

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**RELAÇÕES DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E
A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE SOJA E
MILHO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Diego Schmidt Schossler

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

RELAÇÕES DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO

Diego Schmidt Schossler

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Mecanização Agrícola, Linha de Pesquisa de Agricultura de Precisão, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

Orientador Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

Santa Maria, RS, Brasil.

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Schossler, Diego Schmidt
Relações de atributos químicos do solo e a
produtividade das culturas de soja e milho / Diego
Schmidt Schossler.-2013.
37 p.; 30cm

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2013

1. Agricultura de precisão 2. Manejo sitio específico
3. Variabilidade espacial 4. Fertilidade do solo I.
Amado, Telmo Jorge Carneiro II. Título.

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Diego Schmidt Schossler. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
E-mail: diegoschossler@hotmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de Mestrado

**RELAÇÕES DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E A
PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO**

elaborada por
Diego Schmidt Schossler

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado.
(Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Antônio Luis Santi.
(UFSM/CESNORS)

Prof. Dr. Jackson Ernani Fiorin.
(UNICRUZ)

Santa Maria, 28 de Maio de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Eunice Schmidt Schossler, meu pai, Miguel Angelo Prates Schossler, e minha irmã, Daniela Schmidt Schossler, minha família, grandes amigos, meu refúgio absoluto que sempre apoiaram as minhas decisões.

Agradeço ao amor e ao companheirismo de minha namorada, Cláudia Vargas Klimaczewski.

Ao meu orientador, Prof. Telmo Amado, pelos ensinamentos, apoio, compreensão, amizade e pela oportunidade do trabalho a ser realizado junto ao Projeto Aquarius.

Aos meus grandes amigos que convivi durante o mestrado e a graduação, parceiros de trabalho do Projeto Aquarius, especialmente aos que contribuíram na execução desse trabalho, como o Brian Santos Trindade, Fernando Dubou Hansel, Tiago Horbe, Tiago Teixeira, Vitor Girardello, Junior Kunz, Ademir Ferreira, Jardes Bragagnolo, Rafael Bortolotto, Leandro Geib, Thiago Segabinazi, Douglas Dalla Nora, Rai Scwalbert, Cristiano Ertel, Cristiano Keller, a todos a aqueles que possa ter me esquecido de citar e aos mais novos no projeto, mas que compartilhei momentos e experiências, o meu agradecimento.

Ao amigo Paulo Alba que ajudou na execução desse trabalho e ao amigo Lucio Amaral que auxiliou incansavelmente nas análises estatísticas.

Ao Projeto Aquarius e aos parceiros Cotrijal, Fazendas Agrícolas Ana, Massey Ferguson, Stara e Yara pela oportunidade de acesso a toda pesquisa realizada, com essa estrutura fantástica para realização de trabalhos que contribuem diretamente ao produtor rural.

Ao Engenheiro Agrônomo Roberto Damásio de Carvalho pelo seu apoio e ensinamentos em Rosário do Sul.

À CAPES pelo fomento a bolsa de mestrado.

Aos professores do PPGEA, agradeço pelos ensinamentos compartilhados e pelo empenho na difusão de seus conhecimentos.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

RELAÇÕES DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS DE SOJA E MILHO

Autor: Diego Schmidt Schossler
Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado
Data: Santa Maria, 28 de maio de 2013.

Com o avanço da adoção da agricultura de precisão no Brasil, cresce a utilização de ferramentas tecnológicas de amostragem de solo georreferenciadas e mapas de produtividade das culturas. As relações e o cruzamento de dados entre as informações destas duas ferramentas podem auxiliar no aprimoramento do manejo das lavouras através de indicações específicas de cada elemento com redução de custos, uso eficiente de insumos, aumento da produtividade e rentabilidade das culturas. O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência de atributos químicos do solo na produtividade das culturas de soja e milho em duas áreas comerciais no planalto do RS, através da análise de componentes principais e o agrupamento hierárquico - cluster. A investigação ocorreu em duas áreas experimentais de 132 e 124 ha em Latossolo Vermelho distrófico típico. As amostragens de solo foram realizadas baseadas em uma malha regular de 100 metros por 100 metros na camada de 0-0,10 m. As produtividades das culturas foram relacionadas no mesmo ponto de cada análise de solo utilizando-se a média de produtividade anual em um raio de 25 m ao redor de cada ponto amostral. Na primeira área experimental de 132 ha, foram investigados os mapas de colheita de soja-safra 2008/09; soja-safra 2009/10; soja-safra 2010/11 e milho-safra 2011/12. Na segunda área investigada, de 124 ha, foram estudados os mapas de colheita de soja-safra 2009/10; milho-safra 2010/11 e soja-safra 2011/12. A escolha dos eventos de colheita analisados seguiu o critério de avaliar safras com período inferior a dois anos da realização da amostragem de solo, em que apenas ocorreram as adubações de manutenção das culturas. Ambas as áreas apresentavam fertilidade elevada, sendo a primeira com a saturação de bases (V) média de 65,16% e a segunda com 83,03%. Na primeira área experimental, o acréscimo de produtividade está sendo explicado pela elevação dos atributos: saturação de cálcio e de magnésio na capacidade de troca de cátions (Sat Ca; Sat Mg), V e relação cálcio: magnésio (Ca:Mg). Na segunda área experimental, a elevação do atributo químico Sat Mg comprometeu a produtividade das culturas. Em ambos os experimentos a elevação dos atributos Sat Ca, V e Ca: Mg contribuíram para elevar a produtividade das culturas. O equilíbrio de cátions no complexo de troca foi o atributo químico que melhor explicou a variabilidade da produtividade das culturas investigadas.

Palavras-chaves: Agricultura de precisão. Manejo sítio específico. Variabilidade espacial. Fertilidade do solo.

ABSTRACT

Master Dissertation
Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria

RELATIONS OF CHEMICAL ATTRIBUTES OF SOIL AND CROP YIELDS OF SOYBEAN AND CORN

Author: Diego Schmidt Schossler
Advisor: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado
Date: Santa Maria, 05-28-2013.

With the advance the adoption of precision agriculture in Brazil, growing use the technological tools georeferenced soil sampling and crop yield. Relations and crossing data information between these two tools can assist in improving the management of crops through specific recommendations of each element with reduced costs, efficient use of inputs, increasing productivity and profitability of crops. The objective of this study was to evaluate the influence of soil chemical properties on grain yield of soybean and corn in two experimental fields southern Brazil through principal component analysis and hierarchical cluster. The research happened in two experimental areas of 132 and 124 hectares in typical Oxisol. The soil samples were taken with a grid sampling of one hectare in the 0-0.10 m layer. The yields of the cultures were related at the same point each soil analysis using the annual average productivity at a radius of 25 m around each sampling point. At the first experimental area of 132 hectares, were investigated yield maps soybean harvest crop 2008/09; soybean crop 2009/10; soybean crop 2010/11 and corn crop 2011/12. In the second study area of 124 hectares, were investigated yield maps soybean harvest crop 2009/10, corn harvest 2010/11 and soybean crop 2011/12. The selection of yield maps followed the criterion to evaluate crops with less than two years of the completion of soil sampling, where only occurred fertilization of crop maintenance. Both areas had high fertility, the first area to saturation (V) average 65.16% and 83.03% in the second area. At the first experimental area the increase in productivity is being explained by the increase of the attributes: saturation of calcium and magnesium in the cation exchange capacity (Sat Ca, Mg Sat), V, and the calcium: magnesium (Ca: Mg). In the second experimental area the increase attribute chemical Sat Mg committed crop yields. In both experiments the elevation of attributes Sat Ca, V and Ca: Mg contributed to raising crop yields. The balance of cations in the exchange complex was the chemical attributes that best explained the variability in crop investigated.

