria dos solos tropicais.

Conforme esperado, em áreas de baixada foram encontrados os maiores valores para CE_a , bases trocáveis e pH, quando comparados àqueles obtidos nas encostas. O valor médio de pH encontrado, apesar de baixo, não representa um problema para a produção dos eucaliptos, pois essas árvores são, na maioria das vezes, tolerantes à acidez (NEVES, 1982). Por outro lado, os baixos teores de fósforo encontrados, consequência da complexa interação deste elemento com o solo, comprometeriam o desenvolvimento de mudas de eucalipto. Latossolos tem alta capacidade de adsorção do ânion fosfato, transformando o fósforo lábil (disponível) em fósforo não lábil (NOVAIS; SMYTH, 1999). Já a ausência de dependência espacial do fósforo pode estar relacionada a práticas de fertilização na área (GEYPENS *et al.*, 1999) ou simplesmente à sua ocorrência natural heterogênea no solo (UMALI *et al.*, 2012). O efeito pepita puro (EFP) para os teores de fósforo, em solos tropicais, também foi verificado por Cherubini *et al.* (2014), Lima *et al.* (2014), Alves *et al.* (2013) e Corá e Beraldo (2006). O EPP reflete um fenômeno que não é completamente conhecido, mas não necessariamente aleatório (LANDIM; YAMAMOTO, 2013).

A CE_a é função, principalmente, da concentração de bases trocáveis no solo (FRIEDMAN, 2005), por isso sua correlação foi forte e positiva com os teores de potássio (K^+), cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}). Resultados semelhantes foram

encontrados na literatura para os teores de potássio (MOTOVALLI *et al.*, 2013), cálcio (MARINHO *et al.*, 2013) e magnésio (MEDEIROS, 2013). A acidez total (H+Al) variou em sentido inverso, pois à medida que as bases trocáveis aumentam e o pH cresce, ocorre neutralização da acidez do solo (BRANDÃO, 2011), o que explica a correlação negativa da CE_a com o teor de alumínio e positiva com o pH. A correlação existente entre a CE_a e o fósforo remanescente (P.rem), é de grande importância uma vez que este parâmetro é utilizado para estimar teor de argila do solo. A correlação positiva entre estas duas variáveis também foi observada por Medeiros (2013), Valente *et al.* (2012) e Bottega (2011).

A ausência de correlação significativa entre a CE_a e a quantidade de argila pode estar relacionada com a baixa CTC do solo e a predominância de argilominerais pouco reativos, ou seja, com baixa área superficial específica total (STOCKMANN *et al.*, 2013; KÄMPF *et al.*, 2012; CHURCHMAN; BURKE, 1991). É importante salientar que, além de depender das características do meio, como o fluido intersticial, porosidade, superfície específica e CTC, a condutividade elétrica do solo depende também da mineralogia das partículas sólidas (WEEMEES, 1990). Por outro lado, a correlação positiva entre a quantidade de silte e a CE_a , também encontrada por Medeiros (2013) e Valente *et al.* (2012), pode estar relacionada à associação de íons do solo às partículas desta fração (GRAHAN, 1940). A fração silte, às vezes definida apenas como sendo “partículas com diâmetro entre 0,05 e 0,002 mm” (GREGORICH *et al.*, 2001), pode exercer importante função nas reações de troca iônica no solo (PEINEMANN *et al.*, 2000; MORRÁS, 1995; MCALEESE; MITCHELL, 1958; MCALEESE; MCCONAGHY, 1957) e, conseqüentemente, influenciar a CE_a .

As áreas de encosta apresentaram menores valores de condutividade elétrica comparados aos de baixadas (correlação negativa). Resultado semelhante foi observado também por Liao *et al.* (2014), Piikki *et al.* (2013) e Guo *et al.* (2012), e vai de encontro ao esperado, visto que solos de encostas tendem a ser mais ácidos e menos férteis (SANTANA, 1986) em virtude da lixiviação iônica. A declividade, como um importante atributo que controla o fluxo de materiais em uma área, é também uma importante característica de controle de processos hidrológicos e geomorfológicos (MANANDHAR, 2014), e por isso pode influenciar a CE_a .

1.5. CONCLUSÃO

Os resultados indicaram que a CE_a possui forte correlação positiva com o pH, teor de água, K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} e CTC efetiva. A quantidade de silte, fósforo e fósforo remanescente exibiram correlação, também positiva, porém moderada. A acidez do solo (Al^{+3} e $H+Al$) apresentou forte relação inversa com a CE_a . Foi verificado também que a CE_a se relacionou, significativamente, com a declividade. Áreas de baixadas apresentaram os maiores valores para a CE_a quando comparadas às encostas. Apesar de não possuir relação com algumas características importantes do solo, como por exemplo, CTC total e teor de argila, a CE_a pode ser considerada uma ferramenta potencial à avaliação da qualidade de solos florestais.

Os mapas interpolados das variáveis estudadas apresentaram correlações significativas com aquele gerado para a CE_a . O que indica também potencial utilização da CE_a na geração de zonas de manejo.

1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, R. G. **Variabilidade espacial de características físico-químicas e a condutividade elétrica aparente do solo sob plantio direto**. Anápolis, 2010, 89p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Goiás, 2010.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DA ABRAF 2013: ano base 2012 Brasília, DF: ABRAF, 2013. Disponível em: <www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>. Acesso em: 20 abr. 2014.

ALLAIRE, S. E.; CAMBOURIS, A. N.; LAFOND, J. A.; LANGE, S. F.; PELLETIER, B.; DUTILLEUL, P. Spatial Variability of Potato Tuber Yield and Plant Nitrogen Uptake Related to Soil Properties. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 3, p. 851-859, 2014.

ALVES, S. M. D. F.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F. D.; QUEIROZ, D. M. D.; VALENTE, D. S. M. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade elétrica e matéria orgânica. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, 2013.

AMAKOR, X. N.; JACOBSON, A. R.; CARDON, G. E.; HAWKS, A. A comparison of salinity measurement methods based on soil saturated pastes. **Geoderma**, v. 219–220, n. 0, p. 32-39, 2014.

BONTEMPS, J.-D.; BOURIAUD, O. Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives. **Forestry**, v. 87, n. 1, p. 109-128, 2014.

BOTTEGA, E. L. **Variabilidade espacial da produtividade de soja e dos atributos do solo em sistema de plantio direto sob rotação de culturas**. 2011. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BRANDÃO, Z. N.; ZONTA J. H.; MEDEIROS J. C.; SANA R. S.; FERREIRA G. B. Condutividade elétrica aparente e sua correlação com o pH em solos no cerrado de Goiás In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. de C. (Ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 51-54

CHAKRAVARTY, S.; GHOSH, S. K.; SURESH, C. P.; DEY A. N.; SHUKLA, G. Deforestation: Causes, Effects and Control Strategies. In: OKIA, C. A. (Ed.). **Global Perspectives on Sustainable Forest Management**, 2013 Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/global-perspectives-on-sustainable-forest-management/deforestation-causes-effects-and-control-strategies>>. Acesso em 04 abr. 2014.

CHATTHA, H. S.; ZAMAN, Q. U.; CHANG, Y. K.; READ, S.; SCHUMANN, A. W.; BREWSTER, G. R.; FAROOQUE, A. A. Variable rate spreader for real-time spot-

application of granular fertilizer in wild blueberry. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.100, n. 0, p. 70-78, 2014.

CHERUBINI, M. R.; EITELWEINI, A. L. S. M. T.; RICARDO, D.; DA ROSII, M. C. O.; DE CASTRO PIASII, O. H.; BERGHETTIII, J. Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio. **Ciência Rural**, v. 44, n. 3, 2014.

CHURCHMAN, G. J.; BURKE, C. M. Properties of sub soils in relation to various measures of surface area and water content. **Journal of Soil Science**, v. 42, n. 3, p. 463-478, 1991.

CLIFFORD, P.; RICHARDSON, S.; HEMON, D. Testing the association between two spatial processes. **Biometrics**, v. 45, p. 123-134, 1989.

COHEN, J.; COHEN, P. **Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences**. Oxford, England: Lawrence Erlbaum, 1975. 490p.

COPPEN, J. J. **Eucalyptus: the genus Eucalyptus**. London: CRC Press, 2002. 464p.

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

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 11-43, 2005.

DUTILLEUL, P. Modifying the t-test for assessing the correlation between two spatial processes. **Biometrics**, v. 49, p. 305-314, 1993.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Multiple-use forest management in the humid tropics: Opportunities and challenges for sustainable forest management. **FAO Forestry Paper**, v. 173, 2013. Disponível em: < <http://www.fao.org/docrep/018/i3378e/i3378e00.htm> >. Acesso em 04 abr. 2014.

FRIEDMAN, S. P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 45-70, 2005.

GARZELLA, T.C.1; MOLIN, J. P. **Calibração em campo de um TDR para determinação de umidade**. 2004. 14 p. – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 2004.

GEYPENS, M.; VANONGEVAL, L.; VOGELS, N.; MEYKENS, J. Spatial variability of agricultural soil fertility parameters in a Gleyic Podzol of Belgium. **Precision Agriculture**, v. 1, n. 3, p. 319-326, 1999.

GIT FORESTRY CONSULTING. **Global *Eucalyptus* Map**. Disponível em: <www.git-forestry.com/downloads/GIT_Forestry_Global_Eucalyptus_Map_2009_Marketing_CaCampai_ENG.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2014.

GRAHAM, E. R. Primary Minerals of the Silt Fraction as Contributors to the Exchangeable-Base Level of Acid Soils. **Soil Science**, v. 49, n. 4, p. 277-282, 1940

GREGORICH, E.G.; TURCHENEK, L. W.; CARTER, M. R.; ANGERS, D. A. **Soil and environmental science dictionary**. Estados Unidos: CRC Press, 2001. 600p.

GUO, W.; MAAS, S.; BRONSON, K. Relationship between cotton yield and soil electrical conductivity, topography, and Landsat imagery. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 678-692, 2012

HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R.; HANCHER, M.; TURUBANOVA, S. A.; TYUKAVINA, A.; THAU, D.; STEHMAN, S. V.; GOETZ, S. J.; LOVELAND, T. R.; KOMMAREDDY, A.; EGOROV, A.; CHINI, L.; JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. **Science**, v. 342, n. 6160, p. 850-853, 2013.

HEIL, K.; SCHMIDHALTER, U. Characterization of soil texture variability using the apparent soil electrical conductivity at a highly variable site. **Computers & Geosciences**, v. 39, n. 0, p. 98-110, 2012.

HERRERO, J.; HUDNALL, W. Measurement of soil salinity using electromagnetic induction in a paddy with a densic pan and shallow water table. **Paddy and Water Environment**, v. 12, n. 1, p. 263-274, 2014.

HOAGLIN, D.C.; MOSTELLER, F; TUKEY, J.W. **Análise exploratória de dados: Técnicas robustas: um guia**. Lisboa: Edições Salamandra, 1992. 446p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAL (INPE). **PRODE**. São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>> . Acesso em: 04 abr. 2014.

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

ISLAM, M. M.; SAEY, T.; DE SMEDT, P.; VAN DE VIJVER, E.; DELEFORTRIE, S.; VAN MEIRVENNE, M. Modeling within field variation of the compaction layer in a paddy rice field using a proximal soil sensing system. **Soil Use and Management**, v. 30, n. 1, p. 99-108, 2014.

KÄMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Mineralogia de solos brasileiros. In: KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; TORRADO-VIDAL, P. **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa: SBCS, 2012, p.207-302.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Revista Geonomos**, v. 5, n. 1, 1997

LANDIM, P. M. B.; YAMAMOTO, J. K. **Geoestatística - Conceitos e Aplicações**. Botucatu, SP: Oficina de Textos, 2013. 216 p.

LIAO, K.-H.; ZHU, Q.; DOOLITTLE, J. Temporal stability of apparent soil electrical conductivity measured by electromagnetic induction techniques. **Journal of Mountain Science**, v. 11, n. 1, p. 98-109, 2014.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. v.61, São Paulo: Ed. USP, 2005. 335 p.

LIMA, G. C.; SILVA, M. L.; DE OLIVEIRA, M. S.; CURI, N.; DA SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. H. Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 18, n. 5, p. 517-526, 2014.

MARINHO, M. D. A.; DAFONTE, J. D.; ARMESTO, M. V.; PAZ-GONZÁLEZ, A.; RAPOSO, J. R. Relationship between apparent soil electrical conductivity (ECa) and soil attributes at an experimental parcel under pasture in a region of Galicia, Spain. **EGU General Assembly Conference Abstracts**, v. 15, 2013.

MANANDHAR, R.; ODEH, I. Interrelationships of Land Use/Cover Change and Topography with Soil Acidity and Salinity as Indicators of Land Degradation. **Land**, v. 3, n. 1, p. 282-299, 2014.

METSON, A. J. Methods of chemical analysis for soil survey samples. **Soil Science**, v. 83, n. 3, p. 245, 1956.

MCALEESE, D. M.; MCCONAGHY, S. Studies on the basaltic soils of Northern Ireland. **Journal of Soil Science**. v. 8, n. 1, p. 135-140, 1957.

MCALEESE, D. M.; MITCHELL, W. A. Studies on the basaltic soils of northern ireland v. cation-exchange capacities and mineralogy of the silt separates (2–20 μ). **Journal of Soil Science**. v. 9, n. 1, p. 81-88, 1958.

MCBRIDE, R. A.; SHRIVE, S. C.; GORDON, A. M. Estimating Forest Soil Quality from Terrain Measurements of Apparent Electrical Conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 1, p. 290-293, 1990.

MEDEIROS, W. N. **Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica aparente do solo obtida por sensor portátil de contato direto** 2013. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**, v. 15, n. 12, p. 1417-1422, 1984.

MOLIN, J. P.; FAULIN, G. D. C. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 1, 2013.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. D. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 335-343, 2010.

MORRÁS, H. J. M. Mineralogy and cation exchange capacity of the fine silt fraction in two soils from the southern Chaco Region (Argentina). **Geoderma**, v. 64, n. 3-4, p. 281-295, 1995.

MOTAVALLI, P.; UDAWATTA, R.; BARDHAN, S. Apparent Soil Electrical Conductivity Used to Determine Soil Phosphorus Variability in Poultry Litter-Amended Pastures. **American Journal of Experimental Agriculture**, v. 3, n. 1, 2013.

NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; ANJOS, J. L. Efeito do alumínio em solução nutritiva no crescimento e adsorção de nutrientes por *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**. Viçosa, v.6, p. 1-16, 1982.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.

NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Interpretação de análise química do solo para o crescimento de *Eucalyptus* sp.: níveis críticos de implantação e de manutenção. **Revista Árvore**, Viçosa, 10: 105-11, 1986.

PEINEMANN, N.; AMIOTTI, N. M.; ZALBA, P.; VILLAMIL, M. B.; Effect of Clay Minerals and Organic Matter on the Cation Exchange Capacity of Silt Fractions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v. 163, n. 1, p. 47-52, 2000.

PICK, J. B. **Geographic Information Systems in Business**. Redlands, USA: Idea Group Publisher, 2005. 358 p.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects of Precision Agriculture. In: DONALD, L. S. (Ed.). **Advances in Agronomy: Academic Press**, v. 67, p.1-85. 1999.

PIIKKI, K.; SÖDERSTRÖM, M.; STENBERG, B. Sensor data fusion for topsoil clay mapping. **Geoderma**, v. 199, n. 0, p. 106-116, 2013.

RUIZ, H. A. Dispersão física do solo para análise granulométrica por agitação lenta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 30., 2005, Recife, PE. Anais... Recife: UFRPE, SBSCS, 2005a. 4 p. 1 CD ROM.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila) **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 297-300, 2005b.

