



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

STANISLAS MAYI III

**FERRAMENTAS PARA LEVANTAMENTO DETALHADO DE
SOLOS NA ESCALA DA PARCELA AGRÍCOLA**

Londrina
2012

STANISLAS MAYI III

**FERRAMENTAS PARA LEVANTAMENTO DETALHADO DE
SOLOS NA ESCALA DA PARCELA AGRÍCOLA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina.

Orientadora: Profa. Dra. Maria de Fátima Guimarães.

Coorientador: Pesquisador Dr. Edemar Joaquim Corazza.

Londrina
2012

**Catálogo na publicação elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da Universidade Estadual de Londrina.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

M469f Mayi III, Stanislas
Ferramentas para levantamento detalhado de solos na escala da parcela agrícola. / Stanislas Mayi III – Londrina, 2012. 96 f.

Orientador: Maria de Fátima Guimarães
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Estudos Sociais Aplicado, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2012.

1. Latossolos – Teses. 2. Cerrado – Teses. 3. Predição espacial. I. Mayi III, Stanislas. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Estudos Sociais Aplicado. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

CDU 631.47

STANISLAS MAYI III

**FERRAMENTAS PARA LEVANTAMENTO DETALHADO DE SOLOS
NA ESCALA DA PARCELA AGRÍCOLA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina.

BANCA EXAMINADORA

Pesquisador. Dr. Michel Brossard
Institut de Recherche pour le Développement

Pesquisador. Dr. Robélio Leandro Marchão
Embrapa Cerrados

Prof. Dr. João Tavares Filho
UEL – Londrina - Pr

Prof. Dr. Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame
UEL – Londrina - Pr

Profa. Dra. Maria de Fátima Guimarães
Orientadora
UEL – Londrina - Pr

Londrina, 27 de fevereiro de 2012.

À minha Tia Ngo Yenque Mireille Colette
(In memoriam) pelo apoio e incentivo para
minha viagem ao Brasil.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela benção, a força espiritual e física.

Agradeço a minha orientadora Maria de Fátima Guimarães, não só pela constante orientação neste trabalho, mas sobretudo pela sua amizade e pelo carinho.

Ao pesquisador Dr. Edegar Joaquim Corazza pela orientação ao longo do projeto. Aos pesquisadores Robélio Leandro Marchão, Michel Brossard, Adriana Reatto dos Santos Braga, Éder de Souza Martins, Sandro Carmelino Hurtado e Marcos Aurélio Carolino de Sá pela contribuição científica neste projeto.

A Cristiane Rodrigues (Solocria) pelas análises de mineralogia e a Nelson Camargos Moreira pela ajuda nas análises físicas.

Ao pesquisador Juaci Vitória Malaquias pela ajuda nas análises estatísticas.

Aos professores Dr. Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame, Dr. João Tavares Filho e Dr. Osmar Rodrigues Brito pelas críticas. Ao meu colega José Francirlei de Oliveira pela ajuda, amizade e críticas e a Vinícius Vasconcellos de Souza pela ajuda com os mapas.

Aos proprietários da Fazenda Alto Alegre pela moradia e ajuda no trabalho de campo durante este projeto.

A Sua Excelência Serge Amouga e a Sra. Philomene Essimi.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES- PEC/PG) pela concessão da bolsa de estudo.

A Embrapa Cerrados, por disponibilizar boa parte de suas instalações para realização deste trabalho.

A Universidade Estadual de Londrina, em particular ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, por ter me aceitado como aluno.

A secretária Weda Aparecida Westin e professoras Dra. Carmen Silvia Vieira Janeiro Neves e Dra. Inês Cristina de Batista Fonseca pelo carinho.

Ao meu amigo professor Dr. Glenio Guimarães Santos, e aos professores Dr. Ricardo Ralisch e Dr Pedro Manuel O. J. Neves.

Ao meu amigo Cícero Lemes e a família Newton de Oliveira Ávila.

A minha família.

*“conhecer vocês é a maior graça que eu poderia
receber” (Exalta Samba)*

MAYI III, Stanislas. **Ferramentas para levantamento detalhado de solos na escala da parcela agrícola**, 2012. 96 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