Keywords: Precision agriculture. Site specific management. Spatial variability. Soil fertility.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros estatísticos dos atributos do solo e produtividade das culturas da soja e do milho na primeira área experimental. Não Me Toque, RS.....	18
Tabela 2. Parâmetros estatísticos dos atributos do solo e produtividade das culturas da soja e do milho na segunda área experimental. Não Me Toque, RS.....	20
Tabela 3. Análise de componentes principais dos atributos do solo e produtividade de grãos da primeira área experimental.....	21
Tabela 4. Análise de componentes principais dos atributos do solo e produtividade de grãos da segunda área experimental.....	22
Tabela 5. Análise das condicionantes de regressão para a primeira e segunda área experimental.....	27

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** (a) Dendograma dos 128 pontos investigados da primeira área experimental; (b) dendograma dos 112 pontos investigado da segunda área experimental.....25
- Figura 2.** Relação da MNC com os cátions determinantes: (a) Sat Ca versus MNC (1^o área); (b) V versus MNC (1^o área); (c) Sat Mg versus MNC (1^o área); (d) Ca:Mg versus MNC (1^o área); (e) Sat Ca versus MNC (2^o área); (f) V versus MNC (2^o área); (g) Sat Mg versus MNC (2^o área); (h) Ca:Mg versus MNC (2^o área).....29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	Análise de componentes principais
AP	Agricultura de precisão
Ca	Cálcio
Ca:Mg	Relação cálcio <i>versus</i> magnésio
CP	Componente principal
CV	Coefficiente de variação
H+Al	Teor de hidrogênio e alumínio
HCA	Análise agrupamento hierárquico – Cluster
K	Potássio
K:Ca	Relação potássio <i>versus</i> cálcio
K:Mg	Relação potássio <i>versus</i> magnésio
Mg	Magnésio
MNC	Média normalizada das culturas
MNS	Média normalizada de soja
Sat Ca	Saturação da capacidade de troca de cátions por cálcio
Sat K	Saturação da capacidade de troca de cátions por potássio
Sat Mg	Saturação da capacidade de troca de cátions por magnésio
SB	Soma de bases
V	Saturação por bases

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. MATERIAL E MÉTODOS	14
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4. CONCLUSÃO.....	31
5. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. INTRODUÇÃO

Os fatores ambientais e de manejo das culturas apresentam diferentes graus de influência na variabilidade espacial da produtividade das culturas anuais. A identificação dos fatores de produção espacialmente dominantes e limitantes em cada sistema específico é um dos pré-requisitos da agricultura de precisão (AP), possibilitando a tomada de decisão respeitando a variabilidade espacial existente no talhão (Corá et al., 2004; Molin, 2004; Roloff et al., 2006; Amado et al., 2009; Rosa-Filho et al., 2009; Nogara Neto et al., 2011).

Em uma mesma lavoura é possível encontrar subáreas com distintas qualidades químicas e, portanto, com diferentes probabilidades de respostas à aplicação de insumos, embora as práticas de manejo adotadas tenham sido aplicadas uniformemente (Amado et al., 2005). A gestão da variabilidade dos atributos de solo e das culturas, no espaço e no tempo, é considerada o princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas, em qualquer que seja a sua escala (Grego & Vieira, 2005).

A AP considera que fatores de produção podem ser quantificados e ao mesmo tempo georreferenciados, sendo possível realizar a intervenção localizada em função da necessidade específica local, está fundamentada na existência da variabilidade espacial dos fatores produtivos e por consequência na produtividade das culturas (Balastreire et al., 1997; Amado & Santi, 2007). Desta forma, a análise histórica de várias safras e de diferentes culturas deve ser investigada visando à caracterização das variabilidades temporal e espacial da produtividade (Dampney & Moore, 1999; Blackmore et al., 2003; Amado et al., 2007). Com análise conjunta de vários anos, pode-se determinar com menor incerteza a variabilidade espacial da produtividade e a partir daí prospectar os fatores limitantes (Molin, 2002; Milani et al., 2006; Amado et al., 2007). A simples mensuração e a representação digital de um atributo isolado do solo geralmente não é eficiente para estabelecer relação causa-efeito com a

produtividade de uma cultura. É frequente que a representação espacial de um nutriente, mesmo com uma malha intensa, não apresente correlação com o mapa de produtividade (Santi et al., 2012).

Referente aos teores de nutrientes no solo, existe a busca dos patamares que propiciem as melhores condições para a produção de grãos, proposto por Bear & Toth (1948), o conceito de um ambiente ideal para o desenvolvimento das plantas seria criado quando a capacidade de troca de cátions (CTC) fosse ocupada por 65% de Ca; 10% de Mg, 5% de K e 20% de H. Entretanto, Kelling & Peters (2004) sugerem que o desenvolvimento e rendimento das culturas é pouco influenciado por saturações situadas entre as faixas de 65-85% de Ca, 6-12% de Mg e 2-5% de K, sendo que, o H ocuparia os sítios restantes do complexo de troca. Rehm (1994) sugere valores entre 60 e 80% para o Ca, 10 e 20% para Mg, e 2 e 5% para K. Para Arantes (1983); Carmello (1989); Oliveira (1993) e Munhoz Hernandez & Silveira (1998), a saturação da CTC por bases (V) mais elevadas proporcionaram maior crescimento das plantas e maior produção de material seco de milho, entretanto a maioria destes trabalhos são conduzidos em casas de vegetação com plantas em vaso, situação distinta da condição de campo. Esse critério é decisivo na interpretação de muitos resultados de pesquisa, pois na condição de campo, o processo de fluxo de massa de nutrientes até a raiz, como é o do cálcio e magnésio, é muito diferente da condição de proposta em vasos (Kelling & Peters, 2004).

Segundo a CQFSRS/SC (2004), nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o critério para recomendação de calagem, conseqüentemente elevação da V, em sistema de plantio direto consolidado, o pH deve ser inferior a 5,5 e a V é inferior a 65%, se atender só um critério e a saturação por Al for inferior a 10% não é recomendada a calagem. No resto do Brasil, a recomendação de calagem é baseada na elevação da V (Sfredo, 2008), nas áreas tradicionais de cultivo de soja, no Estado do Paraná, utiliza-se o método da elevação da V igual a 70%; para os Estados de São Paulo (Mascarenhas & Tanaka, 1996), no Mato Grosso

do Sul o valor da V é 60%. Na região do arenito, no Noroeste do PR e nos demais estados da Região Central, com predominância de solos formados sob vegetação de Cerrado e ricos em óxidos de Fe e de Al (Sousa & Lobato, 2004) ou em solos com menos de 40% de argila, o valor adequado de saturação é de 50% (Sfredo, 2008).

O uso da estatística univariada dificulta a extração de correlações e modelagens da produtividade com nutrientes do solo, devido ao elevado número de repetições necessárias dentro de uma gleba agrícola para contemplar outras influências não edáficas que não são mensuradas, como armazenagem de água, exposição solar, topografia, microclima, incidência de pragas e doenças e erros de manejo (Trangmar et al., 1985; Cantarutti et al., 2007; Siqueira et al., 2010). As análises estatísticas, muitas vezes, ao serem realizadas por meio de métodos univariados podem deixar o usuário de AP na dúvida sobre que nutriente manejar primeiro (Silva et al., 2010; Cherubin, 2011). Este fato está associado ao comportamento multifatorial da produtividade das culturas, que deve ser preferencialmente investigado com uso de métodos de análise multivariada no qual cada fator tem um peso sobre a produtividade das culturas. Roloff et al. (2006) sugeriram o emprego de métodos estatísticos não paramétricos que não pressupõem distribuição normal nem relações lineares. Os métodos estatísticos multivariados podem vir a preencher esta lacuna na AP, possibilitando melhores interpretações dos bancos de dados.

O objetivo deste trabalho foi avaliar, pelos métodos estatísticos multivariados, análise de componentes principais e agrupamento hierárquico - Cluster, a magnitude da influência dos atributos químicos do solo na variabilidade espacial da produtividade de culturas de soja e milho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado em duas áreas experimentais, não irrigadas, localizadas no município de Não-Me-Toque (RS), distantes três quilômetros entre si. A primeira área experimental com 132 ha, localizada na coordenadas geográficas 28°30.52'S, 52°46.68'O e altitude média de 487 metros. A segunda área experimental com 124 ha, localizada nas coordenadas geográficas 28°28.81'S, 52°46.94'O, tem altitude média de 471 metros, onde se desenvolvem as pesquisas do Projeto Aquarius (www.ufsm.br/projetoaquarius).