SANTANA, J. A. S. **Efeitos de propriedade dos solos na produtividade de duas espécies de eucalipto na região do Médio Rio Doce**. 1989. 117p. (Mestrado em Ciências do Solo). Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SCUDIERO, E.; TEATINI, P.; CORWIN, D. L.; DEIANA, R.; BERTI, A.; MORARI, F. Delineation of site-specific management units in a saline region at the Venice Lagoon margin, Italy, using soil reflectance and apparent electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, n. 0, p. 54-64, 2013.

SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S.; MARQUES DA SILVA, J. Apparent electrical conductivity in dry versus wet soil conditions in a shallow soil. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 1, p. 99-114, 2013.

STOCKMANN, U.; TRIANTAFILIS, J.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. **Mapping soil horizon change in the viticultural region of the Hunter Valley in NSW, Australia, employing a DUALEM-421 induction probe**. 3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing 2013, 2013. p.52.

SUDDUTH, K.; KITCHEN, N.; WIEBOLD, W.; BATCHELOR, W.; BOLLERO, G.; BULLOCK, D.; CLAY, D.; PALM, H.; PIERCE, F.; SCHULER, R. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1, p. 263-283, 2005.

SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; KITCHEN, N. R.; DRUMMOND, S. T. Modeling soil electrical conductivity–depth relationships with data from proximal and penetrating ECa sensors. **Geoderma**, v. 199, p. 12-21, 2013.

SUN, W.; WHELAN, B. M.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Evaluation of a local regression kriging approach for mapping apparent electrical conductivity of soil (ECa) at high resolution. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 2, p. 212-220, 2012.

TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R.; MINASNY, B.; SARMADIAN, F.; MALONE, B. P. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. **Geoderma**, v. 213, n. 0, p. 15-28, 2014.

TAYLOR, J. A.; BATES, T. R. A discussion on the significance associated with Pearson's correlation in precision agriculture studies. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 5, p. 558-564, 2013.

TAYLOR, S.; VEAL, M.; GRIFT, T.; MCDONALD, T.; CORLEY, F. **Precision Forestry: Operational tactics for today and tomorrow**. 25th annual Meeting of the Council of Forest Engineers, 2002. p.16.

TRINDADE, C.; REZENDE, J. L. P.; JACOVINE, L. A. G.; SARTÓRIO, M. L. **Ferramentas da Qualidade: Aplicação na Atividade Florestal**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2007. 159p.

UMALI, B. P.; OLIVER, D. P.; FORRESTER, S.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; HUTSON, J. L.; KOOKANA, R. S.; OSTENDORF, B. The effect of terrain and management on the spatial variability of soil properties in an apple orchard. **CATENA**, v. 93, n. 0, p. 38-48, 2012.

UNITED NATIONS (UN). **World Population Prospects: The 2012 Revision**. United Nations. New York. 2013

UZUMAKI, E. T. **Geoestatística multivariada: Estudo de métodos de predição**. Dissertação (Estatística – Instituto de Matemática, estatística e Ciência da Computação), UNICAMP, 1994. 104p

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. D.; PINTO, F. D. A. D. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 3, p. 173-179, 2012

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties. **Journal of soil science**, v. 43, n. 1, p. 177-192, 1992.

WEEMEES, I. A. **Development of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies**. 1990. Tese (Doutorado). University of British Columbia.

WENNER, F.; UNITED, S. A method of measuring earth resistivity. [Washington, D.C.: U.S. Dept. of Commerce, Bureau of Standards : U.S. Govt. Print. Off., 1916. p.469-478 Disponível em: < <http://catalog.hathitrust.org/Record/009487683>> Acesso em: 04 de abr 2014.

WETTERLIND, J.; PIIKKI, K.; STENBERG, B.; SÖDERSTRÖM, M. Improved predictions of soil texture and soil organic matter content by combining simultaneous in-situ measurements of visible and near infrared reflectance, electrical conductivity and insertion force. **3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing 2013**, 2013. p.196.

YAO, R. J.; YANG, J. S.; GAO, P.; SHAO, H. B.; LIU, G. M.; YU, S. P. Comparison of statistical prediction methods for characterizing the spatial variability of apparent electrical conductivity in coastal salt-affected farmland. **Environmental Earth Sciences**, v. 71, n. 1, p. 233-243, 2014.

ZHANG, H.; ZHENG, J.; DORR, G.; ZHOU, H.; GE, Y. Testing of GPS Accuracy for Precision Forestry Applications. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 1, p. 237-245, 2014.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture—a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 36, n. 2–3, p. 113-132, 2002.

ZHANG, H.; ZHENG, J.; DORR, G.; ZHOU, H.; GE, Y. Testing of GPS Accuracy for Precision Forestry Applications. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 1, p. 237-245, 2014.

ZIMBACK, C. **Análise especial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114p. (Doutorado). Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CAPÍTULO 2

VARIABILIDADE ESPACIAL DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO ANTES E APÓS A COLHEITA FLORESTAL MECANIZADA

RESUMO

A silvicultura de precisão constitui uma forma de manejo florestal onde a variabilidade espacial de fatores da produção é considerada. Neste contexto o manejo de solos à taxa variável tem sido bastante estudado. Porém, ainda não são completamente elucidados métodos precisos e de baixo custo para diagnoses espaciais em solos florestais, como por exemplo, a medição da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a). Neste trabalho procurou-se: i) verificar os efeitos do tráfego de máquinas florestais sobre o padrão espacial da CE_a , e ii) definir o momento adequado para realizar os levantamentos deste atributo em campo. A CE_a foi medida por um sensor portátil, antes e após a colheita florestal mecanizada, em uma área de plantio de *Eucalyptus grandis x urophylla*, no município de Naque, Minas Gerais. Foi verificado que o tráfego de máquinas na área não acarretou grandes alterações no padrão espacial da CE_a . Os mapas interpolados da CE_a antes e após a colheita apresentaram alta correlação. Entretanto, os valores desta variável, observados após a colheita foram substancialmente maiores. Menor dificuldade na aquisição de dados, maior segurança e rapidez no caminharmento, fazem com que os levantamentos da CE_a realizados antes da colheita mecanizada sejam mais vantajosos. Definir o momento apropriado para as medições da CE_a contribui para fomentar e incentivar seu uso na predição de importantes propriedades do solo. Com a consolidação deste método será facilitada a delimitação das zonas de manejo, a avaliação da qualidade dos solos florestais e ainda tornar-se-á viável a aplicação de fertilizantes à taxa variável.

Palavras-chave: Silvicultura de precisão. Colheita florestal. Manejo de solos.

CHAPTER 2

SPATIAL VARIABILITY OF THE SOIL APPARENTE ELECTRICAL CONDUCTIVITY BEFORE AND AFTER TIMBER HARVESTING

ABSTRACT

Precision forestry is a forest management type which takes accounts the spatial variability of production factors. In this context, site specific management has been broadly studied. However, low cost and accurate methods for soil spatial analyses are not completely elucidated, mainly for using in site-specific fertilization. In the work reported here was: i) verified the forestry traffic machines on apparent electrical conductivity (EC_a) spatial pattern, and: ii) define the appropriate moment to perform EC_a measurements. We used a portable EC_a meter before and after the harvesting, in a eucalypt (*Eucalyptus grandis x urophylla*) field, situated in Belo Oriente region, Minas Gerais state, Brazil. It was observed that the machines traffic did not change substantially EC_a spatial pattern. Interpolated maps (before and after harvesting) were highly associated with each other. Nevertheless, EC_a values measured after harvesting were higher than those measured before harvesting. Improvements in GPS receivers, easiness, safeness and fastness in measurements as well as low bark amount, make the EC_a data collection before timber harvesting advantageous. Define the appropriate moment in measuring EC_a contributes to foster and encourage its use to predict important soil properties. EC_a using permits to delineate homogenous management zones, to assess forest soil quality and bring to reality the site-specific fertilization.

Key-words: Precision forestry. Timber harvesting. Soil management.

2.1. INTRODUÇÃO

Os desafios atuais da silvicultura tem conduzido as empresas florestais a incorporar o conceito de “precisão” ao processo de produção de florestas. Na chamada silvicultura de precisão, a tomada de decisões não considera mais a área de produção como uniforme, pois considera as necessidades específicas de subáreas ou a variabilidade espacial de um ou mais fatores da produção. Silvicultura de precisão é definida, ainda, como uma forma de planejamento e condução das atividades e operações do manejo florestal realizado localmente, e tem por objetivo, reduzir desperdícios, aumentar os lucros e manter a qualidade ambiental (TAYLOR *et al.*, 2002).

O manejo de solos localizado tem sido amplamente estudado (DEMATTE *et al.*, 2014; SAPKOTA *et al.*, 2014; PATIL *et al.*, 2013; CÓRDOBA *et al.*, 2013; HAKOJÄRVI *et al.*, 2013; IHO *et al.*, 2012; XIAOLIN *et al.*, 2012; AMIRINEJAD *et al.*, 2011; QUIANG *et al.*, 2011), em virtude tanto da alta nos preços de fertilizantes quanto dos impactos diretos que causa na produtividade e na qualidade do produto. No entanto, o grande desafio desta forma de manejo é determinar a variabilidade espacial de seus atributos químicos e físicos. Além de trabalhosos, os métodos tradicionais de amostragem possuem custo elevado para o uso em silvicultura de precisão, visto que, para representar o padrão espacial de uma variável, é necessário obter grande número de amostras (SERRANO *et al.*, 2013; KING *et al.*, 2005). Uma potencial alternativa é a medição da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a), que relaciona-se fortemente com os atributos químicos e físicos do solo.

Sensores de campo, associados a receptores GPS tem sido substancialmente estudados para mapeamento da CE_a em culturas agrícolas. Esta forma de avaliar a variabilidade espacial das propriedades do solo é simples, de baixo custo e possui alta precisão na avaliação da qualidade dos solos e geração de zonas de manejo (YAO *et al.*, 2014; PERALTA *et al.*, 2013; VALENTE *et al.*, 2012; CORWIN; LESCH, 2003). Porém, a CE_a ainda não é utilizada comercialmente na silvicultura brasileira por escassez de parâmetros de utilização particulares às culturas florestais. Por exemplo, o momento adequado do ciclo de produção florestal para realizar as medições ainda é desconhecido. Alterações nas propriedades do solo, como aquelas em ocasião da colheita mecanizada, poderão influenciar a CE_a .

O desenvolvimento da colheita florestal mecanizada proporcionou consideráveis ganhos técnicos e econômicos à produção de florestas plantadas (MACHADO *et al.*, 2014). Porém, também é responsável por efeitos negativos ao solo, que nem sempre são de fácil identificação, como, por exemplo, a compactação. Os efeitos mais frequentes do tráfego de máquinas são: aumento nas taxas de erosão do solo, principalmente em áreas declivosas; aumento na taxa de mortalidade de mudas e cepas no campo; diminuição da produtividade dos talhões; e o aumento nos custos de preparo do solo (FENNER, 2014). Por não estar associada apenas à porosidade do solo em si, mas também ao tamanho dos poros e a conectividade entre eles (BAI *et al.*, 2013), a CE_a tem, ainda, o potencial para ser utilizada na avaliação da qualidade dos solos após a colheita mecanizada. Avaliações deste tipo são importantes para mitigar os efeitos do tráfego de máquinas, além da possibilidade de direcionar o preparo de solo localizado.

Recentemente, tem sido observados avanços na utilização da CE_a, como por exemplo, no manejo de irrigação (STANLEY *et al.*, 2014), avaliação de propriedades hidropedológicas (LIAO *et al.*, 2014), geração de zonas de manejo (PERALTA; COSTA, 2013), variabilidade espacial do teor de fósforo no solo (MOTOCALLI *et al.*, 2013), entre outras. Isso porque a CE_a torna-se uma maneira precisa para avaliar a qualidade química e física de solos, desde que também seja definida a época apropriada para coleta de dados em campo. Quando melhor compreendido, o uso da CE_a favorece o manejo de solos florestais localizado, aplicado desde o preparo à aplicação de fertilizantes à taxa variável. Assim neste trabalho procurou-se definir a respeito do momento adequado para os levantamentos da CE_a em campo, antes e após a colheita mecanizada, bem como os possíveis efeitos do tráfego de máquinas sobre o seu padrão espacial em um plantio de eucalipto.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Área de estudo

O trabalho foi realizado no município de Naque, Minas Gerais em um plantio clonal de eucalipto híbrido (*Eucalyptus. grandis* Hill. x *Eucalyptus. urophylla* S.T. Blake) de 35 hectares. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, ou tropical com estação seca de inverno. O tipo de solo predominante na região é o Latossolo Vermelho-Amarelo.

2.2.2. Medição da condutividade elétrica

Para a medição da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) foi utilizado o aparelho portátil LandMapper® ERM-02, configurado para medições na camada de 0 a 20 cm de profundidade do solo. Para o georreferenciamento dos pontos amostrais, foi utilizado o *datum* SIRGAS 2000 e o receptor GPS modelo Promark 3 (Magellan MiTAC International Corporation, EUA). O valor médio do PDOP (*Dillution of Precision*) foi igual a dois, enquanto o número de satélites, durante o levantamento, oscilou entre 8 e 12; já para a correção diferencial pós processada, foram utilizados dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, localizada em Belo Horizonte. As medições da umidade do solo foram realizadas com o sensor FieldScout TDR 300 (Spectrum Tchnologies, Aurora, IL).

A CE_a e o teor de água foram obtidos em dois momentos distintos. As primeiras medições ocorreram no dia 23 de outubro de 2013, na condição pré-colheita. Dois dias após a colheita foi realizada a segunda medição, no dia 06 de janeiro de 2014. Em cada momento, foram amostrados 300 e 50 pontos aleatórios para CE_a e e teor de água, respectivamente, ao longo da área estudada.

O sistema de colheita mecanizada adotado pela empresa é conhecido como “sistema de toras curtas”, ou *cut to length*. As operações de corte, descascamento e traçamento das árvores foram realizadas por um *Harvester* de pneu, tração 6x6,

modelo 1270E (Jonh Deere), já o baldeio da madeira foi realizado com um *Forwarder*, modelo 1910E (Jonh Deere), tração 8x8 e com capacidade de carga de 19 toneladas.

2.2.3. Análises estatísticas e geoestatísticas

A análise exploratória dos dados foi realizada a fim de identificar *outliers* (ou seja, unidades amostrais discrepantes) e para conhecer o comportamento das variáveis estudadas, por meio das estimativas da média, desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximo e mínimo (conforme apresentado no Capítulo 01).

A dependência espacial da CE_a foi quantificada utilizando-se semivariogramas (PERALTA; COSTA, 2013). Os semivariogramas foram obtidos pela modelagem das semivariâncias, estimadas para os períodos pré e pós-colheita, sendo a escolha do melhor modelo baseada no coeficiente de determinação (R^2) e na soma de quadrados dos resíduos. Foram estimados o alcance, efeito pepita e patamar a partir dos semivariogramas, e realizado o procedimento da krigagem ordinária. A correlação paramétrica linear de Pearson, pixel a pixel, foi utilizada para comparar os mapas da CE_a antes e após a colheita (SANTI *et al.*, 2013; BALUJA *et al.*, 2012; NEHMDAHL; GREVE, 2001). A significância dos coeficientes de correlação foi corrigida pelo método de Duttileul (1993), conforme sugerido por TAYLOR e BATES (2013), e avaliada pelo teste t de Student a 5% de probabilidade.

2.3. RESULTADOS

Na Tabela 2.1 são apresentados os resultados das estatísticas descritivas para a condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) em ambos períodos. Os valores das médias, mínimos e máximos foram maiores no período pós-colheita. Já o coeficiente de variação, embora classificado como “alto” para ambas as épocas (WARRICK; NIELSEN, 1980), foi 20% maior na condição pré-colheita. O valor médio do teor de água no solo na condição pré-colheita foi de 19,4%, enquanto na condição pós-colheita esse valor foi de 22%. A diferença entre os níveis de umidade do solo foi significativa a 5% de probabilidade, porém, a significância não foi encontrada a 1% de probabilidade pelo teste *t de Student*.