RESUMO

No Brasil registra-se uma carência de mapas detalhados que possam descrever adequadamente a variabilidade dos solos e subsidiar a tomada de decisão em escala de parcela agrícola para manejo sustentável dos mesmos. Para preencher esta lacuna buscam-se ferramentas que possam amenizar o tempo e os custos do levantamento dos solos. O objetivo desta tese consistiu em avaliar a contribuição das técnicas de geoestatística, do modelo digital de elevação (MDE) e das funções de pedotransferência como ferramentas auxiliares no levantamento detalhado de solo em escala de parcela agrícola. O estudo foi realizado em duas áreas agrícolas do Cerrado, onde foram coletadas amostras deformadas e indeformadas em 80 e 97 pontos georreferenciados na Gleba 1 e Gleba 2, para análises físicas, químicas e mineralógicas. Foi realizada análise descritiva dos dados e a variabilidade espacial foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas. Para auxiliar a determinação das unidades de solo em cada área foi utilizado o método de agrupamento não hierárquico *K-means*. Em cada unidade determinada foi feita a descrição morfológica de um ou dois perfis modais e para cada área foi confeccionado o mapa de solo na escala 1:20.000. Concomitante à determinação das unidades dos solos, as áreas foram divididas em unidades de mapeamentos utilizando-se os atributos derivados do modelo digital de elevação. Para investigar as relações solo-paisagem foram utilizadas as seguintes ferramentas estatísticas: correlação linear de Spearman's Rho, matriz de erro, índice kappa e exatidão geral. Foram desenvolvidas ainda funções de pedotransferência (FPTs), com um banco de dados de diversas regiões do Brasil, para estimar o teor dos óxidos de silício, de ferro e de alumínio nos Latossolos, mediante análise de regressões lineares múltiplas stepwise e validadas na escala regional e da parcela agrícola. Para a validação estatística das FPTs utilizou-se duas séries de dados independentes de 147 amostras cada de extensão regional e local (propriedade agrícola). As FPTs foram avaliadas na base do erro médio de predição (MPE) e do desvio padrão dos erros de predição (SDPE). Com exceção dos óxidos de silício na Gleba 1, e da gibbsita, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, saturação de bases e delta pH na superfície na Gleba 2, que apresentaram efeito pipeta puro, os demais atributos de solos analisados neste estudo apresentaram dependência espacial e alcance variando de 283 m a 1000 m, possibilitando assim a estimação destes atributos em pontos não amostrados. Os solos foram identificados como LATOSSOLO VERMELHO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO, sendo que as principais diferenças entre as unidades de solos encontram-se nos níveis categóricos mais baixos. O modelo digital de elevação permitiu definir unidades de mapeamento de solos com precisão de 55 e 74 % nas Glebas 1 e 2, respectivamente, indicando que esta ferramenta pode subsidiar no levantamento detalhado das propriedades agrícolas, com restrição para áreas de desnivelamento menor que 73m, onde é necessária a inclusão de outros atributos, como cor de solo, p.e.. As funções de pedotransferência elaboradas para os teores de óxidos de silício e de alumínio nos Latossolos são promissoras para estimar os óxidos de silício na escala regional e da parcela agrícola enquanto as elaboradas para os óxidos de ferro se revelaram não viáveis para estimação deste atributo.

Palavras – chave: Latossolos. Cerrado. Predição espacial.

MAYI III, Stanislas: **Auxiliary tools for detail soil survey in agriculture field scale.** 2012. 96 p. Thesis (Post-Graduate Programme in Agronomy) - Departamento Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

ABSTRACT

In Brazil, it is noticed a lack of detailed maps that can properly describe the variability of soil attributes and subsidize in sustainable management of soil resources in agricultural field scale. To fill this gap alternative tools which can reduce time and cost of detail soil survey in agricultural field scale are needed. The objective of the thesis consists to evaluate the contribution of geostatistic techniques, the digital elevation model (MDE) and pedotransfer functions as auxiliary tools in the detailed survey. The study was carried out in two agricultural fields, Field 1 and Field 2. Disturbed and undisturbed samples were taken in 97 and 80 georeferenced points in Field 1 and Field 2 respectively for physical, mineralogical and chemical analyses. It was carried out descriptive analysis and the spatial variability was analyzed by fitting experimental semivariogram models to the data. For determination of soil map units present in each field, clustering method with Ward the algorithm was used. In each map unit, the morphologic description of one or two representative profile was made and soil map in 1:20.000 was addressed for each area. Concomitant to this, the two fields had been divided in map units using only of the relief attributes derived from the digital elevation model. To investigate the soil-landscape relationship, it was used linear correlation Spearman's rho, error matrix, kappa index and the general exactness. Pedotransfer functions have been developed with a database covering diverse Brazilian regions to predict silicon, iron and aluminum oxides content in the latossolos by means of stepwise multiple regression analysis and validated in regional and agriculture field scale. For the validation of the PTFs in regional and field scale, two series of independent data of 147 were used. The PTFs had been evaluated in the base of the mean error of prediction (MPE) and standard deviation Error of prediction. With exception of the silicon oxides content in Field 1, and the gibbsite, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, base saturation, delta pH in the Field 2, which presented pure nugget effect, all other soil attributes analyzed in this study presented spatial dependence and range varying between 283 m to 1000 m thus allow the prediction of these attributes in points not sampled. Red Latossolos and yellow-Red Latossolos are the principal soil present in both fields and the main differences between the map units were noticed in lower categorical level of soil classification. The digital elevation model allowed to predict soil maps with a precision of 55 and 74% in the Field 1 and Field 2 respectively, thus indicating, that digital elevation model can subsidize in the detail soil survey in agricultural field, however, with restriction for field with denivelation lesser than 73m, where is necessary an inclusion of other pedogenetical factors, as color for example, to assist in the soil map units prediction. The pedotransfer functions elaborated for silicon and aluminium oxides content in the Latossolos is promising at regional and at agricultural field scale while these elaborated for iron oxides content are inefficient at the two scales.