O clima do local de estudo é Cfa subtropical, de acordo com a classificação de Köppen (1931), sem estação seca definida e com geadas frequentes e severas durante o inverno. A precipitação pluvial média anual é de 1.770 mm, bem distribuída durante o ano (nenhum mês com precipitação inferior a 60 mm). A temperatura média normal das máximas no mês mais quente é de 30,4°C, em janeiro, e no mês mais frio de 19,2°C, em junho. A média normal das temperaturas mínimas do mês mais quente é de 18,7°C e de 9,3°C, do mês mais frio. Essa região situa-se na zona escarpa arenito-basáltica do Planalto Meridional Brasileiro. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, com profundidade média de 1,5 m (EMBRAPA, 2006).

As áreas possuem histórico de longo período de manejo sob o sistema de semeadura direta (20 anos) e mais recentemente com AP (13 anos). No período de 2002 a 2008 foram feitas intervenções a taxa variada de calcário, fósforo (P) e potássio (K) para correção e elevação dos teores destes nutrientes no solo. A partir do ano de 2008, as intervenções à taxa variada foram realizadas com o objetivo de manutenção das culturas, visando a suprir a extração de cada cultura com P e K.

Todas as adubações na cultura da soja foram realizadas a lanço. Em três anos de cultura de milho, as adubações foram realizadas 50% da dose de P aplicada no sulco de

semeadura e o restante a lanço e o K, todo aplicado a lanço. No período da entressafra, nos anos analisados, a cultura da aveia preta foi implantada como planta de cobertura.

As amostragens de solo foram realizadas com malha regular de 100 metros por 100 metros, com seis subamostras para compor uma amostra composta, na camada de 0-0,10 m com o auxílio de pá cavadeira e um Sistema de Posicionamento Global (GPS) portátil de navegação Garmin GPSMAP 62. As amostragens de solo foram efetuadas na entressafra de 2010 na primeira área e na segunda área na entressafra de 2011. Os atributos químicos do solo avaliados foram: pH em H₂O (pH), índice SMP (SMP), teores de P, K, Cálcio(Ca), Magnésio(Mg), sendo as determinações realizadas seguindo métodos descritos por Tedesco et al. (1995). A partir desses dados, foi calculado o teor de hidrogênio mais alumínio (H+Al), a soma de bases (SB), saturação da CTC por Bases (V), por Ca (Sat Ca), por Mg (Sat Mg) e por K (Sat K) e as relações Ca:Mg, K:Mg e K:Ca.

Os dados de produtividades das áreas experimentais foram adquiridos através de colhedoras Massey Ferguson, modelos MF 34 e MF 32, ambas equipadas com o sistema GTA de AP, com conjunto de sensores de produtividade do tipo Micro Track de duas hastes, com acesso ao sistema de GPS que acompanha a colhedora e efetua o armazenamento de pontos georreferenciados.

Durante a colheita foram aferidos os dados de produção, impureza e umidade com os resultados informados nos boletins emitidos pela cooperativa receptora de grãos e os valores ajustados quando constatadas diferenças na produtividade informada pela cooperativa com os dados dos monitores. Os sensores de produtividade de grãos foram limpos frequentemente e os demais procedimentos de calibração recomendados pelo fabricante foram rigorosamente seguidos.

No pós-processamento dos dados foram utilizados os *software* Campeiro 7® (Giotto, 2010) e Microsoft Excel 2003 (Copyright – Microsoft Corporation) para análise dos dados.

Os dados brutos de produtividade passaram, inicialmente, por uma filtragem a fim de eliminar os erros mais frequentes durante a colheita, tais como: dados coletados durante as manobras nas bordas da lavoura ou em condições estáticas e ajustes de largura de plataforma, descrito por Alba (2011). Os valores de produtividade improváveis, com valores além dos extremos da dispersão dos dados, foram descartados, seguindo método proposto por Menegatti & Molin (2004).

Na primeira área experimental, foram analisados quatro eventos de colheita referentes às safras 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011 e 2011/2012, sendo os três primeiros cultivos de soja (soja 2009; soja 2010; soja 2011) e um cultivo de milho, na safra 2012 (milho 2012). Na segunda área experimental, foram analisados três eventos de colheita referentes às safras 2009/2010 (soja 2010), 2010/2011 (milho 2011) e 2011/2012 (soja 2012). A escolha dos eventos de colheita seguiu o critério de não analisar safras com período superior a dois anos da realização da amostragem de solo.

A média de produtividade das culturas foi gerada a partir dos resultados obtidos em um raio de 25 metros em torno de cada ponto amostral de solo. Foram analisados 128 e 112 pontos amostrais na primeira e segunda área experimental, respectivamente, sendo todos os dados, independentes do resultado absoluto, utilizados e computados nas análises. A média normalizada das culturas (MNC) foi calculada inicialmente em cada conjunto anual de dados de colheita. Calculou-se o percentual individual de cada ponto amostral em relação à média, após fez-se a média dos valores relativos de todas as safras analisadas de milho e soja. Procedeu-se com a mesma metodologia para média normalizada de soja (MNS), porém apenas com as culturas de soja.

As duas áreas experimentais foram estatisticamente analisadas separadamente. Os dados inicialmente foram submetidos à análise exploratória (estatística descritiva), objetivando verificar a posição e a dispersão dos dados. Os parâmetros estatísticos determinados foram:

mínimo, média, mediana, máximo, variância dos dados, desvio padrão, assimetria (A), curtose (C) e coeficiente de variação (CV). Com base nos valores de CV(%) obtidos, a dispersão dos dados foi classificada em: baixa (CV: <15%), moderada (CV: 15 a 30%) e alta (CV: >30%) Warrick & Nielsen (1980). Os valores de coeficiente de curtose (C), que expressa a dispersão (achatamento) da distribuição em relação a um padrão, que geralmente é a curva normal, foram classificados em: $C = 0$ distribuição é mesocúrtica, $C < 0$ platicúrtica e se $C > 0$ leptocúrtica. Os valores de coeficiente de assimetria (A) que visam a caracterizar quanto e como a distribuição de frequências se afasta da simetria, foram classificados em: $A > 0$ distribuição assimétrica à direita; $A < 0$ distribuição é assimétrica à esquerda; e $A = 0$, a distribuição é simétrica.

Foi empregada análise de componentes principais (ACP) e análise agrupamento hierárquico (HCA), conhecida também como Cluster, ambas através do *software* Statistica versão 7 (STATISTICA, 1995). Em cada conjunto de dados de solo, normalizarem-se os dados, calculando-se o percentual individual de cada ponto amostral em relação à média. A análise de regressão linear simples e os testes das suas condicionantes, Teste de White para homogeneidade de variâncias, Teste de Shapiro-Wilk para normalidade e Teste de Durbin Watson para independência dos resíduos, foram realizados nos *software* SAS 9.1 (SAS Institute, 2000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva dos atributos químicos do solo e a produtividade da primeira e da segunda área experimental são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. Nenhum dos nutrientes do solos investigados apresentou coeficiente de variação (CV) alto, segundo classificação de Warrick & Nielsen (1980). Os maiores valores de CV foram verificados para os teores de P disponível, em ambas as áreas experimentais, classificados como médios. Estes valores de CV possivelmente devam estar associados ao manejo à taxa variada adotado em anos anteriores, com o objetivo de uniformização dos teores de nutrientes do solo.

Os teores de argila da primeira área experimental situam-se em média de 48% e da segunda área experimental de 66%, saturação da capacidade de troca de cátions por Alumínio (Sat Al), na primeira área experimental, apresentou-se em 92,3% dos pontos amostrais inexistente, classificado como muito baixa segundo a CQFSRS/SC (2004) e em 7,7%, não ultrapassando o valor de 3%, classificada como baixa segundo a CQFSRS/SC (2004). Na segunda área experimental, em 98,2% dos pontos amostrais a Sat Al foi inexistente, e em 1,8% dos pontos não excedeu o valor de 2%, classificado como baixo segundo a CQFSRS/SC (2004).

Tabela 1. Parâmetros estatísticos dos atributos do solo e produtividade das culturas da soja e do milho na primeira área experimental. Não Me Toque, RS.