Tabela 2.1. Estatísticas descritivas para a condutividade elétrica aparente do solo de um plantio florestal, em duas épocas distintas (pré e pós-colheita)

	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	CV* (%)
CE_a pré-colheita	0,11	2,10	7,82	1,85	88,20
CE_a pós-colheita	0,31	4,67	15,24	3,42	73,17

*CV – Coeficiente de variação

Os modelos ajustados para os semivariogramas, bem como os parâmetros de ajuste, são apresentados na Tabela 2.2. O modelo esférico foi utilizado na condição pré-colheita e o exponencial na condição pós-colheita. O grau de dependência espacial em ambas as condições foi moderado, de acordo com a classificação proposta por ZIMBACK (2001).

Tabela 2.2. Parâmetros e modelos ajustados para os semivariogramas

CE_a	Modelo	Alcance(m)	Patamar (C_0+C)	EP (C_0)	IDE ($C/C_0 + C$)	Dep. espacial	SQR	R ²
Pré-colheita	Esférico	255	3,453	1,39	0,597	Moderada	0,31	0,91
Pós-colheita	Exponencial	720	12,63	6,08	0,519	Moderada	5,57	0,88

¹ EP –efeito pepita; ² IDE – índice de dependência espacial ³ SQR – soma de quadrado dos resíduos ⁴ R² – coeficiente de determinação

Na Figura 2.1 são apresentados os mapas dos padrões espaciais, interpolados pelo processo da krigagem ordinária, para as duas condições estudadas. O coeficiente de correlação de Pearson, com significância corrigida,

aplicado pixel a pixel em ambos os mapas, foi estimado em 0,82 e significativo a 5% de probabilidade também de acordo com o teste t de Student.

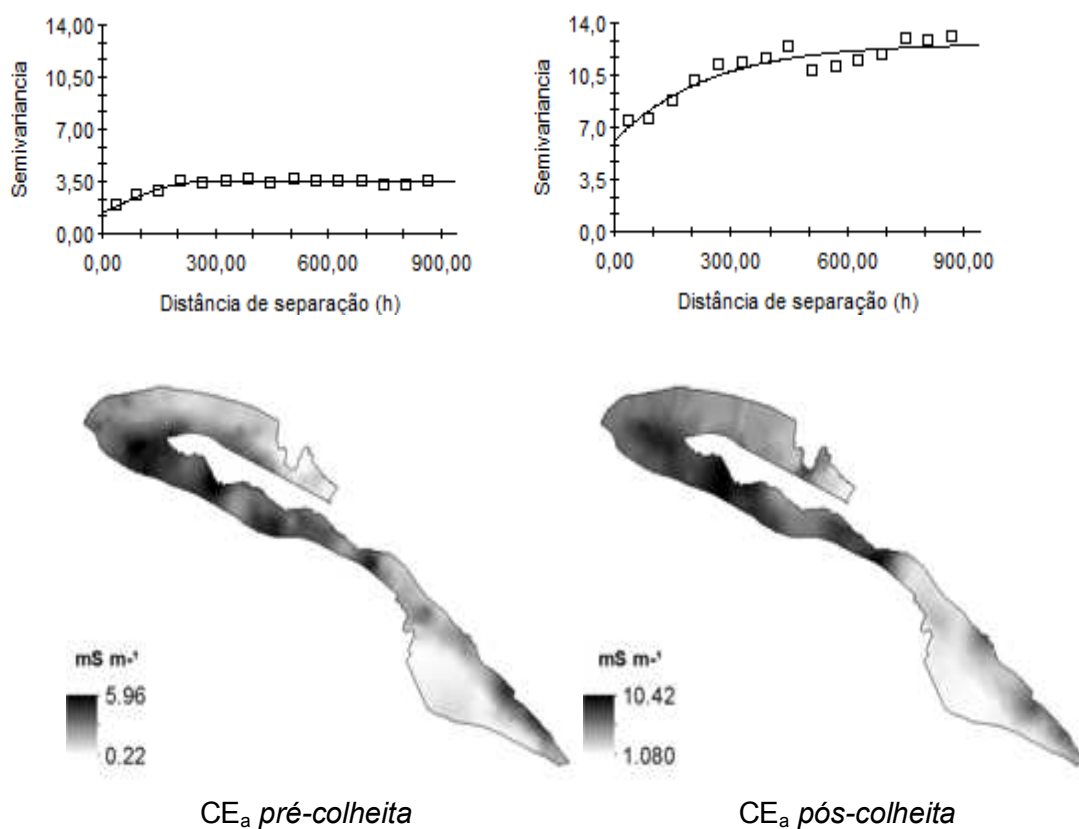


Figura 2.1. Mapas interpolados da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo nas condições pré e pós-colheita, que indicam forte semelhança de padrões espaciais.

2.4. DISCUSSÃO

É possível que os maiores valores (médio, máximo e mínimo) observados para a condutividade elétrica aparente (CE_a) na condição pós-colheita estejam associados ao maior grau de compactação do solo. Geralmente, as máquinas utilizadas na colheita florestal são muito pesadas e, quando combinadas com a movimentação e o levantamento de toras, exercem grandes pressões sobre o solo (SCOPEL *et al.* 1992), levando à compactação e à consequente redução da sua macroporosidade (SOLGI;NAJAFI, 2014; BOTTINELLI *et al.*, 2014; OSMAN, 2014; FREY *et al.*, 2009; GREACEN; SANDS, 1980). Nessa condição, há maior proximidade entre as partículas do solo, o que favorece a transmissão de uma corrente elétrica (BAI *et al.*, 2013). Rhoades *et al.* (1999), por exemplo, verificaram que os valores da CE_a sobre os sulcos deixados pelos pneus de um trator foram substancialmente maiores que àqueles das regiões adjacentes a esses. Determinar o índice de cone confirmaria o efeito da compactação sobre os valores da CE_a .

Apesar de pequena, a diferença de umidade do solo entre as duas avaliações também pode ter contribuído para o aumento da CE_a obtida após a colheita. A umidade é um dos fatores que mais influencia a CE_a (BREVIK *et al.*, 2006; FRIEDMAN, 2005), em virtude da presença de eletrólitos que estão dissolvidos na solução do solo (MOLIN; FAULIN, 2013). É possível verificar com frequência na literatura que quanto maior a quantidade de água no solo maior é a CE_a (STANLEY *et al.*, 2014; MEDEIROS, 2013; SERRANO, 2013; ISLAM *et al.*, 2012).

Uma terceira possibilidade para explicar os valores elevados da CE_a na condição pós-colheita, porém a longo prazo, é a grande quantidade de resíduos, principalmente de casca dos eucaliptos, presente na área – estima-se de 7 a 10 toneladas de casca por hectare (NEVES, 2000). No sistema de colheita florestal mecanizada denominado “sistemas de toras curtas” a madeira é descascada pelos *Harvesters* e a casca é deixada no campo para proteção física do solo, redução de custos com transporte e diminuição da exportação de nutrientes (MACHADO, 2014). Sabe-se que a maior parte dos minerais presentes nos eucaliptos adultos encontra-se na casca, podendo essa quantidade exceder até 10 vezes àquela presente na madeira (ANDRADE *et al.*, 2011). Nas condições de coleta deste trabalho é pouco provável que o acúmulo no solo de minerais dessa natureza tenha elevado os

valores da CE_a visto que a transferência de nutrientes para o solo não ocorre de maneira instantânea (MIRANDA *et al.*, 2002).

Apesar do aumento nos valores da CE_a após a colheita, o seu padrão espacial foi semelhante àquele observado antes da colheita, visto que a correlação entre os mapas foi forte e significativa. A estimativa do alcance indica a magnitude da dependência espacial de uma variável. A CE_a pós-colheita exibiu maior alcance, logo possui maior homogeneidade espacial que a CE_a pré-colheita. Schaffrath *et al.* (2008) e Souza *et al.* (2001) também verificaram maior alcance para condições em que o solo está mais denso, porém Fidalski *et al.* (2006) não encontraram diferença entre o alcance e a densidade do solo. O padrão espacial da CE_a é influenciado principalmente por atributos estáveis do solo, como textura e CTC, além da estrutura do subsolo (SERRANO *et al.*, 2013; ISLAM *et al.*, 2012; FARAHANI; BUCHLEITER, 2004; EIGENBERG *et al.*, 2002), e por isso tende a apresentar estabilidade temporal (LIAO *et al.*, 2014, MEDEIROS, 2013). Em função da semelhança entre os mapas da variabilidade espacial, o momento mais adequado para a realização do levantamento da CE_a deve considerar fatores como facilidade de caminhamento na área e o grau de dificuldade na utilização do sensor.

A copa das árvores interfere no sinal GPS (LIU; BRANTIGAN, 1996) o que não necessariamente impede a sua utilização sob o dossel da floresta (MAGELLAN, 2007), como na condição pré-colheita. Técnicas como correção diferencial aumentam a precisão do posicionamento em condição de floresta (ZHANG *et al.*, 2014; DROSOS; MALESIO, 2012; HASEGAWA; YOSHIMURA, 2003; SAWAGUCHI *et al.* 2003; SATIRAPOD *et al.*, 2003; TIBERIUS; KENSELAAR, 2003). Porém, é evidente que após a colheita o erro de posicionamento será menor (PDOP baixo) uma vez que as interferências ao sinal GPS são substancialmente menores em uma área descampada. Por outro lado, o caminhamento na área e a utilização do sensor de CE_a , após a colheita, foi dificultado pela forte presença de resíduos no solo, como por exemplo, galhos de maiores diâmetros. Já na condição pré-colheita, a profunda camada de serapilheira (folhas senescentes e pequenos galhos) também dificultou as medições. No entanto, a sua retirada, nos pontos amostrais, para que os eletrodos do sensor estivessem em contato com o solo, ocorreu de maneira fácil, rápida e segura. Dessa forma o momento mais adequado para os levantamentos da CE_a foi considerado como antes da colheita

2.5. CONCLUSÃO

Os mapas interpolados, para a CE_a , antes e após a colheita estão fortemente correlacionados, o que proporcionará semelhanças entre possíveis zonas de manejo geradas. Entretanto, foi verificado que os valores da CE_a foram maiores na condição pós-colheita, o que pode ser resultado tanto da compactação do solo, quanto ao pequeno acréscimo no valor médio da umidade do solo.

Apesar do erro de posicionamento ser menor na condição pós-colheita, a dificuldade de caminhar na área, neste período, é maior. A maior facilidade e agilidade na coleta de dados tornam os levantamentos antes da colheita mais adequados. Definir o momento apropriado para as medições da CE_a , contribui para fomentar o uso desta variável na geração de zonas de manejo, avaliação da qualidade de solos florestais e ainda favorecer a aplicação de fertilizantes à taxa variável.

2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIRINEJAD, A. A.; KAMBLE, K.; AGGARWAL, P.; CHAKRABORTY, D.; PRADHAN, S.; MITTAL, R. B. Assessment and mapping of spatial variation of soil physical health in a farm. **Geoderma**, v. 160, n. 3–4, p. 292-303, 2011

ANDRADE, M. C. N. D.; MINHONI, M. T. D. A.; SANSÍGOLO, C. A.; ZIED, D. C.; SALES-CAMPOS, C. Estudo comparativo da constituição nutricional da madeira e casca de espécies e clones de Eucalipto visando o cultivo de Shiitake em toras. **Revista Árvore**, v. 35, p. 183-192, 2011.

BAI, W.; KONG, L.; GUO, A. Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 5, n. 5, p. 406-411, 2013

BALUJA, J.; DIAGO, M. P.; GOOVAERTS, P.; TARDAGUILA, J. Assessment of the spatial variability of anthocyanins in grapes using a fluorescence sensor: relationships with vine vigour and yield. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 4, p. 457-472, 2012.

BOTTINELLI, N.; HALLAIRE, V.; GOUTAL, N.; BONNAUD, P.; RANGER, J. Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. **Geoderma**, v. 217–218, n. 0, p. 10-17, 2014

BREVIK, E.; FENTON, T.; LAZARI, A. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. **Precision Agriculture**, v. 7, n. 6, p. 393-404, 2006/12/01 2006.

CÓRDOBA, M.; BRUNO, C.; COSTA, J.; BALZARINI, M. Subfield management class delineation using cluster analysis from spatial principal components of soil variables. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 97, p. 6-14, 2013

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003

DEMATTE, J. A. M.; DEMATTE, J. L. I.; ALVES, E. R.; NEGRÃO, R.; MORELLI, J. L. Precision agriculture for sugarcane management: a strategy applied for Brazilian conditions. **Acta Scientiarum - Agronomy**, Maringa, v. 36, n. 1, p. 111-117, 2014.

DROSOS, V. C.; MALESIOS, C. Measuring the Accuracy and Precision of the Garmin GPS Positioning in Forested Areas: A Case Study in Taxiarchis-Vrastama University Forest. **Journal of Environmental Science and Engineering**, v. 1, n. 4, p. 566-576, 2012

DUTILLEUL, P. Modifying the t-test for assessing the correlation between two spatial processes. **Biometrics**, v. 49, p. 305-314, 1993.

EIGENBERG, R. A.; DORAN, J. W.; NIENABER, J. A.; FERGUSON, R. B.; WOODBURY, B. L. Electrical conductivity monitoring of soil condition and available N with animal manure and a cover crop. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 88, n. 2, p. 183-193, 2002.

FARAHANI, H.; BUCHLEITER, G. Temporal stability of soil electrical conductivity in irrigated sandy fields in Colorado. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 1, p. 79-90, 2004.

FENNER, P. T. Compactação do solo. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita Florestal**. Viçosa: Editora UFV, 2014. cap. 13, p.543.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e da taxa de estratificação de carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho eutroférico. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1773-1779, 2006.

FREY, B.; KREMER, J.; RÜDT, A.; SCIACCA, S.; MATTHIES, D.; LÜSCHER, P. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. **European Journal of Soil Biology**, v. 45, n. 4, p. 312-320, 2009

FRIEDMAN, S. P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3, p. 45-70, 2005

GREACEN, E.; SANDS, R. Compaction of forest soils. A review. **Soil Research**, v. 18, n. 2, p. 163-189, 1980.

HAKOJÄRVI, M.; HAUTALA, M.; RISTOLAINEN, A.; ALAKUKKU, L. Yield variation of spring cereals in relation to selected soil physical properties on three clay soil fields. **European Journal of Agronomy**, v. 49, p. 1-11, 2013.

HASEGAWA, H.; YOSHIMURA, T. Application of dual-frequency GPS receivers for static surveying under tree canopies. **Journal of Forest Research**, v. 8, n. 2, p. 103-110, 2003.

IHO, A.; LAUKKANEN, M. Precision phosphorus management and agricultural phosphorus loading. **Ecological Economics**, v. 77, n. 0, p. 91-102, 2012.

ISLAM, M.; MEERSCHMAN, E.; SAEY, T.; SMEDT, P.; VIJVER, E.; MEIRVENNE, M. Comparing apparent electrical conductivity measurements on a paddy field under flooded and drained conditions. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 384-392, 2012

KING, J. A.; DAMPNEY, P. M. R.; LARK, R. M.; WHEELER, H. C.; BRADLEY, R. I.; MAYR, T. R. Mapping Potential Crop Management Zones within Fields: Use of Yield-map Series and Patterns of Soil Physical Properties Identified by Electromagnetic Induction Sensing. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 2, p. 167-181, 2005.

LIAO, K.-H.; ZHU, Q.; DOOLITTLE, J. Temporal stability of apparent soil electrical conductivity measured by electromagnetic induction techniques. **Journal of Mountain Science**, v. 11, n. 1, p. 98-109, 2014.