Key – words: Oxisol. Cerrado. Spatial prediction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mapa da extensão do Bioma Cerrado no Brasil. Adaptado da IBGE (2004)	20
Figura 2.2 – Representação esquemática da distribuição dos solos na paisagem representativa de parte de Planalto Central Brasileiro, os números I, II e III, representam as superfícies geomorfológicas Sul Americana, Velhas I e Velhas II, respectivamente (MOTTA et al., 2002)	24
Figura 2.3 – Distribuição espacial das classes de uso da terra no Bioma Cerrado no ano 2002, Estado: BA, Bahia; GO, Goiás; MA, Maranhão; MT, Mato Grosso; MS, Mato Grosso do Sul; MG, Minas Gerais; PR, Paraná; PI, Piauí; SP, São Paulo; TO, Tocantins (SANO et al., 2008)	25
Figura 2.4 – Levantamento do solo no Brasil. Adaptado de Santos e Santos, (2007).....	27
 Artigo A	
Figura 3.1 – Grid amostral de 200x200m da Gleba 1 (a), grid amostral de 175x175 m da Gleba 2 (b).....	37
Figura 3.2 – Seção transversal das superfícies geomorfológicas e respectivas litologias: (a) Litofácies encontradas na região de estudo de acordo com Macedo e Bryant (1987) e de Campos e Freitas Silva (1998); (b) foto do afloramento de quartizito na Gleba 1 no ponto amostral 506; (c) Petroplintita no ponto amostral 506 de solo na Gleba 1; (d) saprólito de quartizito misturado a saprólito de argila branca na Gleba 1; (e) Saprólito de ardósia da unidade A no leito do riacho na Gleba 2.....	41
Figura 3.3 – Valores de ΔpH para as glebas 1 e 2	46
Figura 3.4 – Variogramas dos atributos de solos e de relevo da Gleba 1; Esf, modelo esferico; Gauss, modelo gaussiano, Exp, modelo exponencial; índice de vermelho; altitude (m); declividade(%); argila(g.kg ⁻¹), areia fina(g.kg ⁻¹); areia grossa(g.kg ⁻¹); silte(g.kg ⁻¹)	

¹); Fe₂O₃(g.kg⁻¹), óxido de ferro; Al₂O₃ (g.kg⁻¹), óxido de alumínio; SiO₂ (g.kg⁻¹), óxido de silício; Ht(g.kg⁻¹), hematita; Gt(g.kg⁻¹), goetita; Gb(g.kg⁻¹), gibbsita; Ct(g.kg⁻¹), caulinita ; V(%), Saturação por bases; m(%), saturação por alumínio; os números dentro das parênteses representam o efeito pipeta, a contribuição e alcance repectivamente49

Figura 3.5 – Variogramas dos atributos de solos e de relevo da Gleba 2; Esf, modelo esferico; Gauss, modelo gaussiano, Exp, modelo expenencial; índice de avermelhamento; altitude (m); declividade(%); argila(g.kg⁻¹), areia fina(g.kg⁻¹); areia grossa(g.kg⁻¹); silte(g.kg⁻¹); Fe₂O₃(g.kg⁻¹), óxido de ferro; Al₂O₃ (g.kg⁻¹), óxido de alumínio; SiO₂ (g.kg⁻¹), óxido de silício; Ht(g.kg⁻¹), hematita; Gt(g.kg⁻¹), goetita; Gb(g.kg⁻¹), gibbsita; Ct(g.kg⁻¹), caulinita ; V(%), Saturação por bases; m(%), saturação por alumínio; os números dentro das parênteses representam o efeito pipeta, a contribuição e alcance repectivamente.....50

Artigo B

Figura 4.1 – Grade amostral com malha regular e com malha regular de 200m na Gleba 1 (a) de 175m na Gleba 2(b).....62

Figura 4.2 – Mapa de solos da Gleba 1 (a) e da Gleba 2 (b), mapas das unidades preliminares de mapeamentos definidas pelo modelo digital de terreno da Gleba 1 (c) e da Gleba 1 (d); UM1, UM2, UM3, UM4, UM5 unidades de solos de mapeamento de solos, *UM1, *UM2, *UM3,*UM4, *UM5 unidades preliminares de mapeamentos definidas pelo modelo digital de terreno; P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, perfis modais das unidades de mapeamento70