Variáveis	Vmín	Média	Mediana	Vmáx	S ²	S	A	C	CV
Mapas de Produtividade									
Milho 2012 (kg ha ⁻¹)	830	3773	4063	6548	1354373	1163	-0,61	-0,13	30,84
Soja 2011 (kg ha ⁻¹)	2845	4034	4080	4924	141720	376	-0,55	0,42	9,33
Soja 2010 (kg ha ⁻¹)	2269	3912	3927	5567	374540	612	-0,20	-0,11	15,64
Soja 2009 (kg ha ⁻¹)	940	1594	1591	2446	47484	217	0,15	1,35	13,67
Atributos do Solo									

pH em H ₂ O	5,00	5,49	5,50	5,90	0,03	0,16	0,01	0,28	2,96
Índice SMP	5,60	5,93	5,95	6,20	0,01	0,12	-0,08	-0,15	1,98
Potássio (mg dm ⁻³)	78	132	134	220	589,59	24,28	0,56	1,14	18,28
Fósforo (mg dm ⁻³)	21	46	44	86	215,96	14,70	0,63	-0,22	31,52
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	3,47	4,78	4,62	6,90	0,42	0,65	0,46	0,21	13,60
Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	3,43	5,92	5,97	7,79	0,70	0,83	-0,32	0,25	14,10
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	1,56	2,76	2,75	3,72	0,23	0,48	-0,27	-0,11	17,34
Saturação por Bases (%)	44,92	65,16	65,26	75,96	29,08	5,39	-1,01	2,25	8,28
Soma de bases (cmol _c dm ⁻³)	5,31	9,02	9,00	11,84	1,65	1,28	-0,31	0,21	14,23
Relação Ca:Mg	1,56	2,17	2,12	2,96	0,05	0,22	0,46	0,83	10,04
Relação K:Mg	0,08	0,13	0,12	0,21	0,00	0,03	0,56	0,11	21,62
Relação K:Ca	0,03	0,06	0,06	0,10	0,00	0,01	0,54	0,29	20,19
Sat Cálcio (%)	29,00	42,77	43,05	50,39	12,11	3,48	-0,97	2,29	8,14
Sat Magnésio (%)	12,59	19,92	20,31	24,77	6,05	2,46	-0,56	0,25	12,34
Sat Potássio (%)	1,47	2,47	2,44	3,67	0,20	0,44	0,38	0,06	17,90

Legenda: V_{máx}: Valor máximo; V_{mín}: Valor Mínimo; S²: Variância dos dados; S: Desvio padrão; A: Assimetria; C: Curtose; CV: Coeficiente de variação; H+Al: Hidrogênio+Alumínio (cmol_c dm⁻³); Relação Ca:Mg: Relação Cálcio:Magnésio; Relação K:Mg: Relação Potássio:Magnésio; Relação K:Ca: Relação Potássio:Cálcio; Sat Cálcio: Saturação da capacidade de troca de cátions por cálcio; Sat Magnésio: Saturação da capacidade de troca de cátions por magnésio; Sat Potássio: Saturação da capacidade de troca de cátions por potássio.

A primeira área experimental apresenta 32,8% em níveis de resposta à calagem, segundo a CQFSRS/SC (2004), já a segunda área experimental, segundo CQFSRS/SC (2004), não apresenta necessidade de calagem, oferecendo apenas 1,7% dos pontos com pH inferior a 5,5. Os teores de Ca e Mg encontram-se altos nas duas áreas experimentais, segundo CQFSRS/SC (2004), a média do V na segunda área é 27,45% mais elevada que na primeira área e o teor médio de Ca na segunda área é 117,06% mais elevado que na primeira área experimental, demonstrando que as duas áreas experimentais apresentavam distintas condições químicas (Tabelas 1 e 2).

Tabela 2. Parâmetros estatísticos dos atributos do solo e produtividade das culturas da soja e do milho na segunda área experimental. Não Me Toque, RS.

Variáveis	Vmín	Média	Mediana	Vmáx	S2	S	A	C	CV
Mapas de Produtividade									
Soja 2012 (kg ha ⁻¹)	2689	3659	3625	4437	120425	347	-0,24	0,11	9,48
Milho 2011 (kg ha ⁻¹)	6993	10806	10723	13842	1383427	1176	0,05	-0,05	10,88
Soja 2010 (kg ha ⁻¹)	2716	3777	3757	6074	201391	448	1,23	5,46	11,88
Atributos do Solo									
pH em H ₂ O	5,37	5,96	5,98	6,28	0,03	0,18	-0,55	0,42	3,05
Índice SMP	5,93	6,16	6,15	6,55	0,01	0,11	0,34	0,29	1,82
Potássio (mg dm ⁻³)	162	257	256	348	1277,00	35,74	0,21	-0,11	13,87
Fósforo (mg dm ⁻³)	22	48	47	106	254,71	15,96	1,20	1,96	32,88
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,32	3,66	3,66	4,73	0,21	0,46	0,03	-0,20	12,65
Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	8,82	12,85	12,74	16,73	3,38	1,84	0,04	-0,46	14,30
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	1,68	4,51	4,45	5,95	0,28	0,53	-0,90	6,16	11,84
Saturação por Bases (%)	76,34	83,05	83,21	87,03	5,40	2,32	-0,54	-0,18	2,80
Soma de bases (cmol _c dm ⁻³)	11,74	18,01	17,91	22,13	3,15	1,78	-0,22	0,84	9,86
Relação Ca:Mg	1,90	2,91	2,91	5,65	0,42	0,65	0,62	1,38	22,24
Relação K:Mg	0,09	0,15	0,15	0,32	0,00	0,03	1,39	5,95	21,68
Relação K:Ca	0,03	0,05	0,05	0,07	0,00	0,01	0,37	-0,07	14,80
Sat Cálcio (%)	48,70	59,05	59,23	66,56	18,50	4,30	-0,34	-0,50	7,28
Sat Magnésio (%)	11,38	20,96	20,52	27,40	10,45	3,23	0,19	-0,55	15,42
Sat Potássio (%)	2,17	3,05	2,99	4,16	0,15	0,38	0,42	0,10	12,60

Legenda: Vmáx: Valor máximo; Vmín: Valor Mínimo; S²: Variância dos dados; S: Desvio padrão; A: Assimetria; C: Curtose; CV: Coeficiente de variação; H+Al: Hidrogênio+Alumínio (cmol_c dm⁻³); Relação Ca:Mg: Relação Cálcio:Magnésio; Relação K:Mg: Relação Potássio:Magnésio; Relação K:Ca: Relação Potássio:Cálcio; Sat Cálcio: Saturação da capacidade de troca de cátions por cálcio; Sat Magnésio: Saturação da capacidade de troca de cátions por magnésio; Sat Potássio: Saturação da capacidade de troca de cátions por potássio.

Optou-se pela utilização da ACP, pois é uma ferramenta eficiente na investigação de um banco de dados com grande número de variáveis e informações. Na ACP, cada sítio tem um valor para cada componente. Esses componentes apresentam-se como “super variáveis”, construídas pela combinação da correlação entre as variáveis e são extraídas em ordem decrescente de importância, em termos de sua contribuição para a variação total dos dados (Silva et al., 2010; Cherubin et al., 2011).

Na ACP, em ambas as áreas experimentais, optou-se por utilizar apenas os cinco primeiros componentes principais (CPs) que apresentaram autovalores acima de um, acumulando 85,56 e 87,92% da variância total dos dados, na primeira e segunda área experimental respectivamente (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3. Análise de componentes principais dos atributos do solo e rendimento de grãos da primeira área experimental.