LIU, C.; BRANTIGAN, R. Using differential GPS for forest traverse surveys. **Canadian journal of forest research**, v. 25, n. 11, p. 1795-1805, 1995.

MACHADO, L. R. **Dimensionamento de sistema de corte, carregamento e transporte do eucalipto**. 2014. 69p. Dissertação (Mestrado em Agronegócio). Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo.

MAGELLAN NAVIGATION S.A.S. **Reference Manual** France: Carquefou Cedex, 2007.

MEDEIROS, W. N. **Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica aparente do solo obtida por sensor portátil de contato direto**. 2013. 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MIRANDA, G.; SILVA, M.; LEITE, H.; MACHADO, C. Estimativa do custo de reposição dos nutrientes exportados pela colheita da casca da madeira em povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 26, p. 149-154, 2002.

MOLIN, J. P.; FAULIN, G. D. C. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 1, 2013.

NEHMDAHL, H., AND M. H. GREVE. 2001. Using soil electrical conductivity measurements for delineating management zones on highly variable soils in Denmark. In: **Third European Conference on Precision Agriculture**, 1:461-464. Montpellier, France: Agro Montpellier.

NEVES, J. C. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo**. 2000. 191p. (Tese de Doutorado). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ

OSMAN, K. Physical Deterioration of Soil. In: (Ed.). **Soil Degradation, Conservation and Remediation**: Springer Netherlands, 2014. cap. 2, p.45-67

PATIL, V. C.; NADAGOUDA, B. T.; AL-GAADI, K. A. Spatial Variability and Precision Nutrient Management in Sugarcane. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 41, n. 1, p. 183-189, 2013.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 218-226, 2013.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L.; BALZARINI, M.; ANGELINI, H. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 93, n. 2, p. 205-218, 2013.

QIANG, L.; JIHENG, Z.; YIYANG, Z.; WENFANG, T.; ZHENGYAN, Z.; YAN, X.; XIAOYING, L. Study on Spatial Distribution of Soil Available Microelement in Qujing Tobacco Farming Area, China. **Procedia Environmental Sciences**, v. 10, Part A, n. 0, p. 185-191, 2011.

RHOADES, J. D.; CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. **Geophysical Monograph Series**, v. 108, p. 197-215, 1999

SANTI, A. L.; AMADO, T. J.; EITELWEIN, M. T.; CHERUBIN, M. R.; DA SILVA, R. F.; DA ROS, C. O. Definição de zonas de produtividade em áreas manejadas com agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 510-515, 2013.

SAPKOTA, T. B.; MAJUMDAR, K.; JAT, M. L.; KUMAR, A.; BISHNOI, D. K.; MCDONALD, A. J.; PAMPOLINO, M. Precision nutrient management in conservation agriculture based wheat production of Northwest India: Profitability, nutrient use efficiency and environmental footprint. **Field Crops Research**, v. 155, n. 0, p. 233-244, 2014.

SATIRAPOD, C.; WANG, J.; RIZOS, C. Comparing different global positioning system data processing techniques for modeling residual systematic errors. **Journal of Survey in Engineer**, v. 129, n. 4, p. 129-135, 2003.

SAWAGUCHI, I.; NISHIDA, K.; SHISHIUCHI, M.; TATSUKAWA, S. Positioning precision and sampling number of DGPS under forest canopies. **Journal of Forest Research**, v. 8, n. 2, p. 133-137, 2003.

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**, v. 32, p. 1369-1377, 2008.

SCOPEL, I. **Riscos de compactação do solo na produção florestal**. 7º Curso de Atualização sobre Sistemas de Exploração e Transporte Florestal, 1992. Curitiba. Anais, FUPEF. p.172-193.

SERRANO, J. M.; SHAHIDIAN, S.; MARQUES DA SILVA, J. R. Apparent electrical conductivity in dry versus wet soil conditions in a shallow soil. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 1, p. 99-114, 2013.

SOLGI, A.; NAJAFI, A. The impacts of ground-based logging equipment on forest soil. **Journal of Forest Science**, v. 60, n. 1, p. 28-34, 2014.

SOUZA, Z.; SILVA, M.; GUIMARÃES, G.; CAMPOS, D.; CARVALHO, M.; PEREIRA, G. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Bras. Ci. Solo**, v. 25, p. 699-707, 2001.

STANLEY, J. N.; LAMB, D. W.; FALZON, G.; SCHNEIDER, D. Apparent electrical conductivity (ECa) as a surrogate for neutron probe counts to measure soil moisture content in heavy clay soils (Vertosols). **Soil Research**, v. 54, n. 4, p. 373-378, 2014.

TAYLOR, J. A.; BATES, T. R. A discussion on the significance associated with Pearson's correlation in precision agriculture studies. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 5, p. 558-564, 2013.

TIBERIUS, C.; KENSELAAR, F. Variance component estimation and precise GPS positioning: Case study. **Journal of Survey in Engineer**, v. 129, n. 1, p. 11-18, 2003.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. D.; PINTO, F. A. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 3, p. 173-179, 2012

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soil physics**. New York: Academic Press, 1980.

XIAOLIN, L.; LINNAN, Y.; LIN, P.; WENGFENG, L.; LIMIN, Z. County Soil Fertility Information Management System Based on Embedded GIS. **Procedia Engineering**, v. 29, n. 0, p. 2388-2392, 2012

YAO, R. J.; YANG, J. S.; GAO, P.; SHAO, H. B.; LIU, G. M.; YU, S. P. Comparison of statistical prediction methods for characterizing the spatial variability of apparent electrical conductivity in coastal salt-affected farmland. **Environmental Earth Sciences**, v. 71, n. 1, p. 233-243, 2014

ZHANG, H.; ZHENG, J.; DORR, G.; ZHOU, H.; GE, Y. Testing of GPS Accuracy for Precision Forestry Applications. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 1, p. 237-245, 2014

ZIMBACK, C. **Análise especial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114p. (Doutorado). Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CAPÍTULO 3

DEFINIÇÃO DE ZONAS DE MANEJO PARA UM PLANTIO DE *Eucalyptus grandis* x *urophylla*, A PARTIR DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE, UMIDADE E TEOR DE ARGILA DO SOLO.

RESUMO

Zonas ou unidades de manejo (ZM) são uma opção para as práticas da silvicultura de precisão, na qual decisões relacionadas à aplicação de insumos são aprimoradas. Sua função é melhor atender as demandas do solo e da cultura, de acordo com a variabilidade espacial no campo. Entre os benefícios trazidos por essa opção de manejo, destacam-se a otimização do sequestro de carbono, economia de insumos, maior acurácia na amostragem de solos, redução de impactos ambientais negativos, redução de custos na manutenção de parcelas de inventário florestal contínuo e melhor alocação de materiais genéticos e condução de testes clonais. A condutividade elétrica aparente do solo tem sido amplamente utilizada para definição de ZM por representar um método rápido, de baixo custo e estar relacionada a várias propriedades do solo. Quando a CE_a é combinada com outros fatores, como teor de água e argila do solo, que possuem alta relação com a produtividade e são de simples determinação, espera-se que as zonas de manejo sejam mais precisas. O objetivo deste trabalho foi definir e avaliar a qualidade de zonas de manejo com base na CE_a , teor de água e quantidade de argila em uma área de produção de eucalipto, na região leste de Minas Gerais. As ZM's, definidas pelo algoritmo *fuzzy k-means*, representaram, de maneira satisfatória, importantes propriedades do solo (CTC, acidez, K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , P remanescente). O Índice de Performance Fuzzy e a Entropia da Partição Modificada indicaram que o número ideal de ZM's deveria ser igual a dois. Pelo teste t de Student, foi possível identificar diferenças significativas entre as médias de todas as variáveis estudadas entre as duas zonas de manejo, com exceção do teor de fósforo. Estes resultados sugerem que a combinação entre CE_a e os teores de água e argila do solo possui forte potencial para ser utilizada na geração de ZM's, aprimorando o manejo de solos florestais.

Palavras-chave: Silvicultura de precisão. Fuzzy k-means. Eucalipto

CHAPTER 3

DELINEATION OF SITE-SPECIFIC MANAGEMENT ZONES FOR *Eucalyptus grandis* x *urophylla* PLANTATION BY APPARENTE ELECTRICAL CONDUCTIVITY, SOIL WETNESS AND CLAY CONTENT

ABSTRACT

Management zones (MZ) represent a model of precision forestry, which decisions about agricultural inputs and other silviculture practices are improved to better meet the soil and culture demand, considering field spatial variability. The benefits associated with this model are optimization in carbon sequestration, resource savings, better accuracy in soil sampling, reduction of negative environments impacts, cost reduction to maintain continuous forestry inventory parcels and better allocation of different genetic materials. The soil apparent electrical conductivity (EC_a) has been largely used to delineation of MZ's because this soil property is strongly associated with other soil attributes, and furthermore the method is fast and low cost. When EC_a is combined with other factors such soil wetness, clay content, which has high relation with the yield and are easy to measure, it is hoped that MZ become more precise. The objectives of the present work were define and assess the quality of MZ based on EC_a , soil wetness and clay content in an eucalyptus field, in east region of Minas Gerais, Brazil. The MZ's, defined by fuzzy k-means algorithm, represented, satisfactorily, important soil properties (CEC, soil acidity, K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} and phosphorous remaining). The fuzziness performance index fuzzy and modified partition entropy index indicated the ideal number of MZ's as two. The Student's test indentified significant differences between the averages of all variables studied within the two classes, exception for the level of phosphorous. The results suggested that the combination of EC_a with soil wetness and clay content has strong potential for its use to delineate MZ's, and hence improve forestry soil management.

Key-words: Precision forestry. Fuzzy k-means. Eucalyptus.

3.1. INTRODUÇÃO

Reduzir o aquecimento global é um dos grandes desafios da atualidade, de forma que seus efeitos têm sido objeto de discussão e pesquisas em todo o mundo. Estima-se, por exemplo, que até 2050 haverá um aumento de 257% na mortalidade de idosos devido aos efeitos da elevação da temperatura média do planeta (HAJAT *et al.*, 2014). Mudanças climáticas globais podem, ainda, retardar ou reverter o progresso já obtido em direção a um mundo sem fome, por seus impactos negativos à agricultura (WHEELER; VON-BRAUN, 2013). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013), ações imediatas são necessárias para mitigar as mudanças no clima da Terra. Dentre as possíveis medidas, destaca-se a ampliação das áreas de florestas plantadas, tais como as compostas por espécies do gênero *Eucalyptus*.

Durante o crescimento, as árvores absorvem o gás carbônico (CO₂) atmosférico, principal agravante do efeito estufa, e armazenam o carbono em sua biomassa (SILVEIRA *et al.*, 2008). Florestas de eucalipto apresentam vantagens no chamado sequestro de carbono, uma vez que as árvores são de rápido crescimento e podem atingir altos níveis de produtividade em regiões tropicais. Por exemplo, um plantio de eucalipto na região de Viçosa, Minas Gerais, pode absorver cerca de 10,46 toneladas de carbono por hectare/ano (BRIANEZI, 2014). Quando são consideradas as diferentes capacidades produtivas ao longo de uma determinada área, ainda é possível otimizar o ciclo do plantio, de maneira a obter maior volume de madeira e estoque de carbono (SILVA, 2008).

Normalmente, os solos apresentam alta variabilidade espacial, devido a existência de muitos processos físicos, químicos e biológicos agindo, simultaneamente, em diferentes intensidades (MORAL *et al.*, 2010). Assim, o manejo de solo que não considera tais variações espaciais não é tido como o mais eficiente. Zonas ou unidades de manejo representam uma forma de agricultura de precisão, na qual decisões sobre a aplicação de insumos e outras práticas agronômicas são aprimoradas para melhor atender as demandas do solo e da cultura, de acordo com as variações existentes no campo (PERALTA *et al.*, 2013). Entre os benefícios trazidos por essas, estão: possibilidade de maximizar a produtividade; economia de insumos; maior acurácia na amostragem de solos; maior

qualidade do produto; e redução de impactos ambientais negativos (CORWIN *et al.*, 2003; WHELAN; MCBRATNEY, 2000). Especificamente, para as culturas florestais, as zonas de manejo proporcionam ainda, melhor alocação de clones específicos (XAVIER; SILVA, 2010), redução de custos no inventário florestal contínuo e a possibilidade de otimização da absorção de gás carbônico (BOGNOLA *et al.*, 2010), já mencionada.

Muitas vezes, a delimitação de zonas de manejo (ZM) em plantios florestais é realizada de maneira empírica, considerando, por exemplo, apenas a declividade da área. Apesar de possuir baixo custo, esse método, pode não representar da melhor maneira a variabilidade espacial da fertilidade do solo. Porém, o método tradicional de amostragem de solos é oneroso e requer grande quantidade de mão-de-obra – o que inviabiliza seu uso para a definição de zonas de manejo, pois é necessário grande número de amostras a fim de obter-se boa representação das propriedades do solo (PERALTA *et al.*, 2013). A medição da condutividade elétrica aparente (CE_a) é uma tecnologia eficiente de sensoriamento terrestre, muito utilizada para a geração de ZM's (SALEH *et al.*, 2014; TAGHIZADEH-MEHRJARDI *et al.*, 2014; ALVES *et al.*, 2013; DE BENEDETTO *et al.*, 2013; CÓRDOBA *et al.*, 2013; PERALTA *et al.*, 2013; PERALTA; COSTA, 2013; SCUDIERO *et al.*, 2013; VALENTE *et al.*, 2012; CORWIN; LESH, 2003). A CE_a do solo pode ser obtida de maneira relativamente fácil, com baixo custo, e geralmente está associada a várias propriedades químicas e físicas do solo (HUANG *et al.*, 2014; SUDDUTH *et al.*, 2005). Quando esta variável é combinada com outros fatores, que também se correlacionam bem com as características do solo (por exemplo, teores de água e argila), é esperado que haja melhor representatividade das zonas de manejo geradas (VALENTE, 2010; KITCHEN *et al.*, 2005).

O teor de água do solo é de grande importância para a produção vegetal. No processo de absorção de nutrientes, a água do solo é, provavelmente, o fator de maior influência; além disso, sua escassez ou excesso afeta, de maneira significativa, o crescimento das plantas (MEURER, 2007). Embora a umidade do solo normalmente tenha flutuações ao longo do tempo (JOHNSON *et al.*, 2003), sua utilização para a geração de ZM em plantios de eucalipto justifica-se por sua forte relação com a produtividade, pela longa duração das rotações desta cultura e pela simplicidade de aquisição de dados por sensores portáteis. Outro atributo importante

a se considerar no manejo e uso dos solos é a quantidade de argila (TRIANAFILIS; LESCH, 2005), que afeta propriedades estruturais, hidrológicas, e também a disponibilidade de nutrientes no solo. Mapas de alta resolução do conteúdo de argila podem ainda ser utilizados como *input* para diferentes aplicações na agricultura de precisão (PIIKKI *et al.*, 2013), entre as quais destaca-se a geração de zonas de manejo (SALEH; BELAL, 2014). O objetivo deste trabalho foi definir e avaliar a qualidade de zonas de manejo para plantios de eucalipto, baseadas em atributos bem relacionados com a produção, mas que possuísem baixo custo de determinação – a CE_a e os teores de água e de argila do solo.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Área de estudo e coleta de dados

O trabalho foi realizado no município de Naque, Minas Gerais, em uma área de, aproximadamente, 35 ha destinada ao plantio clonal da espécie híbrida *Eucalyptus grandis x urophylla*, (779857.00 m E, 7878412.00 m S, zona 23S). O solo da região foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo.