Figura 4.3 – Perfis modais das unidades de mapeamento das glebas 1 (a) e 2 (b); As espessuras dos horizontes estão expressas em cm.; LVA, Latossolo Vermelho Amarelo; LV, Latossolo Vermelho; FFc. Plintissolo Pétrico concrecionário; 1, horizonte Ap com

estrutura composta de grãos soltos e laminar média, fraca raízes abundantes; 2, Horizonte Ap com estrutura em blocos subangulares média e a grandes, forte raízes poucas; 3, horizonte Bw latossólico com estrutura em microagregados, muito pequena, forte, poucas raízes; 4, horizonte AB com estrutura em blocos subangulares média e grandes, forte, poucas raízes; 5. Horizonte Bw latossólico com estrutura maçica, fraca com volumes distintos de cor umida vermelha (2,5YR4/8), poucas raízes; 6, horizonte Btc1 com concreções ferruginosas.; 7, horizonte Btc2 compostos de fragmentos de quartzito e de uma matriz em microagregados; SO, sudoeste; NO, noroeste; SE, sudeste; NE, nordeste.....71

Artigo C

Figura 5.1 – Distribuição geográfica das amostras obtidos em Cooper et al., (2005), utilizadas para elaboração das funções de pedotransferência dos óxidos de silício de ferro e de alumínio..... 84

LISTA DE TABELAS

Artigo A

- Tabela 3.1** – Estatística descritiva das variáveis de relevo e dos atributos topográficos cor, físicos, mineralógicos e químicos dos pontos amostrais, na profundidade 0,80-1,0 m nas Gleba 1 e Gleba 2 45
- Tabela 3.2** – Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos de relevo, cor, granulometria, mineralogia e atributos químicos das Glebas 1 e Gleba 2 48
- Tabela 3.4** – Descrição morfológica e atributos topográficos, físicos, químicos e mineralógicos dos perfis modais das unidades de mapeamentos na Gleba 1 e Gleba 2 53

Artigo B

- Tabela 4.1** – Valores médios dos atributos físicos, mineralógicos e químicos das unidades de mapeamentos nas Glebas 1 e 2 (Profundidade 80-100cm) 68
- Tabela 4.2** – Estatística descritiva dos atributos de relevo na Gleba 1 e na Gleba 2 74
- Tabela 4.3** – Unidades preliminares de mapeamentos de solos obtidos pela análise de agrupamento hierárquico (*K-mean*) dos atributos topográficos nas áreas da Gleba 2 e Gleba 1 74
- Tabela 4.4** – Matriz de correlação linear Rho de Spearman entre os atributos dos solos e os atributos topográficos para as Glebas 1 e 2 76
- Tabela 4.5** – Matriz de erro gerada para a classificação dos pontos em função dos Modelos Digital de Elevação tomando como referência o mapa detalhado de solos destacando as amostras que foram classificadas corretamente (diagonal principal) 76
- Tabela 4.6** – Índice Kappa e desempenho da classificação nas unidades de mapeamento de solos (UM) das duas áreas estudadas 78

Artigo C

Tabela 5.1 – Estatística descritiva do banco de dados para elaboração das funções de pedotransferência	87
Tabela 5.2 – Correlações lineares não paramétricas (Spearman) entre os óxidos e os atributos químicos e físicos (N=1073).....	88
Tabela 5.3 – Parâmetros estatísticos das funções de pedotransferências para estimação de óxidos de silício (N=1073)	89
Tabela 5.4 – Parâmetros estatísticos das funções de pedotransferência para estimação de óxidos de alumínio (N=1073).....	89
Tabela 5.5 – Parâmetros estatísticos das funções de pedotransferência para estimação de óxidos de ferro (N=1073).....	90
Tabela 5.6 – Parâmetros de validação das funções de pedotransferência para óxidos de silício e de alumínio na escala regional (N=147) e local (N=147).....	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 SITUAÇÃO GEOGRÁFICA E CLIMA DA REGIÃO DO CERRADO.....	20
2.2 GEOMORFOLOGIA E GEOLOGIA DA REGIÃO DE CERRADO.....	21
2.3 VEGETAÇÃO, SOLOS E USO DE TERRA NA REGIÃO DE CERRADO	24
2.4 LEVANTAMENTO DO SOLO: ESTADO DA ARTE NO BRASIL E NA REGIÃO DO CERRADO	26
2.5 DIFERENTES ABORDAGENS PARA O LEVANTAMENTO DE SOLOS.....	28
2.5.1 A Abordagem Determinista no Levantamento de Solos	28
2.5.2 A Abordagem Quantitativa de Levantamento de Solos	29
2.5.2.1 As técnicas de Geoestatística	29
2.5.2.2 As técnicas de geoestatística associadas aos modelos de paisagens.....	29
2.5.3 As Funções de Pedotransferência.....	31
3 ARTIGO A – ANÁLISE DA VARIABILIDADE E DO DETERMINISMO DE ATRIBUTOS DOS HORIZONTES SUBSUPERFICIAIS DE LATOSSOLOS NA ESCALA DE PARCELA AGRÍCOLA NO CERRADO	32
3.1 RESUMO E ABSTRACT	33
3.2 INTRODUÇÃO	34
3.3 MATERIAL E MÉTODOS	36
3.3.1 Caracterização da Área de Estudo	36
3.3.2 Procedimento de Amostragem a Campo.....	36
3.4 PROCEDIMENTOS NO LABORATÓRIO	37
3.4.1 Análises Químicas	38
3.4.2 Análises Físicas.....	38
3.4.3 Análises Mineralógicas	38
3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E DE VARIABILIDADE ESPACIAL	38
3.6 CLASSIFICAÇÃO DAS UNIDADES HOMOGÊNEAS.....	39
3.7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
3.7.1 Quadro Geomorfológico e Geológico das Glebas em Estudo	40