Componentes da variância		Componentes Principais (CPs)				
		1	2	3	4	5
Autovalores		8,09	3,47	3,03	1,86	1,53
Proporção (%)		38,52	16,52	14,41	8,85	7,27
Proporção Acumulada (%)		38,52	55,04	69,45	78,29	85,57
N	Atributos	Correlação com os componentes principais				
Mapas de Produtividade						
1	Milho-Safra 2012	0,0265	0,0007	0,0556	0,0863	0,0035
2	Soja-Safra 2011	0,0189	0,0189	0,0440	0,0932	0,0029
3	Soja-Safra 2010	0,0192	0,0051	0,1812	0,0020	0,0065
4	Soja- Safra 2009	0,0176	0,0084	0,1351	0,0224	0,0137
5	Média Normalizada das Culturas	0,0436	0,0015	0,1804	0,0049	0,0016
6	Media Normalizada de Soja	0,0310	0,0013	0,2084	0,0351	0,0000
Atributos de solo						
7	pH em H ₂ O	0,0641	0,0139	0,0330	0,0152	0,0000
8	Índice SMP	0,0591	0,0206	0,0056	0,0029	0,2708
9	Potássio (mg dm ⁻³)	0,0057	0,2221	0,0010	0,0251	0,0762
10	Fósforo (mg dm ⁻³)	0,0000	0,0049	0,0235	0,1641	0,0143
11	Hidrogênio+Alumínio (cmol _c dm ⁻³)	0,0614	0,0211	0,0064	0,0025	0,2593
12	Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	0,0830	0,0053	0,0085	0,0693	0,0745
13	Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	0,0944	0,0000	0,0193	0,0044	0,0985
14	Saturação por bases (%)	0,1131	0,0054	0,0105	0,0037	0,0116
15	Soma de bases (cmol _c dm ⁻³)	0,0933	0,0005	0,0121	0,0237	0,0947
16	Relação Cálcio:Magnésio	0,0216	0,0123	0,0157	0,2702	0,0342
17	Relação Potássio:Magnésio	0,0397	0,1469	0,0222	0,0404	0,0011
18	Relação Potássio:Cálcio	0,0200	0,2250	0,0085	0,0039	0,0044
19	Saturação da capacidade de troca de cátions por cálcio	0,0936	0,0001	0,0048	0,0667	0,0315
20	Saturação da capacidade de troca de cátions por magnésio	0,0942	0,0070	0,0194	0,0594	0,0003
21	Saturação da capacidade de troca de cátions por potássio	0,0002	0,2788	0,0049	0,0044	0,0003

O primeiro componente principal, que explica 38,52% da variância total dos dados, conforme a Tabela 3, o atributo preponderante no conjunto de dados foi o V, seguido dos teores de Ca, Mg, Sat Ca, Sat Mg e SB. Pode estar havendo um ambiente com crescimento das raízes reduzido, sendo afetado pela deficiência de cálcio, sobre tudo a deficiência de bases, limitando a absorção de água e de nutrientes com consequente redução na produtividade das culturas (Sousa & Lobato, 2004; Moreira et al., 2005). Para o segundo CP, responsável por 16,52% da variância, na primeira área identifica-se a Sat K e o teor no solo como os principais atributos a influenciar na ACP e sobre tudo a sua relação com as demais bases.

Tabela 4. Análise de componentes principais dos atributos do solo e produtividade das culturas de soja e milho na segunda área experimental.

Componentes da variância		Componentes Principais (CPs)				
		1	2	3	4	5
Autovalores		7,28	3,67	3,29	1,78	1,57
Proporção (%)		36,42	18,34	16,43	8,88	7,85
Proporção Acumulada (%)		36,42	54,76	71,19	80,07	87,92
N	Atributos	Correlação com os componentes principais				
Mapas de Produtividade						
1	Soja-Safra 2012	0,0758	0,0116	0,0024	0,0197	0,0262
2	Milho-Safra 2011	0,0397	0,0495	0,0014	0,0920	0,0438
3	Soja-Safra 2010	0,0124	0,0201	0,0671	0,0006	0,3122
4	Média Normalizada das Culturas	0,0830	0,0211	0,0345	0,0114	0,0771
5	Media Normalizada de Soja	0,0586	0,0016	0,0472	0,0041	0,2518
Atributos de solo						
6	pH em H ₂ O	0,0024	0,1406	0,0000	0,0001	0,0198
7	Índice SMP	0,0000	0,2323	0,0151	0,0025	0,0145
8	Potássio (mg dm ⁻³)	0,0247	0,0093	0,1586	0,1046	0,0116
9	Fósforo (mg dm ⁻³)	0,0011	0,0068	0,0257	0,1191	0,0079
10	Hidrogênio+Alumínio (cmol _c dm ⁻³)	0,0001	0,2366	0,0136	0,0017	0,0123
11	Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	0,1111	0,0028	0,0015	0,0572	0,0256
12	Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	0,0536	0,0078	0,0281	0,2405	0,0057
13	Saturação por bases (%)	0,0293	0,1819	0,0021	0,0501	0,0000
14	Soma de bases (cmol _c dm ⁻³)	0,0803	0,0058	0,0050	0,1694	0,0189
15	Relação Cálcio:Magnésio	0,1136	0,0002	0,0074	0,0445	0,0137
16	Relação Potássio:Magnésio	0,0522	0,0112	0,1460	0,0362	0,0031

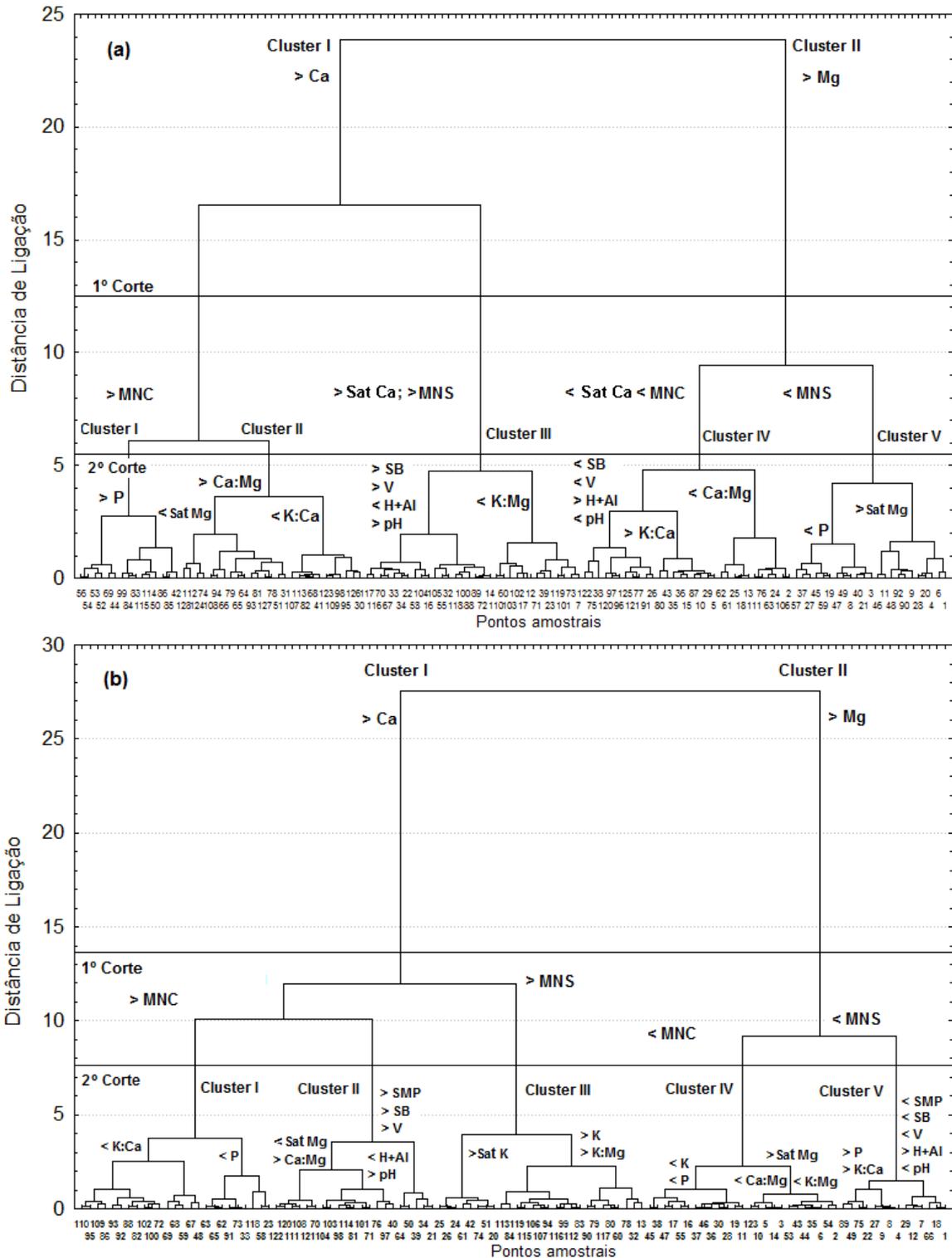
17	Relação Potássio:Cálcio	0,0319	0,0200	0,1699	0,0054	0,0657
18	Saturação da capacidade de troca de cátions por cálcio	0,1181	0,0259	0,0020	0,0006	0,0159
19	Saturação da capacidade de troca de cátions por magnésio	0,1121	0,0104	0,0078	0,0363	0,0207
20	Saturação da capacidade de troca de cátions por potássio	0,0001	0,0044	0,2645	0,0039	0,0535