Coletou-se 150 amostras compostas de solo, que foram encaminhadas ao laboratório de análises de rotina da Universidade Federal de Viçosa para determinação das características químicas (K^+ , P, P.rem, Ca^{+2} , Mg^{+2} , pH, CTC e Al^{+3}) e físicas (percentual de argila, silte, areia fina e areia grossa). Cada uma das amostras, obtidas na camada de 0 a 20 cm do perfil do solo com o auxílio de um trado motorizado, foram compostas por quatro amostras simples, retiradas em um raio de até dois metros do ponto georreferenciado. A condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) foi medida com o sensor portátil LandMapper ERM 02 (LandViser ®) em 150 pontos aleatórios, distribuídos ao longo da área. O sensor também foi configurado para medições na camada de 0 a 20 cm de profundidade do solo. O teor de água do solo, também medido em 150 pontos, foi obtido pelo sensor portátil TDR 300 (*Spectrum Technologies, Inc.*, Plainfield, Illinois, USA), devidamente calibrado (SPECTRUM, 2014).

O georreferenciamento da área e dos pontos amostrais foi efetuado por meio do receptor GPS modelo PROMARK 3 (Magellan ®). A correção diferencial pós-processada foi executada utilizando-se a base de dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), localizada em Belo Horizonte.

3.2.2. Análises geoestatísticas e krigagem

Os dados coletados em campo e os resultados das análises em laboratório foram utilizados para a modelagem de semivariogramas isotrópicos. A escolha do melhor modelo ajustado foi feita com base no coeficiente de determinação (R^2) e na soma de quadrado de resíduos (SQR). O processo de interpolação utilizado para a geração dos mapas de variabilidade espacial foi a krigagem ordinária, com um tamanho de pixel de 5 x 5 metros conforme também utilizado por Valente, (2010). A distância máxima de busca e a distância de separação entre os pares de pontos para interpolação foram consideradas empiricamente como sendo de 900 e 60 metros, respectivamente. A validação cruzada para a krigagem foi realizada e os gráficos apresentados na seção de apêndices.

3.2.3. Definição das zonas de manejo (ZM)

Os valores de pixel nos mapas interpolados foram utilizados como dados de entrada no algoritmo *fuzzy k-means* input para a geração das zonas de manejo. O primeiro mapa de zonas de manejo obtido baseou-se na condutividade elétrica do solo, teor de água e quantidade de argila (ZM_01), em seguida, outros dezesseis mapas de ZM's (apresentados na seção apêndice), foram gerados para cada um dos outros atributos do solo a fim de validar a ZM_01.

As zonas de manejo, para cada atributo do solo, foram geradas pelo software gratuito Management Zones Analysts (MZA), baseado no algoritmo *fuzzy k-means* (FRIDGEN *et al.*, 2004), que utiliza a distância euclidiana para o cálculo da proximidade entre as amostras (VALENTE, 2012). Na implementação deste algoritmo, foi considerado um número máximo de 100 iterações, coeficiente *fuzzy* igual a 2 e a normalização dos valores para média, igual a zero, além do desvio-padrão igual a 1. O Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia da Partição Modificada (MPE) foram utilizados na definição do número ideal de ZM's ou classes de manejo (SUN *et al.*, 2012). O FPI é uma medida do grau de separação dos constituintes das diferentes classes, já o MPE estima o grau de desorganização

criado por um determinado número de classes. Ambos os índices podem variar entre zero e um. Valores próximos de zero indicam maior distinção entre as classes, enquanto valores próximos a um indicam classes indistintas. Dessa forma, o número ótimo de classes ocorre quando os dois índices são minimizados (SONG *et al.*, 2009; FRIDGEN *et al.*, 2004).

A avaliação da qualidade da ZM_01 (ou seja, o quanto ela concorda com as zonas de manejo dos atributos individuais do solo) foi realizada utilizando-se o coeficiente Kappa (Equação 3.1), proposto por Cohen (1968), aplicado aos pixels dos mapas de zonas de manejo. As propriedades do solo foram consideradas como sendo a “verdade de campo” e a ZM_01 o classificador (VALENTE, 2012). O maior coeficiente Kappa entre duas classificações ocorre quando a concordância é maximizada (KITCHEN *et al.*, 2005). Os seus valores foram classificados em “Péssimo” (menor ou igual a 0), “Ruim” (entre 0 e 0,20), “Razoável” (entre 0,20 e 0,40), “Bom” (entre 0,40 e 0,60); “Muito bom” (entre 0,60 e 0,80), e “Excelente” (superior a 0,80) (LANDIS; KOCH, 1977). O teste Z, com 5% de probabilidade, foi realizado para verificar a significância da classificação.

$$\hat{K} = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k x_{i\oplus} \cdot x_{\oplus i}}{N^2 - \sum_{i=1}^k x_{i\oplus} \cdot x_{\oplus i}} \quad (3.1)$$

em que:

- K - Estimativa do coeficiente Kappa;
- x_{ii} - Elemento da matriz de confusão na linha i e coluna i;
- $x_{i\oplus}$ - Somatório dos elementos da linha i da matriz de confusão;
- $x_{\oplus i}$ - Somatório dos elementos da coluna i da matriz de confusão;
- k - Número total de classes; e
- N - Número total de amostras.

3.2.4. Diferenciação das classes da ZM_01 por atributos de interesse

Existe a possibilidade dos atributos do solo não diferirem entre as zonas de manejo, não justificando, nesse caso, a adoção de um manejo diferenciado. Desse modo, foi realizado o teste *t de Student* para comparar as médias dos resultados da análise de solo entre as classes da ZM_01. Amostras próximas às regiões de transição entre zonas foram desconsideradas, e apenas aquelas localizadas no interior das zonas foram consideradas representativas (TAYLOR *et al.*, 2007).

3.3. RESULTADOS

Tanto o Índice de Performace Fuzzy (FPI) quanto a Entropia da Partição Modificada (MPE) sugerem que o número ideal de classes (zonas) seja igual a 2 (Figura 3.1). O mapa com a representação das zonas de manejo a partir da CE_a , umidade e teor de argila do solo é apresentado na Figura 3.2. A área estimada para a Classe 1 foi de 15,4 ha e para a Casse 2, 19,6 ha.

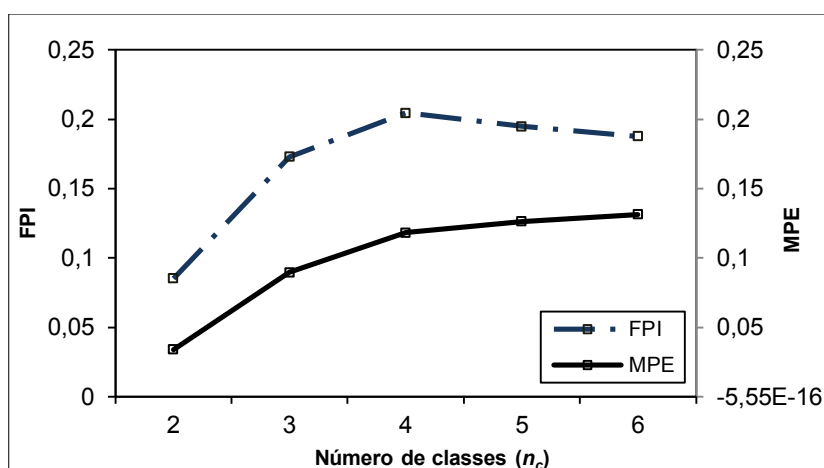


Figura 3.1. Índice de Performace Fuzzy (FPI) e Entropia de Partição Modificada (MPE) para a zona de manejo baseada na CE_a , teor de água e quantidade de argila.

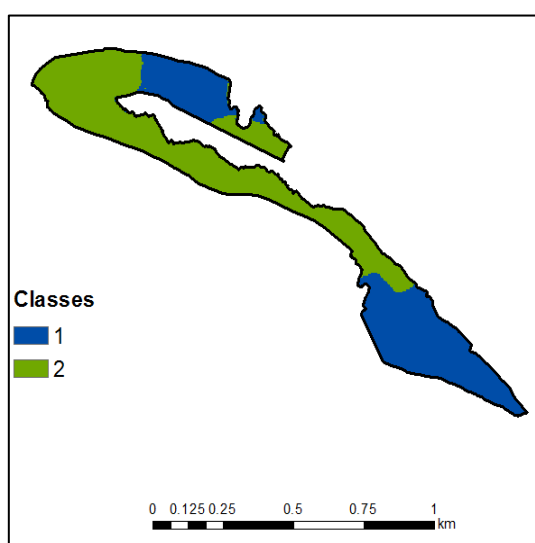


Figura 3.2. Zonas de manejo baseadas na CE_a , teor de água e quantidade de argila (ZM_01), com duas classes, para aplicação de fertilizantes à taxa variável.

Na Tabela 3.1 são apresentados os resultados do teste t entre as médias de cada uma das duas classes além do desvio padrão da média. Foram consideradas 82 amostras para a estimativa das médias na Classe 1 e 55 amostras na estimativa da Classe 2. É possível observar que as médias entre as duas classes diferiram estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade para todas as variáveis analisadas, com exceção do teor de fósforo. A Classe 1 se caracteriza por possuir maior teor de argila e menores quantidades de potássio, cálcio e magnésio, além de menor CTC efetiva, fósforo remanescente e pH, quando comparada à Classe 2. De acordo com os coeficientes Kappa, resumidos na Tabela 3.2, todas as variáveis, exceto teor de fósforo, se relacionaram de maneira satisfatória com a zona de manejo proposta.

Tabela 3.1. Comparação entre as médias dos valores das propriedades químicas e físicas do solo para as duas zonas de manejo propostas.

	Média		Desvio padrão da média	
	ZM 1	ZM 2	ZM 1	ZM 2
P	7,31 ^a	5,07 ^a	12,63	2,20
K ⁺	25,12 ^a	66,40 ^b	23,81	35,03
Ca ⁺²	0,75 ^a	2,22 ^b	0,94	1,13
Mg ⁺²	0,24 ^a	0,54 ^b	0,24	0,24
Al ⁺³	1,10 ^a	0,20 ^b	0,58	0,38
H+AL	6,15 ^a	3,74 ^b	1,64	0,90
SB	1,05 ^a	2,93 ^b	1,23	1,40
CTC Efetiva	2,15 ^a	3,13 ^b	0,82	1,11
CTC Total	7,20 ^a	6,67 ^b	1,18	1,10
V (%)	14,71 ^a	42,35 ^b	16,65	17,48
m (%)	59,11 ^a	12,70 ^b	29,85	25,32
P.rem	21,00 ^a	26,57 ^b	3,78	3,51
Areia Grossa	24,99 ^a	32,54 ^b	7,96	10,12
Areia Fina	8,47 ^a	9,97 ^b	5,09	2,43
Silte	16,51 ^a	28,80 ^b	7,96	8,35
pH	4,74 ^a	5,60 ^b	0,57	0,54

P- fósforo; K- potássio; Ca- cálcio; Mg- magnésio; Al- alumínio; H+Al- acidez total; SB- soma de bases; CTC- capacidade de troca catiônica; V- saturação por bases; m- saturação por alumínio; P.rem; fósforo remanescente; pH- potencial hidrogeniônico; * Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste t a 5% de probabilidade.

Tabela 3.2. Coeficiente Kappa para as classificações das propriedades do solo com a zona de manejo em duas classes.

Atributos do solo	Zona de manejo	
	CE _a + Umidade + Argila	Interpretação do coeficiente Kappa**
pH	0,65*	Muito bom
Fósforo	0,087*	Ruim
Potássio	0,63*	Muito bom
Cálcio	0,63*	Muito bom
Magnésio	0,61*	Muito bom
Alumínio	0,67*	Muito bom
CTC efetiva	0,58*	Bom
CTC total	0,46*	Bom
Fósforo remanescente	0,66*	Muito bom
Areia grossa	0,62*	Muito bom
Areia fina	0,60*	Muito bom
Silte	0,59*	Bom
Acidez total	0,77*	Muito bom
Soma de base	0,62*	Muito bom
Saturação por bases	0,64*	Muito bom
Saturação por Alumínio	0,63*	Muito bom

* Significância ao nível de 5% de probabilidade; ** De acordo com Landis e Koch (1977)

3.4. DISCUSSÃO

A decisão de qual parâmetro utilizar para a definição de zonas de manejo em uma área é uma das tarefas mais árduas quando o assunto é silvicultura de precisão. As características escolhidas devem estar diretamente relacionadas à produção madeireira e, ao mesmo tempo, devem ser de aquisição rápida, simples e precisa, além de possuir baixo custo. Este trabalho demonstrou que a utilização conjunta dos parâmetros condutividade elétrica aparente, teor de água e quantidade de argila do solo resultou em zonas de manejo que retrataram a variabilidade espacial de grande parte das características edáficas.

Apesar de não considerar as informações espaciais do terreno, o algoritmo *fuzzy k-means* utilizado mostrou-se capaz de identificar agrupamentos (*clusters*) na distribuição dos valores obtidos pela krigagem das três variáveis utilizadas, maximizando tanto a homogeneidade de um determinado grupo quanto a heterogeneidade de grupos distintos por meio de uma função de distância. É importante avaliar o número de classes geradas na classificação do algoritmo, o qual deve considerar, além de aspectos técnicos e econômicos, a minimização das estimativas do Índice de Performance Fuzzy (FPI) e Entropia da Partição Modificada (MPE). Neste trabalho, ambas as estimativas foram mínimas para um número de duas classes, resultado igual ao encontrado por Reis *et al.* (2014), Urretavizcaya *et al.* (2014) e Tagarakis *et al.* (2013). Do ponto de vista técnico, o fato dos valores médios, da maioria dos atributos do solo amostrados em campo, terem diferido estatisticamente entre as classes, viabilizaria a adoção de um sistema de aplicação de fertilizantes à taxa variável. No entanto, são necessários mais estudos que considerem outras variáveis, como produtividade, disponibilidade de mão de obra, além de uma análise econômica a fim de consolidar essa forma de manejo.

De acordo com a classificação proposta por Ribeiro *et al.* (1999) para os solos do estado de Minas Gerais, a Classe 1 obtida, possui acidez total (H + Al) “alta”, assim como elevados teores de alumínio trocável e de saturação por alumínio. Já os valores da soma de bases (SB), CTC efetiva e saturação por bases foram classificados como “baixos”, e a CTC total foi considerada “média”. Na Classe 2, por outro lado, a acidez total foi classificada como “média”, o teor de alumínio trocável como “muito baixo” e a saturação por alumínio como “baixa”, enquanto a soma de

bases, CTC efetiva, CTC total e saturação por bases foram classificadas como “média”. Assim, é possível verificar que o solo da Classe 2 é, de certa forma mais rico em nutrientes. A ausência de dependência espacial do fósforo (Capítulo 1) é o motivo dos teores deste elemento não se diferirem significativamente entre as classes. Porém, o valor de fósforo remanescente, diferiu significativamente entre as classes.

As características texturais também foram consideradas estatisticamente distintas entre as classes. Enquanto o solo da Classe 1 apresentou maior média para teor argila, na Classe 2 os valores das frações argila, areia grossa e silte ficaram próximos. Cabe mencionar que a textura é de grande importância para o manejo de solos, pois afeta, por exemplo, a adsorção de fósforo, a lixiviação de nutrientes e as perdas por erosão (CARMO *et al.*, 1990). Métodos como aqueles baseados em espectroscopia tem apresentado avanços, técnicos e econômicos, na determinação do teor de argila do solo (DEBAENE *et al.*, 2014), o que no futuro próximo poderá contribuir ainda mais para utilização desta característica na delimitação de zonas de manejo.