3.7.2	Variação dos Solos nas duas Glebas	43
3.7.3	Variabilidade Espacial dos Solos na Escala da Parcela Agrícola	46
3.7.4	Classificação de solos nas duas áreas	51
3.8	CONCLUSÕES	56

4	ARTIGO B – LEVANTAMENTO DETALHADO DE SOLOS E EFICIÊNCIA DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO NA DEFINIÇÃO DE UNIDADE DE MAPEAMENTO EM DUAS VERTENTES NO CERRADO	57
4.1	RESUMO E ABSTRACT	58
4.2	INTRODUÇÃO	59
4.3	MATERIAL E MÉTODOS	60
4.3.1	Caracterização das Áreas.....	60
4.3.2	Procedimento de Amostragem a Campo	61
4.3.3	Procedimento no Laboratório.....	62
4.3.3.1	Análises físicas	62
4.3.3.2	Análises mineralógicas	63
4.3.3.3	Análises químicas.....	63
4.3.3.4	Levantamento convencional de solo: Definição das unidades de mapeamento e abertura dos perfis modais	63
4.3.4	Segmentação das Principais Feições Geomorfológicas nas Áreas em Estudo.....	64
4.3.5	Avaliações da Eficiência do MDE no Levantamento de Trabalho de Solos.....	65
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.4.1	Atributos de solos das Unidades de Mapeamento.....	67
4.4.2	Classificação dos Solos das Unidades de Mapeamento na Gleba 1 e Gleba 2	70
4.4.3	Caracterização Geomorfológica e Relação Solo-Relevo nas Glebas 1 e 2.....	73
4.5	CONCLUSÕES	79

5 ARTIGO C – FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA OS OXIDOS DE SILÍCIO, DE FERRO E DE ALUMÍNIO EM LATOSSOLOS	80
5.1 RESUMO E ABSTRACT	81
5.2 INTRODUÇÃO	82
5.3 MATERIAL E MÉTODOS	83
5.3.1 Banco de Dados	83
5.3.2 Estatística	84
5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
5.5 CONCLUSÕES	92
6 CONCLUSÕES GERAIS	93
REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior exportador mundial de produtos agrícolas e participa com 26% da produção mundial. De acordo com as previsões realizadas pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, em 2050 o Brasil passará a ser o primeiro país exportador de produtos agrícolas do mundo e dentro desse cenário o bioma Cerrado, que cobre 204,7 milhões de hectares, desempenhará um papel ainda mais importante. No entanto, não se sabe qual o preço ambiental deste aumento de produção.

Na década de 1970 o Cerrado foi incorporado à cadeia produtiva do Brasil e, já em 2002, apresentava 39% de seu ecossistema alterado pelas atividades antrópicas. O sistema produtivo agrícola nesse ecossistema é principalmente caracterizado pela agricultura intensiva com uso importante de fertilizantes minerais, de defensivos agrícolas e equipamentos tecnológicos de última geração para preparo, plantio e colheita. Sendo que, a adubação e a aplicação de defensivos agrícolas são principalmente realizadas em função das médias das áreas, sem levar em consideração a variabilidade pedológica das parcelas agrícolas.

Neste sentido, o mapa de solo pode se revelar fundamental, tanto na gestão sustentável deste recurso finito, como na otimização de uso de fertilizantes, na prática da agricultura de precisão e na preservação da qualidade da água e do meio ambiente. O nível de detalhe de um mapa de solo depende da escala de execução e do objetivo pelo qual o mapa é confeccionado. No Brasil, os inventários de solos no passado permitiram levantamentos que afinaram o conhecimento dos contextos morfopedológicos e a publicação de mapas de solos na escala de 1:100.000 a 1:100.000 (SANTOS e SANTOS, 2008). Dado as dimensões do território e custos, poucos trabalhos foram feitos pelas instituições governamentais em escalas compatíveis com a variabilidade de solos da parcela agrícola, sobretudo, no bioma Cerrado.