Conforme a Tabela 4, na segunda área experimental, pode-se constatar que o Ca, relação Ca:Mg, Sat Ca e Sat Mg foram os atributos preponderantes no conjunto de dados para o primeiro CP, o que contém a maior porcentagem da variância total dos dados originais, com 36,42% da variância, portanto o mais importante. A relação Ca:Mg presente entre os atributos preponderantes no primeiro CP, pode ser destacada como efeito secundário dos teores de Ca e Mg (Quaggio, 2000), sendo importante manter adequados os teores de Ca e Mg ao invés de buscar uma relação ideal entre esses nutrientes (Benites et. al., 2009). Relações extremas afetam as plantas, porém tal fato não revela ser efeito direto da relação Ca:Mg, mas sim da possível deficiência de um ou outro nutriente (Demattê, 2011).

No segundo CP, contribuinte de 18,34% da variância dos dados, o teor de H+Al, índice SMP, pH em água e V aparecem como os atributos preponderantes. A interação entre cátions (Ca, Mg e K) é citada como fator de interferência na produtividade e nutrição de plantas (Büll, 1993; Marschener, 1997), segundo esses autores, há inibição competitiva desses nutrientes pelo mesmo sítio do carregador para absorção (Nogara Neto, 2011). Na primeira área, onde a V é na média 21,54%, o teor mínimo é 41,17% mais baixo do que a segunda área, a Sat Mg parece não estar interferindo na produtividade. Na segunda área experimental, como os teores médios das Sat Ca e Sat Mg são altos (59,05% e 20,96%) e a V conseqüentemente é alta (83,05%), a produtividade foi negativamente interferida pela Sat Mg. A primeira área experimental corrobora com o reportado por Nogara Neto (2011), trabalhando com Sat Mg baixas, em que resposta da produtividade de grãos estaria ligada positivamente ao elemento Mg.

Os valores relativos de contribuição na ACP, mesmo em magnitude numérica baixa, são importantes, pois a amostra é significativa. A partir da análise dos dados, observa-se ser de maior importância a quantidade que cada base contribui na V quando essa eleva-se no solo. Desta forma, é possível considerar que pela ACP identificaram-se as principais fontes de variação no conjunto de dados observados. Com bases nos resultados obtidos, referente à variabilidade dos atributos do solo, identifica-se o desbalanço de cátions em ambas as áreas experimentais.

Para complementar a ACP, foi realizada a análise de agrupamento hierárquico – Cluster (HCA), utilizando método de ligação Ward e tendo como medida de similaridade 1-Pearson r, para melhor agrupar os pontos amostrados em função do comportamento das variáveis medidas nos mesmos. O HCA permitiu organizar dados observados em estruturas que façam sentido ou como desenvolver taxonomias capazes de classificar dados observados, construindo-se uma hierarquia de grupos, no estilo de uma árvore. Agrupam-se pontos amostrais com estrutura ou comportamento similares e afastam-se os com maiores diferenças dentro do banco de dados.



Legenda: MNC: Média normalizada das culturas; MNS: média normalizada de soja ; pH: pH em H₂O; SMP: índice SMP; K: Potássio(mg dm⁻³); P: Fósforo mg dm⁻³); H+Al: Hidrogênio+Alumínio (cmol_c dm⁻³); Ca: Cálcio (cmol_c dm⁻³); Mg: Magnésio (cmol_c dm⁻³); V: Saturação por bases (%); SB: Soma de bases (cmol_c dm⁻³); Ca:Mg: Relação Cálcio:Magnésio; K:Mg: Relação Potássio:Magnésio; K:Ca: Relação Potássio:Cálcio; Sat Ca: Saturação da capacidade de troca de cátions por cálcio; Sat Mg: Saturação da capacidade de troca de cátions por magnésio; Sat K: Saturação da capacidade de troca de cátions por potássio.

Figura 1. (a) Dendrograma dos 128 pontos investigados da primeira área experimental; (b) dendrograma dos 112 pontos investigados da segunda área experimental.

Nos dendrogramas (Figura 1) são encontradas as distâncias de ligação de 24 e 28 (1-r Person), respectivamente, para a primeira e segunda área experimental. Observou-se um comportamento semelhante em ambos os dendrogramas, pois o número de agrupamentos formados no primeiro corte realizado na metade da maior distância observada foi muito próximo, sendo igual no segundo corte, realizado a critério do pesquisador (Vicini, 2005), cinco grupos em ambos os talhões. Quanto menor a distância de ligação de um ponto em relação a outro maior a similaridade entre os mesmos, formando então um grupo homogêneo em relação aos atributos mensurados.

Em ambos os dendrogramas, os principais agrupamentos formados foram influenciados principalmente pelo comportamento de Ca e Mg, entre outras causas, sendo coerente, pois o principal CP na ACP foi preponderantemente formado pelos atributos correspondentes a estes dois macronutrientes, o que caracteriza a presença de interação negativa entre esses cátions (Malavolta et al., 1997; Epstein & Bloom, 2005). O excesso de Ca em relação ao Mg na solução do solo pode prejudicar a absorção desse último, assim como o excesso de Mg também prejudica a absorção de cálcio, o mesmo ocorrendo com relação ao K (Malavolta et al., 1997; Gomes et al., 2002; Moreira et al., 2005).

No segundo corte, o número de agrupamentos foi similar ao número de CPs significativos (cinco), aumentando o grau de dissimilaridade entre os pontos, gerando mais grupos, com menor variância interna em relação aos de agrupamentos. Isso significa que outros elementos passaram a influenciar esses grupos menores e intraespecíficos. O resultado desta análise foi satisfatório, pois os agrupamentos ficaram com tamanhos similares, o que é desejável (Lattin et al., 2011). Com isso, a HCA cumpriu o seu objetivo, segundo Hair Jr. et al. (2005), pois se agruparam pontos similares, formando grupos com menor variância interna em relação a total, com uma quantidade de agrupamentos administrável, no caso cinco.

Ambos os métodos estatísticos mostraram-se apropriados para identificar e avaliar a importância dos principais atributos, no caso somente de solo, responsáveis pela variabilidade espacial das culturas analisadas. A partir da premissa delimitada pelas análises de ACP e HCA, em que, de um modo geral, para ambas as áreas experimentais, pode-se constatar que o equilíbrio nutricional de cátions foi o grupo de atributos que melhor explicou a variabilidade das produtividades, buscou-se encontrar números em que estes foram mais expressivos.