Segundo o critério para a classificação do coeficiente Kappa, proposto por Landis e Koch (1977), a concordância entre a ZM_01 e as zonas de manejo que consideraram os demais atributos do solo, foi classificada como “muito boa”, exceto para CTC efetiva, CTC total e quantidade de silte, que foram classificadas como “boa”, e para o teor de fósforo, como “ruim”. Esse método de avaliação da qualidade de zonas de manejo também foi utilizado por DIACONO *et al.* (2014); COHEN *et al.* (2013); ALVES *et al.* (2013); VALENTE *et al.* (2012); SUSZEK *et al.* (2011); GUASTAFERRO *et al.* (2010); HORNUNG *et al.* (2006); e BOYDELL e MCBRATNEY (2002).

3.5. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho sugerem que a combinação da CE_a com os teores de água e argila do solo possui forte potencial para ser utilizada na geração de zonas de manejo e assim melhorar o manejo de solos florestais. O uso combinado dos mapas interpolados das três variáveis possibilitou a divisão da área em classes que representaram, de maneira satisfatória, a CTC, a acidez e os teores de K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} no solo, além da quantidade de fósforo remanescente (P.rem). O Índice de Performance Fuzzy e a Entropia da Partição Modificada indicaram um número ideal de duas classes para a área estudada.

Houve diferenças significativas entre as médias de todas as variáveis estudadas entre as duas classes, exceto para o teor de fósforo, o que representa dois padrões espaciais de fertilidade distintos. Entretanto, para que seja adotada a aplicação de fertilizantes à taxa variável na área, devem ser realizados mais estudos, principalmente que considerem a combinação de aspectos técnicos econômicos.

3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, S. M. D. F.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F. D.; QUEIROZ, D. M. D.; VALENTE, D. S. M. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 1, 2013.

BOGNOLA, I. A.; GAVA, J. L.; FASOLO, P. J.; STOLLE, L. Proposição de uma Metodologia para Identificação de Unidades de Manejo Produtivas em Plantios de Eucalyptus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 0, n. 59, 2010

BOYDELL, B.; MCBRATNEY, A. Identifying potential within-field management zones from cotton-yield estimates. **Precision Agriculture**, v. 3, n. 1, p. 9-23, 2002. ISSN 1385-2256.

BRIANEZI, D.; JACOVINE, L. A. G.; SOARES, C. P. B.; GONÇALVES, W.; ROCHA, S. J. S. D. Balanço de emissões e remoções de Gases de Efeito Estufa no campus da Universidade Federal de Viçosa. **Floresta e Ambiente**, p. 0-0, 2014.

CARMO, D. N.; RESENDE, M.; SILVA, T. C. A. Avaliação da aptidão das terras para eucalipto. In: BARROS, N. F. e NOVAIS, R. F. D. (Ed.). **Relação Solo-Eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. cap. 5, p.224.

COHEN, J. Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit. **Psychological bulletin**, v. 70, n. 4, p. 213, 1968

COHEN, S.; COHEN, Y.; ALCHANATIS, V.; LEVI, O. Combining spectral and spatial information from aerial hyperspectral images for delineating homogenous management zones. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 435-443, 2013.

CÓRDOBA, M.; BRUNO, C.; COSTA, J.; BALZARINI, M. Subfield management class delineation using cluster analysis from spatial principal components of soil variables. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 97, p. 6-14, 2013.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M.; SHOUSE, P. J.; SOPPE, R.; AYARS, J. E. Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 2, p. 352-364, 2003

CORWIN, D. L.; S. M. LESCH. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, v.95, n.3, p.471-471, 2003.

DE BENEDETTO, D.; CASTRIGNANÒ, A.; RINALDI, M.; RUGGIERI, S.; SANTORO, F.; FIGORITO, B.; GUALANO, S.; DIACONO, M.; TAMBORRINO, R. An approach for delineating homogeneous zones by using multi-sensor data. **Geoderma**, v. 199, p. 117-127, 2013

DEBAENE, G.; NIEDŹWIECKI, J.; PECIO, A.; ŹUREK, A. Effect of the number of calibration samples on the prediction of several soil properties at the farm-scale. **Geoderma**, v. 214–215, n. 0, p. 114-125, 2014.

DIACONO, M.; CASTRIGNANÒ, A.; VITTI, C.; STELLACCI, A.; MARINO, L.; COCOZZA, C.; DE BENEDETTO, D.; TROCCOLI, A.; RUBINO, P.; VENTRELLA, D. An approach for assessing the effects of site-specific fertilization on crop growth and yield of durum wheat in organic agriculture. **Precision Agriculture**, p. 1-20, 2014.

FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C. W. Management zone analyst (MZA). **Agronomy Journal**, v. 96, n. 1, p. 100-108, 2004.

GUASTAFERRO, F.; CASTRIGNANÒ, A.; DE BENEDETTO, D.; SOLLITTO, D.; TROCCOLI, A.; CAFARELLI, B. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 6, p. 600-620, 2010.

HAJAT, S.; VARDOULAKIS, S.; HEAVISIDE, C.; EGGEN, B. Climate change effects on human health: projections of temperature-related mortality for the UK during the 2020s, 2050s and 2080s. **Journal of Epidemiology and Community Health**, February 3, 2014 2014

HORNUNG, A.; KHOSLA, R.; REICH, R.; INMAN, D.; WESTFAL, D. G. Comparison of site-specific management zones. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 2, p. 407-415, 2006.

HUANG, J.; NHAN, T.; WONG, V.; JOHNSTON, S.; LARK, M.; TRIANTAFILIS, J. Digital soil mapping of a coastal acid sulfate soil landscape. **Soil Research**, 2014.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Climate Change 2013: **The Physical Science Basis**. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

JOHNSON, C. K.; MORTENSEN, D. A.; WIENHOLD, B. J.; SHANAHAN, J. F.; DORAN, J. W. Site-Specific Management Zones Based on Soil Electrical Conductivity in a Semiarid Cropping System. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 2, p. 303-315, 2003.

KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; DRUMMOND, S. T.; HONG, S. Y. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3, p. 285-308, 2005.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F.; V., V. H. A., *et al* (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.1017.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; REBOLLO, F. J. Site-specific management zones based on the Rasch model and geostatistical techniques. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 75, n. 2, p. 223-230, 2010.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 218-226, 2013

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L.; BALZARINI, M.; ANGELINI, H. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 93, n. 2, p. 205-218, 2013.

PIIKKI, K.; SÖDERSTRÖM, M.; STENBERG, B. Sensor data fusion for topsoil clay mapping. **Geoderma**, v. 199, n. 0, p. 106-116, 2013

REIS, J. S.; ALVES, S. M. F.; ASMAR JUNIOR, J.; PESSOA, A. A.; SILVA, R. R. Determinação de zonas de manejo para adubação nitrogenada em lavoura de tomate industrial. **Revista Agrotecnologia**, v. 4, n. 2, p. 68-84, 2014.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª Aproximação. Comissão de Fertilidade do Estado de Minas Gerais. Viçosa. 1999. 359p.

SALEH, A.; BELAL, A. A. Delineation of site-specific management zones by fuzzy clustering of soil and topographic attributes: A case study of East Nile Delta, Egypt. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 18, n. 1, p. 012046, 2014.

SCUDIERO, E.; TEATINI, P.; CORWIN, D. L.; DEIANA, R.; BERTI, A.; MORARI, F. Delineation of site-specific management units in a saline region at the Venice Lagoon margin, Italy, using soil reflectance and apparent electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 54-64, 2013.

SILVA, R. F.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; DA SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; DA SILVA, G. F. Projeção do estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 32, n. 6, p. 979-992, 2008.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v. 38, n. 1, 2008

SONG, X.; WANG, J.; HUANG, W.; LIU, L.; YAN, G.; PU, R. The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 6, p. 471-487, 2009.

SPECTRUM TECHNOLOGIES INC. **TDR Soil Moisture: Product Manual**. 2014

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R.; WIEBOLD, W. J.; BATCHELOR, W. D.; BOLLERO, G. A.; BULLOCK, D. G.; CLAY, D. E.; PALM, H. L.; PIERCE, F. J.; SCHULER, R. T.; THELEN, K. D. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3, p. 263-283, 2005.

SUN, X.-L.; ZHAO, Y.-G.; WANG, H.-L.; YANG, L.; QIN, C.-Z.; ZHU, A. X.; ZHANG, G.-L.; PEI, T.; LI, B.-L. Sensitivity of digital soil maps based on FCM to the fuzzy exponent and the number of clusters. **Geoderma**, v. 171–172, n. 0, p. 24-34, 2012.

SUSZEK, G.; SOUZA, E. G. D.; URIBE-OPAZO, M. A.; NOBREGA, L. H. Determination of management zones from normalized and standardized equivalent productivity maps in the soybean culture. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 5, p. 895-905, 2011.

TAGARAKIS, A.; LIAKOS, V.; FOUNTAS, S.; KOUNDOURAS, S.; GEMTOS, T. A. Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 1, p. 18-39, 2013.

TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R.; MINASNY, B.; SARMADIAN, F.; MALONE, B. P. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. **Geoderma**, v. 213, n. 0, p. 15-28, 2014.

TAYLOR, A. J.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. Establishing management classes for broadacre agricultural production. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 99, p. 1366-1376, 2007.

TRANTAFILIS, J.; LESCH, S. M. Mapping clay content variation using electromagnetic induction techniques. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1–3, p. 203-237, 2005.

URRETAVIZCAYA, I.; SANTESTEBAN, L. G.; TISSEYRE, B.; GUILLAUME, S.; MIRANDA, C.; ROYO, J. B. Oenological significance of vineyard management zones delineated using early grape sampling. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 1, p. 111-129, 2014.

VALENTE, D. S. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão**. 2010. 120p. (Doutorado em Engenharia Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. D.; PINTO, F. D. A. D. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agrícola**, v. 69, n. 3, p. 173-179, 2012

XAVIER, A.; SILVA, R. L. Evolução da silvicultura clonal de Eucalyptus no Brasil. **Agronomía Costarricense**, v. 34, n. 1, p. 93-98, 2010.

WHEELER, T.; VON BRAUN, J. Climate Change Impacts on Global Food Security. **Science**, v. 341, n. 6145, p. 508-513, 2013.

WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A. B. The “Null Hypothesis” of Precision Agriculture Management. **Precision Agriculture**, v. 2, n. 3, p. 265-279, 2000.

4. CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho procurou analisar a variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente (CE_a) e sua relação com algumas propriedades do solo e topográficas, em uma área destinada a produção de eucalipto clonal. Também foi apresentada uma discussão do momento adequado à realização da coleta de dados em campo, considerando os períodos antes e após a colheita mecanizada. Foi objetivo, ainda, deste trabalho, delimitar e avaliar a qualidade de zonas de manejo para o plantio de eucalipto em questão, utilizando a CE_a , teor de água e argila do solo, que possuem determinação fácil e de baixo custo.

A CE_a apresentou forte correlação com os teores de água, potássio, cálcio, magnésio e alumínio. A correlação foi moderada com o teor de fósforo, CTC efetiva, fósforo remanescente e quantidade de silte. Por outro lado, verificou-se fraca correlação negativa da CE_a com a declividade, e ausência de correlação com a altitude. Esses resultados, de uma maneira geral, indicam o grande potencial de utilização da CE_a para avaliação da qualidade de solos florestais, definição dos melhores locais para amostragem, bem como sua utilização à geração de zonas de manejo.

A colheita florestal mecanizada não alterou de maneira considerável o padrão espacial da CE_a , uma vez que há forte correlação entre os mapas interpolados antes e após a colheita. Apesar do semelhante padrão espacial, os valores de CE_a obtidos na condição pós-colheita foram maiores, o que pode ser consequência tanto da maior compactação do solo, em virtude do tráfego de máquinas, quanto ao pequeno acréscimo na umidade média do solo observados nesta condição. Os levantamentos em campo antes da colheita foram considerados ideais, quando se considera maior facilidade de caminhar na área de coleta dos dados nesta condição.

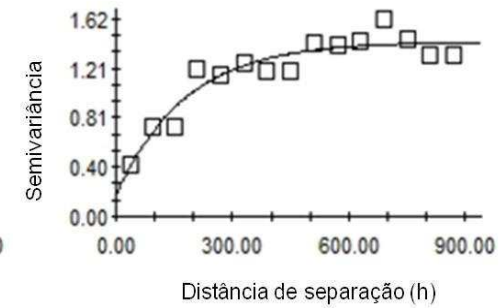
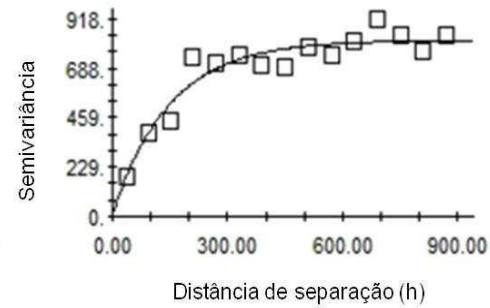
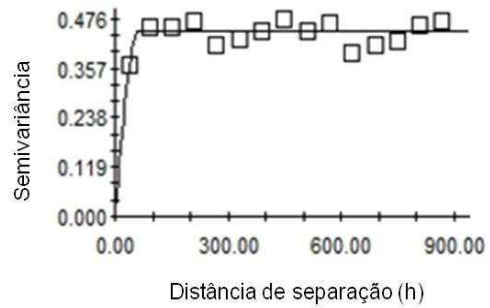
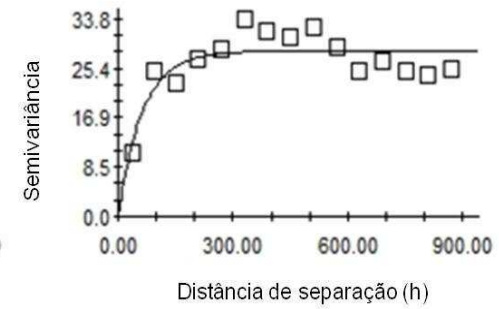
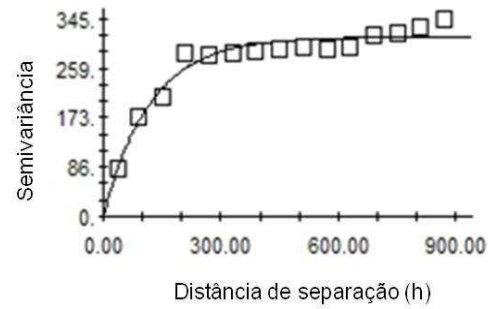
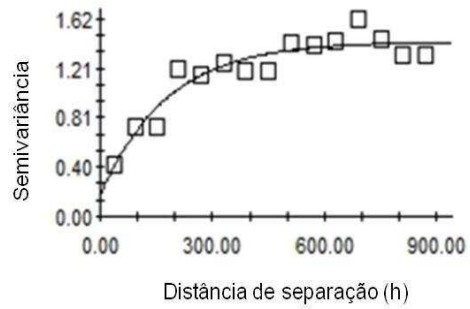
As zonas de manejo (ZM) ou classes de manejo obtidas a partir da CE_a , teor de água e argila possuem forte potencial para utilização no manejo de solos florestais. Foi verificado que as ZM's geradas representam de maneira satisfatória atributos do solo importantes à produção do eucalipto. Identificou-se também, diferença significativa entre as duas ZM's para todos os atributos do solo, exceto teor de fósforo. Entretanto, são necessários mais estudos de cunho técnico e

econômico para viabilizar a adoção do modelo de aplicação de fertilizantes à taxa variável.