Para preencher a carência de informações detalhadas sobre os recursos solos busca-se ferramentas que possam amenizar o tempo e os custos do levantamento, e uma das alternativas mencionada na literatura é a geoestatística, sendo esta ferramenta muito utilizada para avaliar a variabilidade dos atributos químicos, físicos e mineralógicos.

Vários trabalhos de topossequência foram realizados no Cerrado com o objetivo de fornecer modelos solo-paisagem. No entanto, poucos quantificaram de maneira clara a contribuição destes modelos para o levantamento detalhado de solos. Em acréscimo, o modelo digital de elevação, sendo uma representação contínua da superfície do terreno, favorece um melhor entendimento do modelo solo-paisagem e permite quantificações, mas, esses estudos, no Cerrado, limitam-se a escala regional.

Para diminuir o custo do levantamento de solos, podem-se utilizar também as funções de pedotransferência. Essas funções são relações matemáticas e permitem determinar atributos de solos de medição cara e laboriosa a partir de atributos básicos de solos, rotineiramente determinados no laboratório.

Considerando a grande variabilidade espacial dos atributos de solos em área agrícolas, a influência do relevo na formação de solos e as correlações existentes entre esses atributos, a hipótese deste estudo baseia-se na convicção de que a geoestatística, o modelo digital de elevação e as funções de pedotransferência são ferramentas que podem auxiliar a execução dos levantamentos detalhados e os estudos de variabilidade espacial na escala de parcela agrícola, tornando-os mais rápidos, precisos e menos onerosos.

O objetivo geral consiste em avaliar a contribuição das técnicas de geoestatística, do modelo digital de elevação (MDE) e das funções de pedotransferência como ferramentas auxiliares no levantamento detalhado de solo, em escala da parcela agrícola, em duas vertentes representativas das principais feições geomorfológicas do Planalto Central Brasileiro.

O objetivo geral foi dividido nos seguintes objetivos específicos:

- Analisar a variabilidade espacial dos atributos do solo nas duas áreas e elucidar seu determinismo;
- Avaliar a eficiência do modelo digital de elevação como ferramenta auxiliar para o mapeamento detalhado do solo;
- Elaborar as funções de pedotransferência para os atributos mineralógicos e avaliar sua eficiência nas escalas regional e da parcela agrícola.

Esses objetivos específicos foram agrupados em três capítulos concebidos em forma de artigo científico:

ARTIGO A – ANÁLISE DA VARIABILIDADE E DO DETERMINISMO DE ATRIBUTOS DOS HORIZONTES SUBSUPERFICIAIS DE LATOSSOLOS NA ESCALA DE PARCELA AGRÍCOLA NO CERRADO;

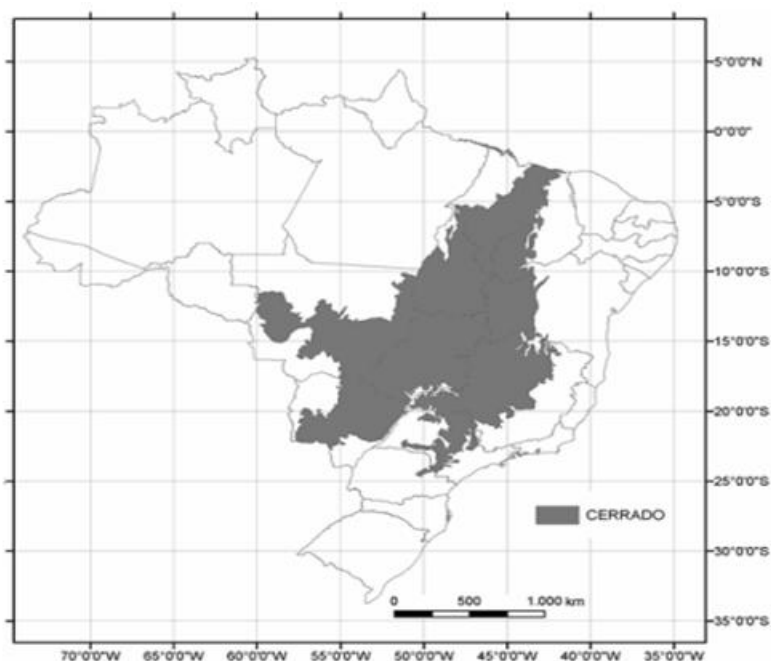
ARTIGO B – LEVANTAMENTO DETALHADO DE SOLOS E EFICIÊNCIA DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO NA DEFINIÇÃO DE UNIDADES DE MAPEAMENTOS EM DUAS VERTENTES NO CERRADO; e,

ARTIGO C – FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA OS ÓXIDOS DE SILÍCIO, DE FERRO E ALUMÍNIO EM LATOSSOLOS.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SITUAÇÃO GEOGRÁFICA E CLIMA DA REGIÃO DE CERRADO

Figura 2.1 – Mapa da extensão do Bioma Cerrado no Brasil. Adaptado da IBGE (2004)



A região do Cerrado ocupa uma área de 204,7 milhões de hectares na porção central do Brasil e engloba parte dos estados da Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Piauí, São Paulo e Tocantins, além do Distrito Federal (IBGE, 2004) (Figura 2.1).