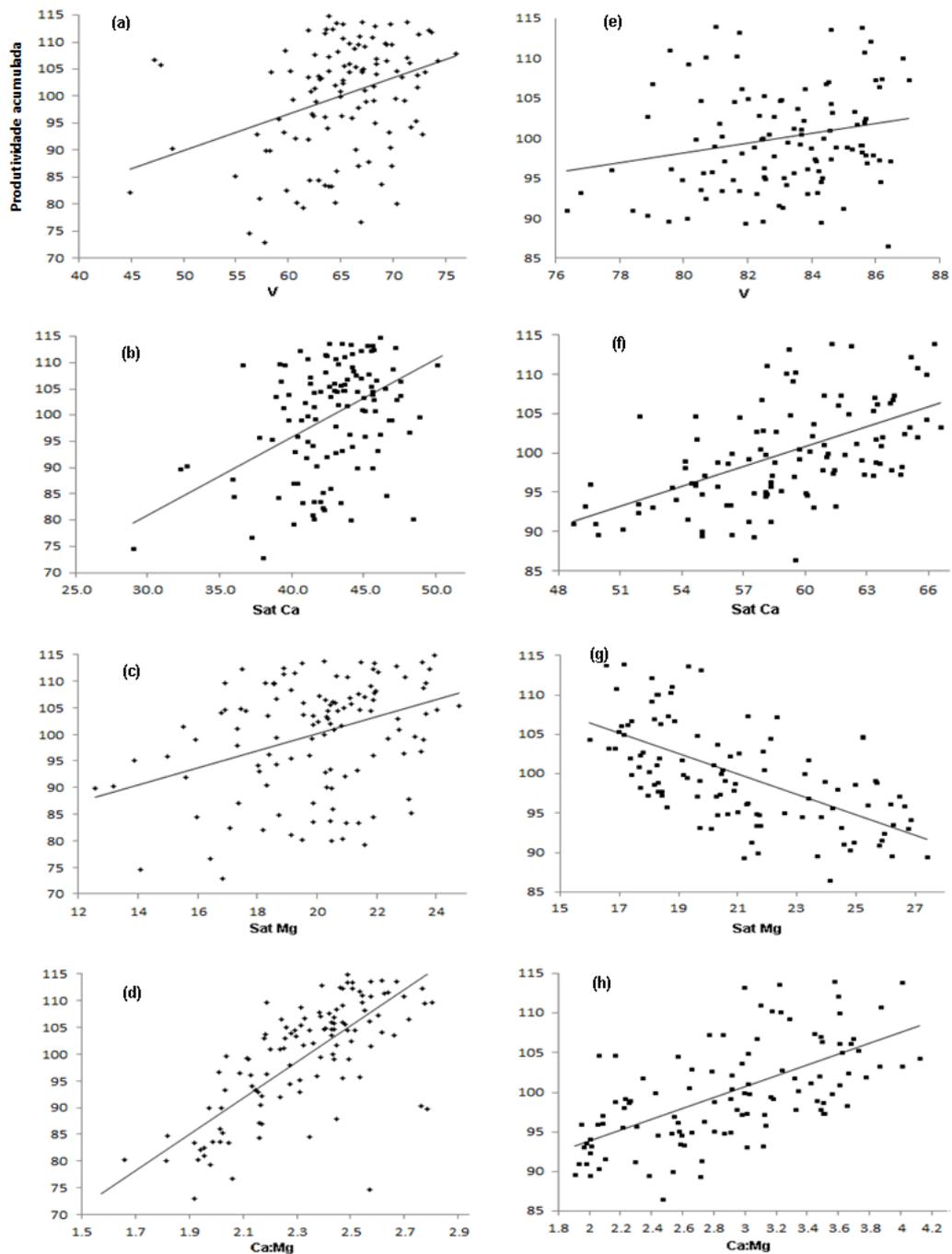
Tabela 5. Análise das condicionantes de regressão para a primeira e segunda área experimental.

Relações	Equação	R ²	CV	F	W	ShW	DW
Primeira área experimental							
V <i>versus</i> MNC	0,9550x + 37,7709	0,1741	11,26	26,56 p < 0,0001	4,26 p 0,1186	0,97 p 0,1029	1,15 p 0,05
Sat Ca <i>versus</i> MNC	1,4834x + 36,5619	0,1748	11,25	26,69 p < 0,0001	1,82 p 0,4027	0,97 p 0,1645	1,14 p 0,05
Sat Mg <i>versus</i> MNC	1,6040x + 68,0498	0,1020	11,74	14,32 p 0,0002	6,10 p 0,0474	0,96 p 0,0088	1,09 p 0,05
Ca:Mg <i>versus</i> MNC	33,5544x + 21,4093	0,5688	8,14	166,19 p < 0,0001	2,60 p 0,2722	0,94 p < 0,0001	1,34 p 0,05
Segunda área experimental							
V <i>versus</i> MNC	0,5885x + 51,1147	0,0403	6,64	4,53 p 0,0355	0,02 p 0,9914	0,97 p 0,0467	1,24 p 0,05
Sat Ca <i>versus</i> MNC	0,8325x + 50,7958	0,2816	5,74	42,34 p < 0,0001	3,00 p 0,2230	0,97 p 0,0510	1,58 p 0,05
Sat Mg <i>versus</i> MNC	1,2808x + 126,8691	0,3406	5,50	55,78 p < 0,0001	2,30 p 0,3168	0,96 p 0,0236	1,67 p 0,05
Ca:Mg <i>versus</i> MNC	6,7751x + 80,3640	0,3548	5,44	59,38 p < 0,0001	2,10 p 0,3502	0,96 p 0,9673	1,67 p 0,05

Legenda: MNC: Média normalizada das culturas; Sat Ca: Saturação da capacidade de troca de cátions por cálcio (%); V: Saturação por bases (%); Sat Mg: Saturação da capacidade de troca de cátions por magnésio (%); Ca:Mg: Relação Cálcio:Magnésio; R²: Coeficiente de determinação; CV: Coeficiente de Variabilidade; F: Teste de Sigificância; W: Teste de White; ShW: Teste de Shapiro-Wilk; DW: Teste Durbin-Watson.

Conforme a Tabela 5, os dados de Sat Ca, Sat Mg, V, Ca:Mg e MNC foram modelados sem haver transformações, devido a maioria das regressões realizadas terem atendido a pelo menos duas condicionantes de regressão, homogeneidade de variâncias e normalidade. Segundo o Teste de White, os dados não apresentaram heterogeneidade de variâncias. O mesmo não aconteceu para normalidade e independência dos resíduos em que

nem todas as regressões apresentaram normalidade, pelo teste de Shapiro-Wilk, e correlação positiva em série, pelo teste Durbin-Watson, significando que os resíduos carregam informações da MNC devido à ausência de variáveis relevantes no modelo, explicando os baixos R^2 observados, isso porque foram analisadas somente com variáveis edáficas em uma amplitude de área expressiva.



MNC: Média normalizada das culturas; V: Saturação por bases (%); Sat Ca: Saturação da capacidade de troca de cátions por cálcio (%); Sat Mg: Saturação da capacidade de troca de cátions por magnésio (%); Ca:Mg: Relação Cálcio:Magnésio.

Figura 2. Relação da MNC com os cátions determinantes: **(a)** V *versus* MNC (1^o área); **(b)** Sat Ca *versus* MNC (1^a área); **(c)** Sat Mg *versus* MNC (1^a área); **(d)** Ca:Mg *versus* MNC (1^a área); **(e)** V *versus* MNC (2^a área); **(f)** Sat Ca *versus* MNC (2^a área); **(g)** Sat Mg *versus* MNC (2^a área); **(h)** Ca:Mg *versus* MNC (2^a área).

Na figura 2(a), observa-se uma tendência de elevação da MNC em resposta à elevação da V. Na figura 2(e), segunda área experimental, observa-se que a resposta não é tão expressiva quanto na primeira área experimental, porém com a mesma tendência. O V, na primeira área, situa-se entre 45% e 75% e o V, na segunda área, situa-se entre 76% e 88%, fator que pode explicar a diferença entre as tendências de MNC entre as duas áreas.

Com relação à influência da Sat Ca na MNC, é possível identificar aumentos expressivos para ambas as áreas (figura 2 b, f) em que em cada ponto percentual de elevação da Sat Ca pode-se identificar um acréscimo de 0,75% e 0,85% da MNC na primeira e segunda área, respectivamente. A cada ponto percentual elevado na Sat Mg da primeira área experimental gerou-se a elevação 1,66% de aumento da MNC (figura 2 c), contrapondo a realidade da segunda área em que a cada ponto percentual elevado da Sat Mg gerou-se a diminuição de 0,7% da produtividade (figura 2 (g)). A relação Ca:Mg, em ambas as áreas, apresentou-se elevações crescentes da produtividade com 35% e 6,5% de elevação da MNC para cada ponto elevado da relação Ca:Mg, respectivamente para a primeira e segunda área experimental (figura 2 d,f)

De acordo com os dados da Figura 2 (a, b, c, d), a MNC responde crescentemente para todos os atributos utilizados na primeira área experimental. Os valores dos atributos são inferiores a segunda área, o que pode estar influenciando positivamente no aumento de produtividade. Na segunda área experimental, em que a V é mais elevada, o equilíbrio entre a Sat Ca e Sat Mg foi determinante, demonstrando que com a elevação da Sat Mg ocorreu decréscimo da MNC, expressado pela relação Ca:Mg, em que mediante elevação do teor de Ca em relação ao de Mg, obteve-se melhores produtividades (Figura 2 e, f, g, h). O mesmo comportamento com os teores de Ca e Mg no solo foi observado. Segundo Malavolta et al. (1997), esses elementos competem pelos mesmos sítios de absorção, sendo essa inibição do tipo competitiva.