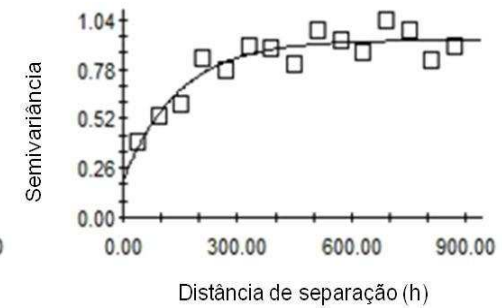
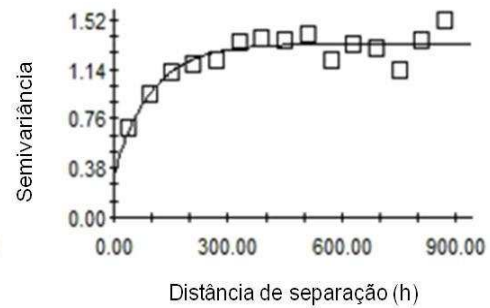
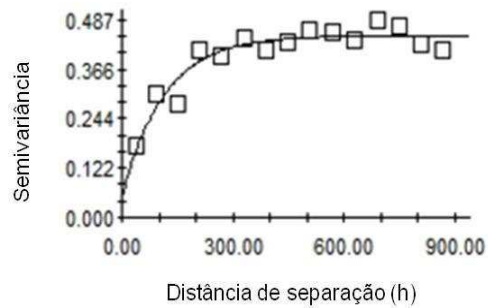
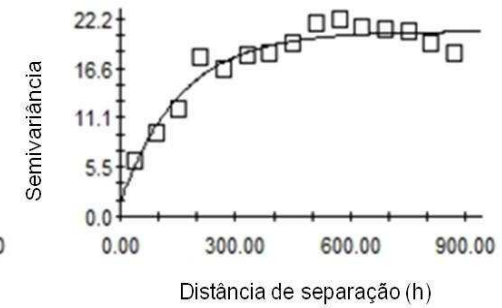
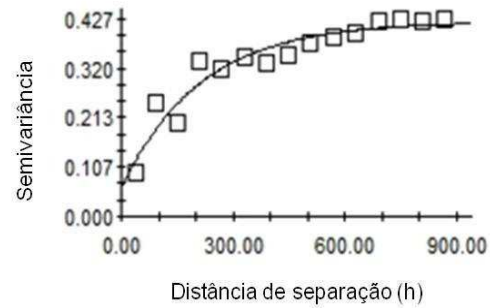
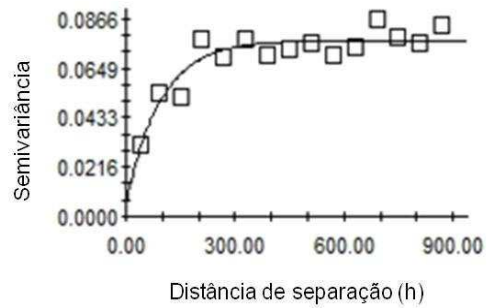
5. APÊNDICES

APÊNDICE - A

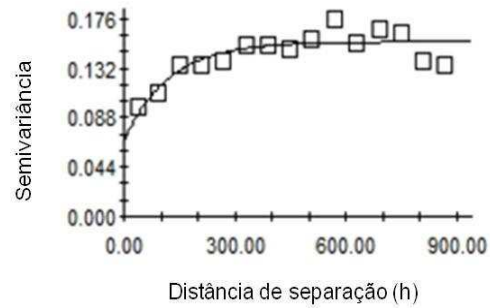
Semivariogramas



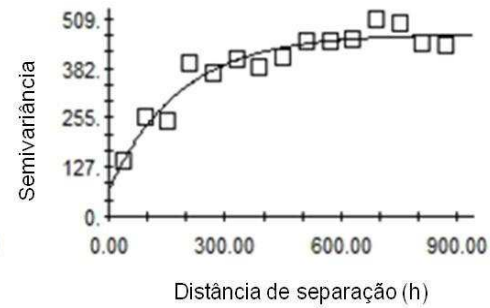
Semivariogramas



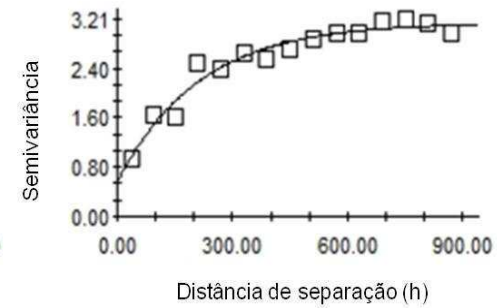
Semivariogramas



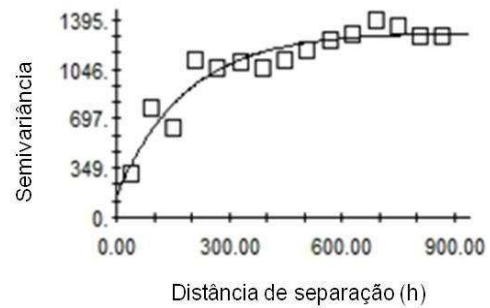
Soma de bases (SB)



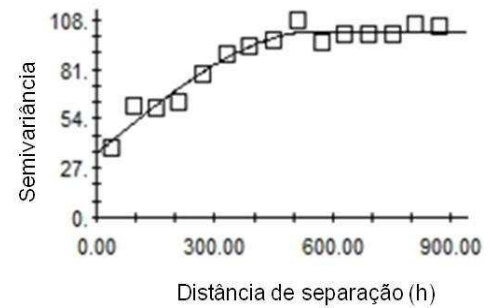
Saturação por bases (V)



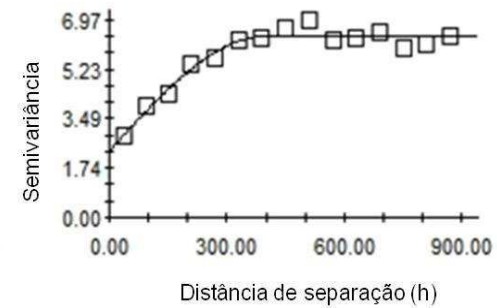
Acidez total (H + Al)



Saturação por Alumínio (m)

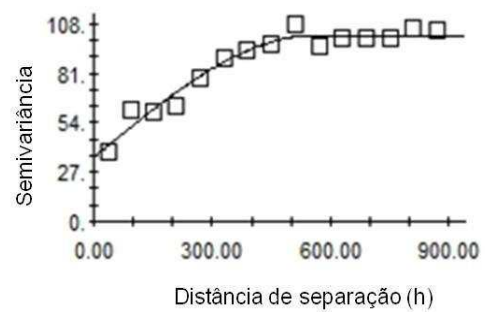


Areia grossa

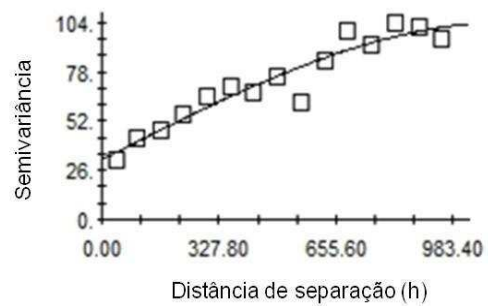


Areia fina

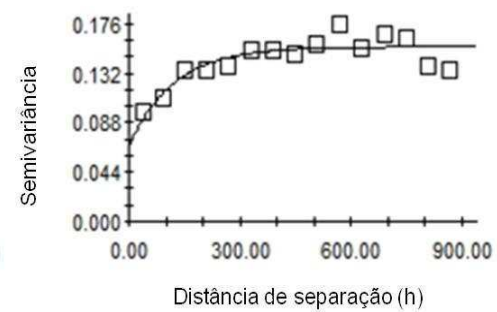
Semivariogramas



Argila



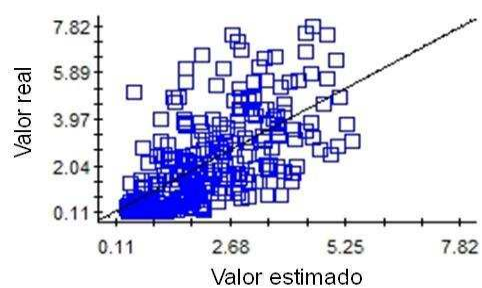
Silte



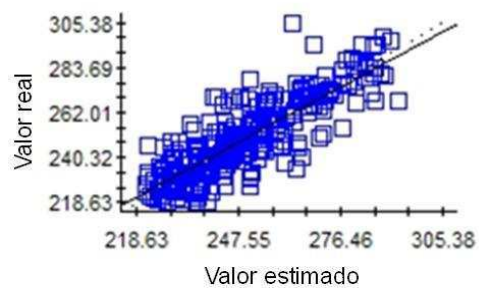
Resistência à penetração

APÊNDICE - B

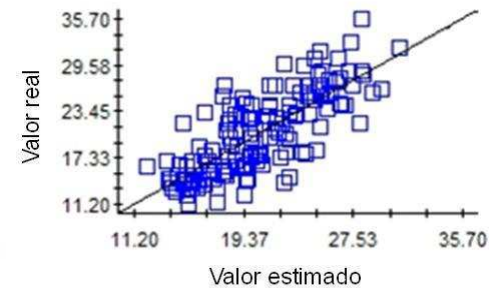
Validação cruzada dos mapas interpolados



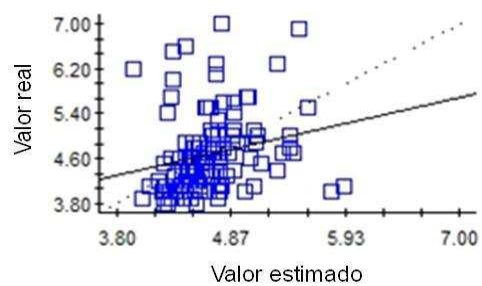
Condutividade elétrica aparente (mS m^{-1})



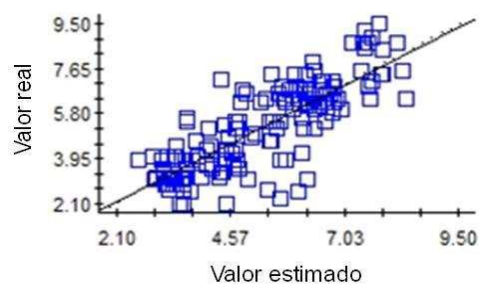
Altitude (m)



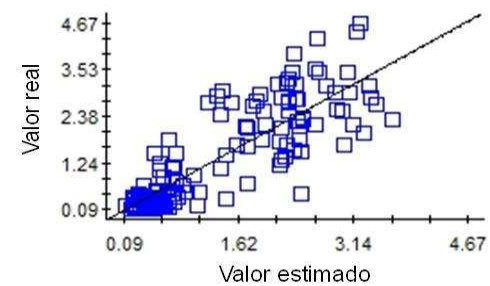
Umidade (%)



Fósforo (mg dm^{-3})

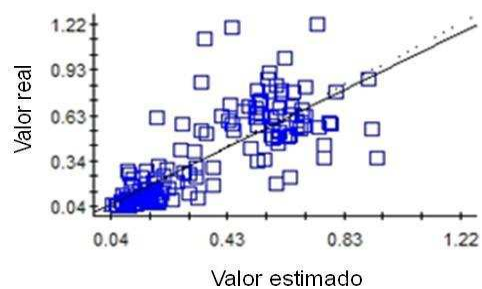
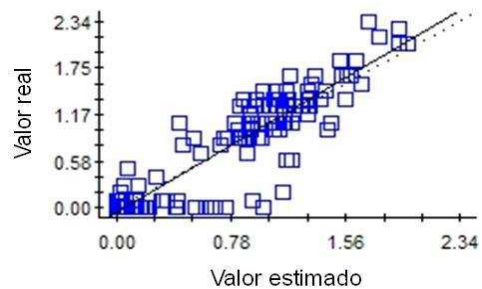
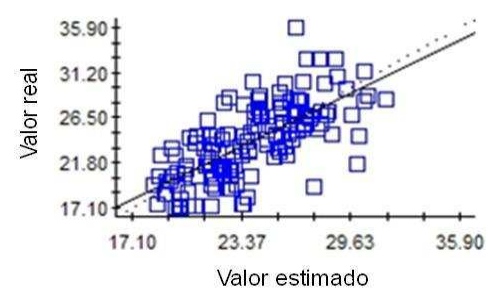
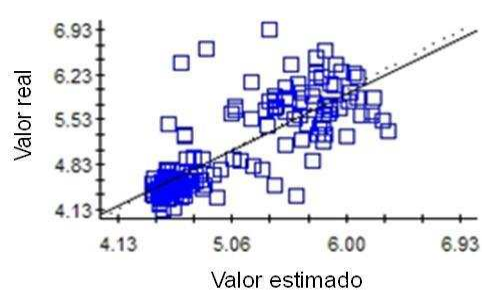


Potássio (mg dm^{-3})

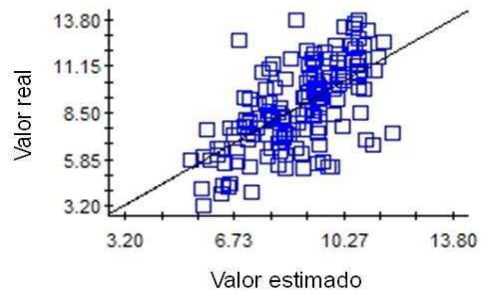
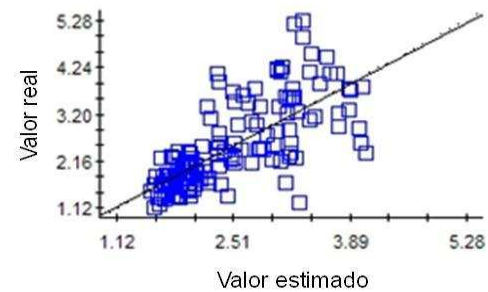


Cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)

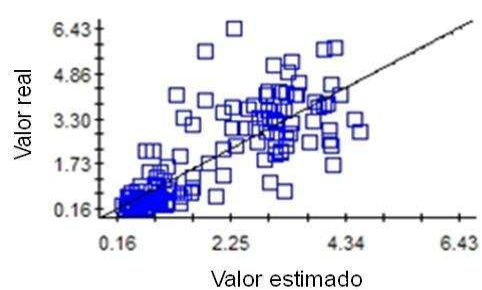
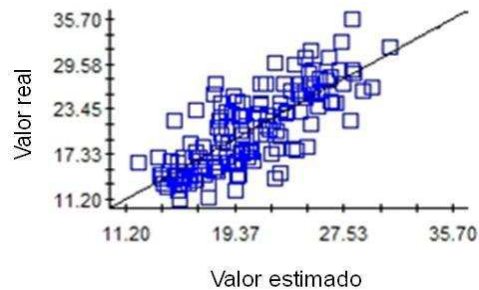
Validação cruzada dos mapas interpolados

Magnésio (cmolc dm⁻³)Alumínio (cmolc dm⁻³)Fósforo remanescente (mg L⁻¹)

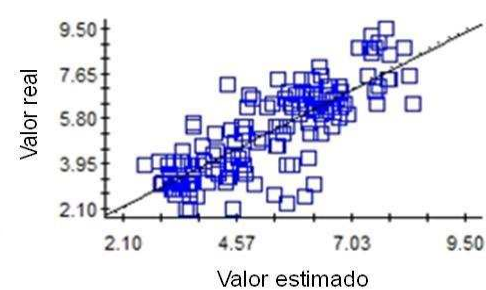
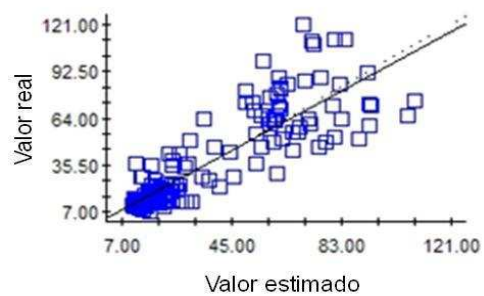
pH

CTC a pH 7 (cmolc dm⁻³)CTC efetiva (cmolc dm⁻³)