De acordo com Assad et al., (1993), o clima predominante no domínio do Cerrado é de tipo semi-úmido (Aw) segundo a classificação Köppen sendo tropical sazonal, de inverno seco. A temperatura média anual fica em torno de 22-23°C, sendo que as médias mensais apresentam pequena estacionalidade. As máximas absolutas mensais não variam muito ao longo dos meses do ano, podendo chegar a mais de 40°C. Já as mínimas absolutas mensais variam bastante, atingindo valores próximos ou até abaixo de zero, nos meses de maio, junho e julho.

A precipitação média anual fica entre 1200 e 1800 mm. Ao contrário da temperatura, a precipitação média mensal apresenta uma grande estacionalidade, concentrando-se nos meses de primavera e verão (outubro a março), que é a estação chuvosa. Curtos períodos de seca, chamados de veranicos,

podem ocorrer em meio a esta estação, criando sérios problemas para a agricultura. No período de maio a setembro os índices pluviométricos mensais reduzem-se bastante, podendo chegar à zero.

2.2 GEOMORFOLOGIA E GEOLOGIA DA REGIÃO DO CERRADO

Geomorfologicamente o Cerrado é caracterizado por três principais superfícies geomorfológicas. A primeira superfície geomorfológica, Sul Americana, é caracterizada por áreas planas, “chapadas”, com declividade inferior a 2%, e as duas outras correspondem as superfícies geomorfológicas Velhas I e Velhas II, respectivamente que são vales de dissecção muito amplos e abertos com gradientes entre 3 e 5% de declividade (KING, 1956; BRAUN,1971; MOTTA et al., 2002; MARQUES et al., 2004).

A geologia do cerrado é caracterizada por uma grande diversidade de rochas de idade variada. Motta et al., (2002) e Marques et al., (2004) verificaram que no estado de Goiás, a superfície geomorfológica Sul Americana é predominantemente coberta por sedimentos argilosos de idade Terciária-Quaternária e nas bordas desta superfície geomorfológica encontra-se uma canga laterítica ou concreções ferruginosas. Esses autores verificaram também que a natureza da rocha das superfícies geomorfológicas Velhas I e II podem variar de uma região a outra. De acordo com Motta et al., (2002), no município de Silvânia em Goiás situado na região centro-oeste de Brasil, a geologia compreende rochas metamórficas pré-cambrianas que pertencem ao complexo Goiano (gnaisses e migmatitos), do grupo Araxá (micaxistos e quartzitos) e do grupo Canastra (filitos e quartzitos), das rochas sedimentares da formação Paraopeba e do grupo Bambuí (metassiltitos e metargilitos). Marques et al., (2004) estudando nesta mesma região verificaram também a ocorrência das rochas metamórficas pré-cambrianas do complexo Goiano (gnaisses e migmatitos) e uma gama variada de rochas nas superfícies geomorfológicas Velhas I e Velhas II, do complexo Goiano (gnaisses e migmatitos) e do grupo Araxá (micaxistos e quartzitos).

Já no Distrito Federal, de acordo com Freitas-Silva e Campos, (1998), o contexto geológico é caracterizado por quatro conjuntos litológicos distintos, os quais incluem os grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí, e suas respectivas coberturas de solos residuais ou coluvionares. Os grupos Paranoá e

Canastra apresentam idade Meso/Neoproterozóico e os grupos Araxá e Bambuí, idade Neoproterozóica.