4. CONCLUSÃO

As análises baseadas nos componentes principais e agrupamento hierárquico - Cluster propiciaram possibilidade de análise e interpretação dos dados nas áreas experimentais, possibilitando esclarecer quais atributos do solo estão contribuindo com a variabilidade da produtividade das culturas e permitindo estabelecer quais os atributos condicionantes como prioridades de intervenção.

Os teores e o equilíbrio de cátions foi o fator que melhor explicou a variabilidade da produtividade das culturas de soja e milho nas duas áreas experimentais. Na primeira área experimental, o acréscimo de produtividade está sendo explicado pela elevação dos atributos Sat Ca, Sat Mg, V e Ca:Mg, indicando a necessidade de calagem. Na segunda área experimental, a elevação do atributo Sat Mg está comprometendo o rendimento das culturas, contrapondo a Sat Ca, V e Ca:Mg que estão elevando a produtividade das culturas de milho e soja na área experimental.

5. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O presente estudo possibilitou a identificação dos nutrientes e suas relações que influenciaram na variabilidade da produtividade das culturas de soja e milho do experimento, porém não foi possível determinar quais são os teores ideais e suas relações para a obtenção de maior produtividade. A partir destes resultados foi identificada a necessidade de estudos e experimentos a campo com diferentes teores destes nutrientes e suas relações para que seja possível subsidiar a indicação de recomendações técnicas na agricultura de precisão visando a maximizar a produtividade e a minimizar os efeitos decorrentes de limitações existentes entre as relações dos teores dos nutrientes no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA, P.J.; AMADO, T.J.C.; GIOTTO, E.; SCHOSSLER, D.S.; FIORIN, J.E.; Agricultura de precisão: mapas de rendimento e de atributos de solo analisados em três dimensões. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, n.13, p. 29-41, 2011.

AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.; LANZANOVA, M.; SANTI, A.L.; LOVATO, T. A compactação pode comprometer os rendimentos de áreas sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, n.89, p.34-42, 2005.

AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.; LANZANOVA, M.; SANTI, A.L.; LOVATO, T. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.42, n. 8, p.1101-1110, 2007.

AMADO, T.J.C. & SANTI, A.L. Agricultura de precisão aplicada ao aprimoramento do manejo do solo. In: FIORIN, J.E., ed. **Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto**. Passo Fundo, Berthier, 2007. p.99-144.

AMADO, T.J.C.; PES, L.Z.; LEMAINSKI, C.L.; SCHENATO, R.B. Atributos químicos e físicos de Latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.831-843, 2009.

BALASTREIRE, L.A. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade da cultura do milho. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.8, n.1, p.97-111, 1997.

BEAR, F. E.; TOTH, S. J. Influence of calcium on availability of other soil cations. **Soil Science**, v. 65, n. 1, p. 69-74, 1948.

BLACKMORE, B.S.; GODWIN, R.J.; FOUNTAS, S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. **Biosystems Engineering**, v.84, p.455-466, 2003.

BÜLL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. **Cultura do Milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba – SP: POTAFÓS, 1993. p.62-145.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.;

BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.769-850, 2007.

CHERUBIN, M.R.; SANTI, A.L.; BASSO, C.J.; EITELWEIN, M.T.; VIAN, A.L. Caracterização e estratégias de manejo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo utilizando a análise dos componentes principais. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, p.196-210, 2011.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO–CQFSRS/SC. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul**, 2004. 400p.

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

DAMPNEY, P.M.R.; MOORE, M. Precision agriculture in England: current practice and research-based advice to farmers. In: International conference on precision agriculture, 4., 1998, St. Paul. **Proceedings**. Madison: American Society of Agronomy, 1999. p.661-673.

DEMATTE, J. L. I. Ação do gesso e do calcário na relação cálcio: magnésio do solo e na produtividade da cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**(POTAFÓS – encarte técnico). 2011 n.136.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Embrapa Produção da Informação**, Brasília, 2006. 306p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. 400p.

GIOTTO, A.; ROBAINA, A.D. & SULZBACH, L. **Agricultura de precisão com o sistema CR Campeiro 7**, Santa Maria, 2010. 330p.

GOMES, F.T.; BORGES, A.C.; NEVES, J.C.L.; FONTES, P.C.R. Influência de doses de calcário com diferentes relações cálcio:magnésio na produção de matéria seca e na

composição mineral da alfafa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 12, p. 1779-1786, 2002.

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

HAIR J.; J.F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W.C. Multivariate data analysis. 5. ed. Prentice-Hall, 1998. SANT' ANA, A. S.; NETO, A. C. Análise multivariada de dados. 5. ed. São Paulo: **Bookman/Artmed**. Tradução, 2005.

KELLING, K. A.; PETERS, J. B. The advisability of using cation balance as a basis for fertilizer recommendations. In: **2004 Wisconsin Fertilizer, Aglime, & Pest Management Conference Proceedings**. 2004.

KÖPPEN, W. Grundriss der klimakende. Leipzig: **Walter de Gruyter**, Berlin, 1931, 388p.

LATTIN, J. M.; CARROL, J. D; GREEN, P. E. **Análise multivariada de dados**. AVRITSCHER, H. (Tradutor), São Paulo: Cenage Learning, 2011. 455p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba-SP; POTAFOS, 1997. 319p.

MALLARINO, A. P.; WITTRY, D. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. **Precision Agriculture**, v.5, p.131-144, 2004.

MASCARENHAS, H.A.A.; TANAKA, R.T. Soja. In: In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, A.J.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2ed. Campinas: IAC, 1996. p. 202. (Boletim Técnico, 100).

MENEGATTI, L.A.A.; MOLIN, J.P. Remoção de erros em mapas de produtividade via filtragem de dados brutos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, n.1, p.126-134, 2004.

MILANI, L.; SOUZA, E.G. de; URIBE-OPAZO, M.A.; GABRIEL FILHO, A.; JOHANN, J.A.; PEREIRA, J.O. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.28, p.591-598, 2006.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v.22, p.83-92, 2002.

MOLIN, JOSÉ PAULO. Tendências da agricultura de precisão no Brasil. In: **Congresso Brasileiro De Agricultura De Precisão**, Piracicaba. 2004.

MUNHOZ HERNANDEZ, R. J. & SILVEIRA R. I. Efeito da Saturação de bases, relação Ca:Mg no solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição mineral de milho (*Zea mays* L.) **Sci. Agric.**v.55, p79-85, n. 1, 1998.

NOGARA NETO, F.; ROLOFF, G.; DIECKOW, J.; MOTTA, A.C.V. Atributos de solo e cultura espacialmente distribuídos relacionados ao rendimento do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1025-1036, 2011.

QUAGGIO, A. J. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: IAC, 200. 111 p.

REHM, G.. Soil cation ratios for crop production. **North Central Regional Extension Publication**, v. 533, 1994.

ROLOFF, G.; FOCHT, D. & SCHIEBELBEIN, L.M. Mining regional spatial field data for cause and effect relations involving soybeans yield. In: International Conference on Precision Agriculture, 8., St. Paul, 1998. Proceedings. St. Paul, **American Society of Agronomy, Crop Science Society of America e Soil Science Society of America**, 2006.

ROSA-FILHO, G.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F.F.S. & GIOIA, M.T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.283-293, 2009.

SANTI, A.L.; AMADO, T.J.C.; CHERUBIN, M.R.; MARTIN, T.N.; PIRES, J.L.; FLORA, L.P.D.; BASSO, C.J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.1346-1357, 2012.

SFREDO, G. J. **Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral**. Embrapa Soja, 2008.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, v.155, p.55-66, 2010.

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

SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416p

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. Ed.ver.e mpl. Porto Alegre: **Departamento de Solos da UFRGS**, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos 5)

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

VICINI, L. Análise multivariada da teoria a prática. **Santa Maria: CCNE-UFSM**, 215p. 2005.

WARRICK, A.W. & Nielsen, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D., ed. Applications of Soil Physics. New York, **Academic Press**, 1980. p.319-344.