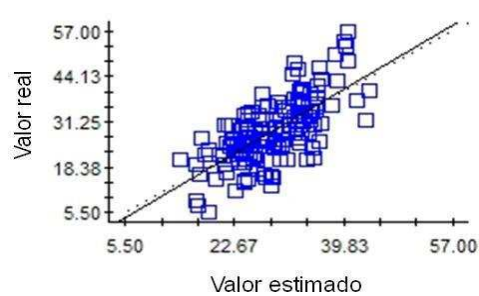
Validação cruzada dos mapas interpolados

Soma de bases (cmolc dm⁻³)

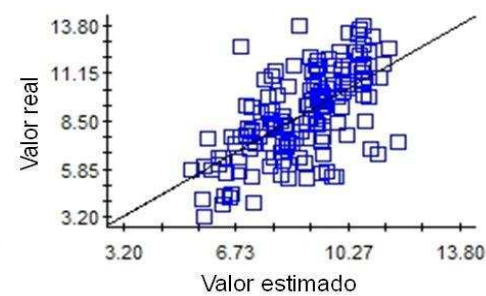
Saturação por bases (%)

Acidez total (cmolc dm⁻³)

Saturação por Alumínio (%)

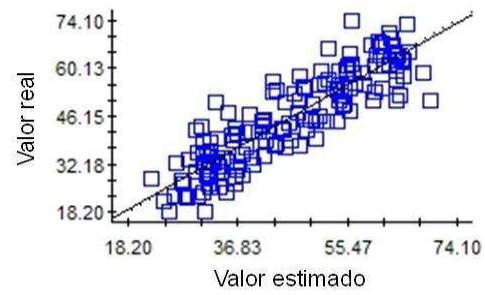


Areia grossa (%)

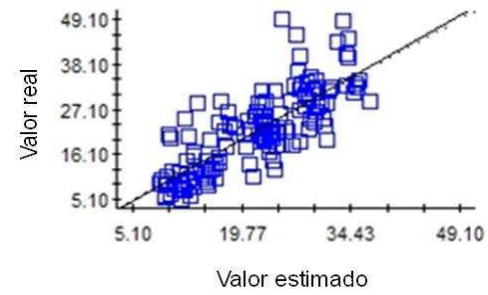


Areia fina (%)

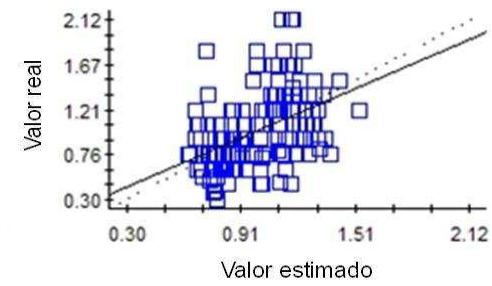
Validação cruzada dos mapas interpolados



Argila (%)



Silte (%)



Resistência à penetração (Mpa)

APÊNDICE C

Mapas das propriedades do solo classificadas em duas classes

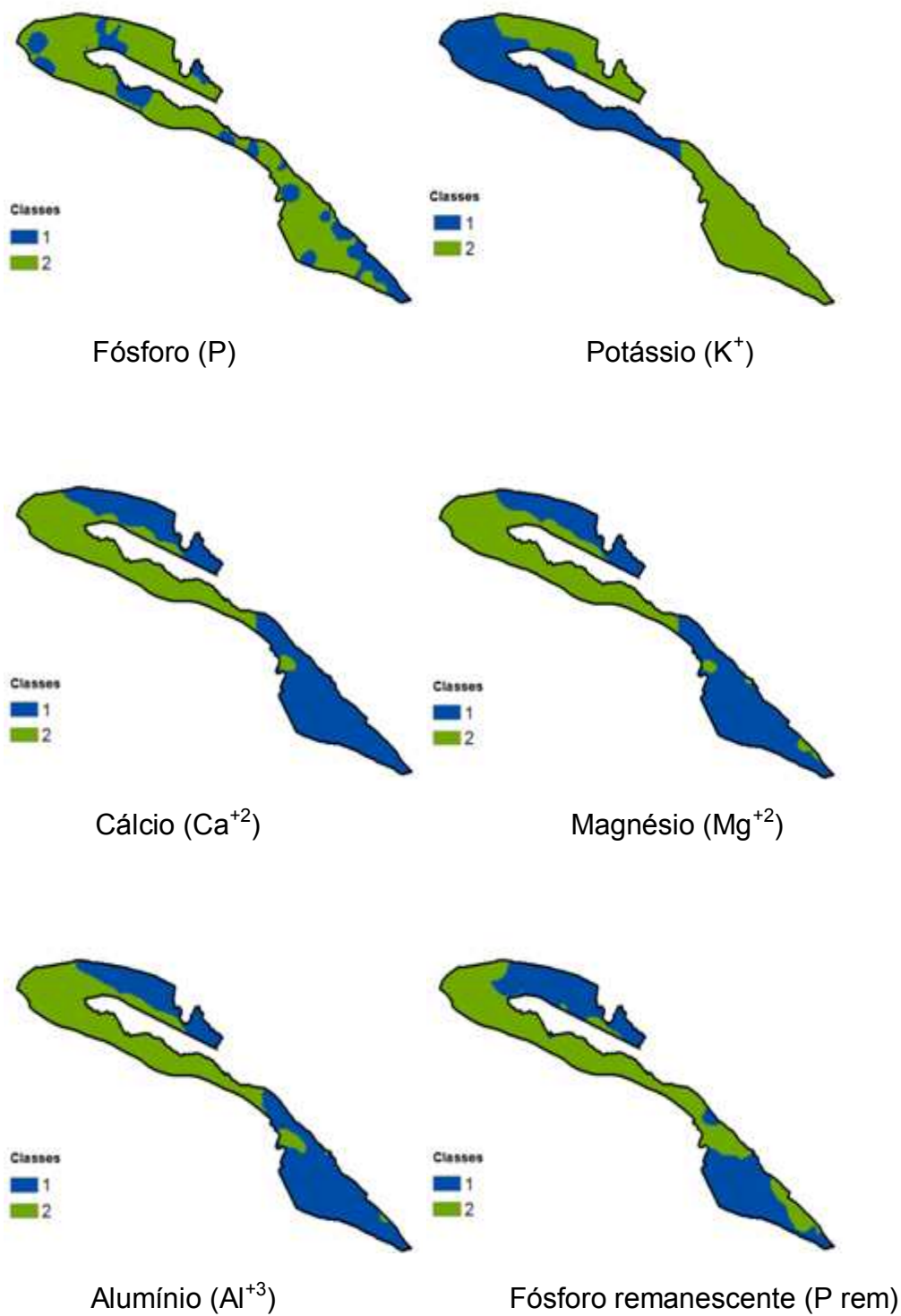


Figura 1C. Mapas das propriedades do solo classificadas em duas classes

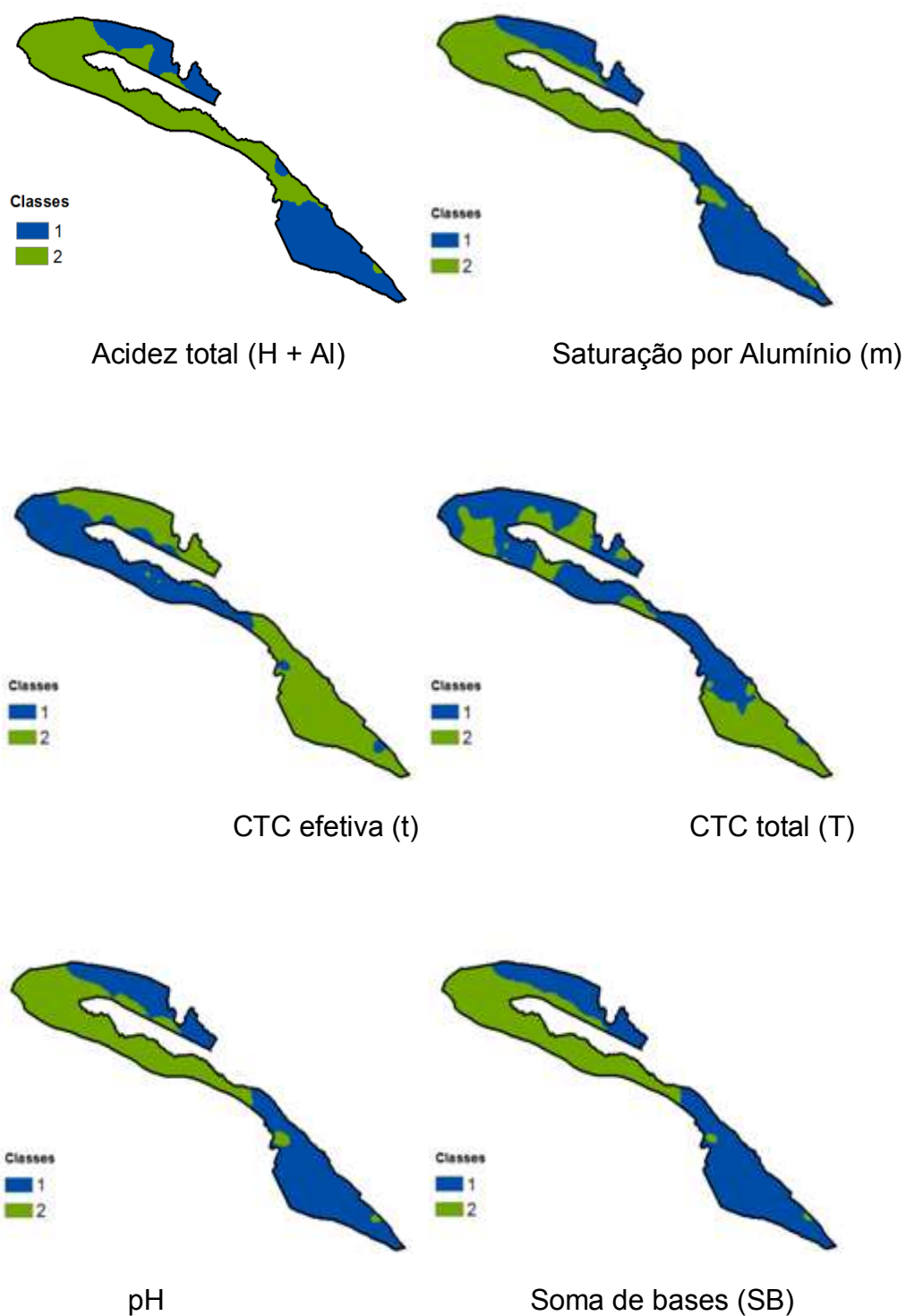


Figura 1C. (Continuação) Mapas das propriedades do solo classificadas em duas classes.

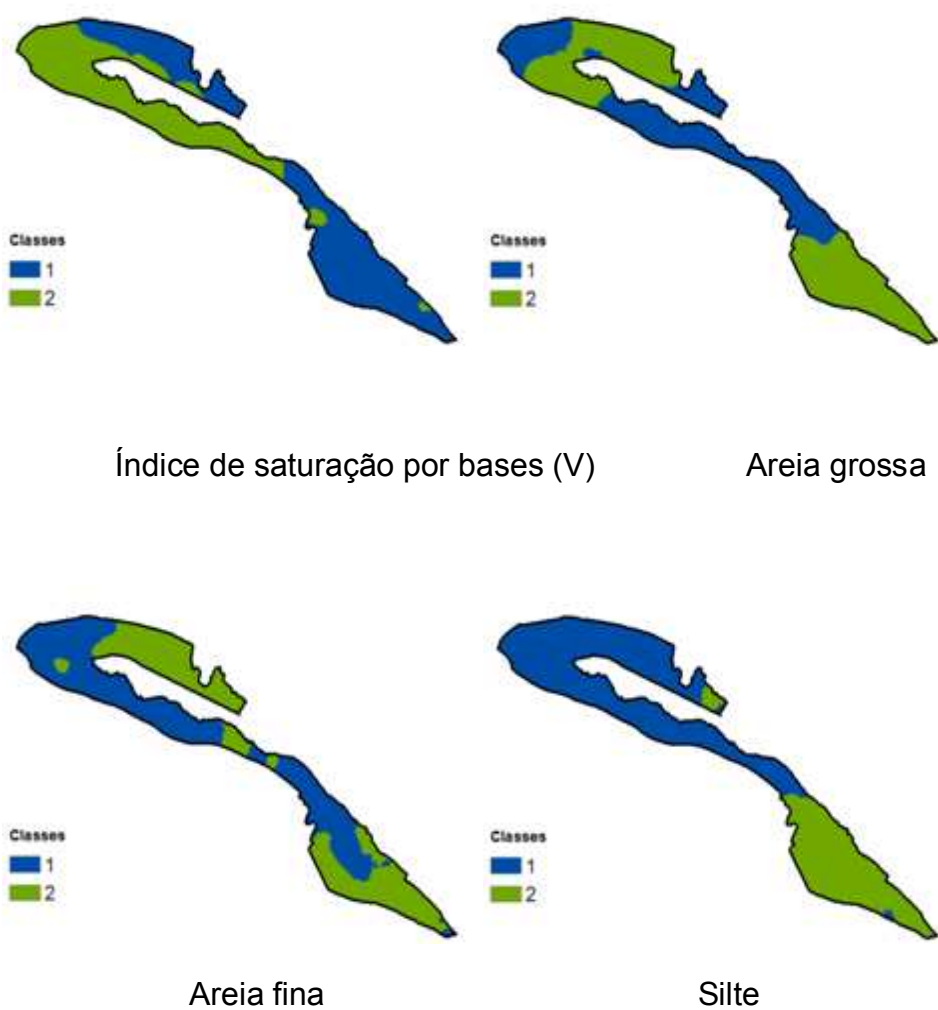


Figura 1C. (Continuação) Mapas das propriedades do solo classificadas em duas classes.

APÊNDICE D

Correção espacial de Dutilleul para o p-valor dos coeficientes de correlação entre as variáveis estudadas e a condutividade elétrica aparente.

Variável	$r^{(1)}$	p (Dutilleul)	p (Original)
Altitude	-0,15	0,386	0,081
Umid. ⁽²⁾	0,75	<0,001	<0,001
pH ⁽³⁾	0,61	<0,001	<0,001
P ⁽⁴⁾	0,25	0,0387	0,007
K ⁺ ⁽⁵⁾	0,62	<0,001	<0,001
Ca ⁺² ⁽⁶⁾	0,68	<0,001	<0,001
Mg ⁺² ⁽⁷⁾	0,68	<0,001	<0,001
Al ⁺³ ⁽⁸⁾	-0,61	<0,001	<0,001
H+AL ⁽⁹⁾	-0,52	<0,001	<0,001
SB ⁽¹⁰⁾	0,69	<0,001	<0,001
t ⁽¹¹⁾	0,64	<0,001	<0,001
V ⁽¹²⁾	0,67	<0,001	<0,001
m ⁽¹³⁾	-0,67	<0,001	<0,001
T ⁽¹⁴⁾	0,14	0,1884	0,103
P.rem ⁽¹⁵⁾	0,45	<0,001	<0,001
AG ⁽¹⁶⁾	-0,16	0,1642	0,052
AF ⁽¹⁷⁾	-0,084	0,2912	0,3515
Argila	-0,18	0,2757	0,03
Silte	0,40	0,0382	<0,001

¹/r – Coeficiente de correlação de Pearson ²/Umid. – Teor de água ³/pH – Potencial hidrogeniônico (1:2,5) ⁴/P – Fósforo ⁵/K – Potássio ⁶/Ca – Cálcio ⁷/Mg – Magnésio ⁸/Al – Alumínio ⁹/H+Al – Acidez potencial ¹⁰/SB – Soma de bases ¹¹/t – Capacidade de troca catiônica efetiva ¹²/V – Saturação por bases ¹³/m – Saturação por alumínio ¹⁴/T – Capacidade de troca catiônica total ¹⁵/P rem – Fósforo remanescente ¹⁶/AG – Areia grossa ¹⁷/AF – Areia fina