O Grupo Paranoá ocupa cerca de 65% da área total do Distrito Federal, sendo possível caracterizar sete unidades litoestratigráficas correlacionáveis, da base para o topo, com as seqüências deposicionais Q₂, S, A, R₃, Q₃, R₄ e PC das áreas-tipo da região de Alto Paraíso de Goiás. A Unidade Q₂ é definida por quartzitos médios com canais conglomeráticos no topo da seqüência. Esta unidade ocorre de maneira restrita na porção leste do Domo Estrutural do Pípiripau (Chapada do Pípiripau). A Unidade S, no Distrito Federal, é composta por metassiltitos maciços e metarritmitos arenosos em direção ao topo da seqüência. Localmente, podem ocorrer camadas de quartzitos estratificados e mais raramente são observados, em poços, lentes de metacalcário micrítico cinza. Essa unidade aflora de forma restrita em janelas estruturais no interior do Domo Estrutural de Brasília (região da Depressão do Paranoá). A Unidade A, das ardósias, é constituída por um expressivo conjunto de ardósias roxas, homogêneas, dobradas, com forte clivagem ardosiana e com ocasionais lentes irregulares de quartzitos, que ocupam variadas posições estratigráficas. As ardósias são cinza-escuras, quando frescas, e intensamente fraturadas em afloramentos. O acamamento primário é a única estrutura sedimentar observada em afloramentos. Os metarritmitos da Unidade R₃ são caracterizados por intercalações irregulares de quartzitos finos, brancos e laminados com camadas de metassiltitos, metalamitos e metassiltitos argilosos com cores cinza-escuras, quando frescos, que passam para tons de rosados a avermelhados, quando próximo à superfície. Além do acamamento, podem ser observadas estratificações do tipo simoidais. A Unidade Q₃ é composta por quartzitos, de finos a médios, brancos ou rosados, silicificados e intensamente fraturados. Apresentam estratificações cruzadas variadas e, mais raramente, marcas onduladas. Sustentam o relevo de chapadas elevadas em cotas superiores a 1200 m. Sobrepondo a Unidade Q₃, ocorrem os metarritmitos argilosos da Unidade R₄. Estes são constituídos por intercalações regulares de quartzitos e metapelitos, com espessuras bastante regulares da ordem de 1 a 3 cm. Apenas raramente são discriminados pacotes decimétricos de metassiltitos maciços. Como última unidade litoestratigráfica, destaca-se, no topo do Grupo Paranoá, a Unidade Psamo Pelito Carbonatada composta por lentes de metacalcários, camadas e lentes de quartzitos

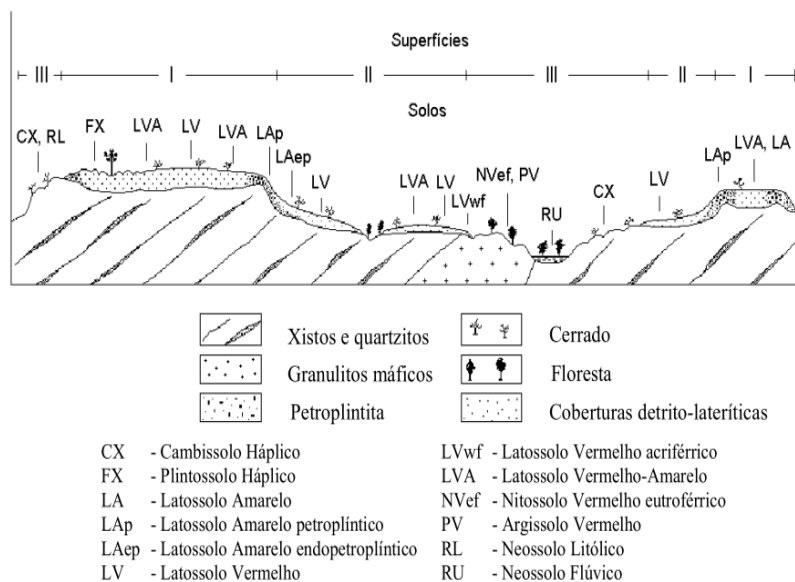
pretos e grossos interdigitados com metassiltitos e metargilitos com cores amareladas, que passam a tons rosados quando alterados.

O Grupo Canastra ocupa aproximadamente 15% da área total do Distrito Federal, sendo distribuído pelos vales dos rios São Bartolomeu (na porção central do Distrito Federal) e Maranhão (na porção Centro-Norte do Distrito Federal). É constituído essencialmente por filitos variados, os quais incluem clorita filitos, quartzo-fengita filitos e clorita-carbonato filitos. Além dos filitos, ocorrem subordinadamente, na forma de lentes decamétricas, mármore finos cinza-claros e quartzitos finos silicificados e cataclasados. Na região do DF, estes filitos são correlacionáveis às formações Serra do Landim e Paracatu.

O Grupo Araxá está limitado ao Setor Sudoeste do Distrito Federal, ocupando apenas 5% da área total do território. É composto por xistos variados com ampla predominância de muscovita xistos e ocorrências restritas de clorita xistos, quartzo-muscovita xistos, granada xistos e lentes de quartzitos micáceos.

Por fim, o Grupo Bambuí se distribui por cerca de 15% da área total do DF, sendo observado na porção Leste, ao longo do Vale do Rio Preto. É composto por metassiltitos laminados, metassiltitos argilosos e bancos de arcóseos, com cor de alteração rosada/avermelhada e com cor de rocha fresca em vários tons de verde. Esse conjunto litoestratigráfico corresponde às formações Serra da Saudade e Três Marias, do topo do Grupo Bambuí.

Figura 2.2 – Representação esquemática da distribuição dos solos na paisagem representativa de parte de Planalto Central Brasileiro, os números I, II e III, representam as superfícies geomorfológicas Sul Americana, Velhas I e Velhas II, respectivamente (MOTTA et al., 2002).



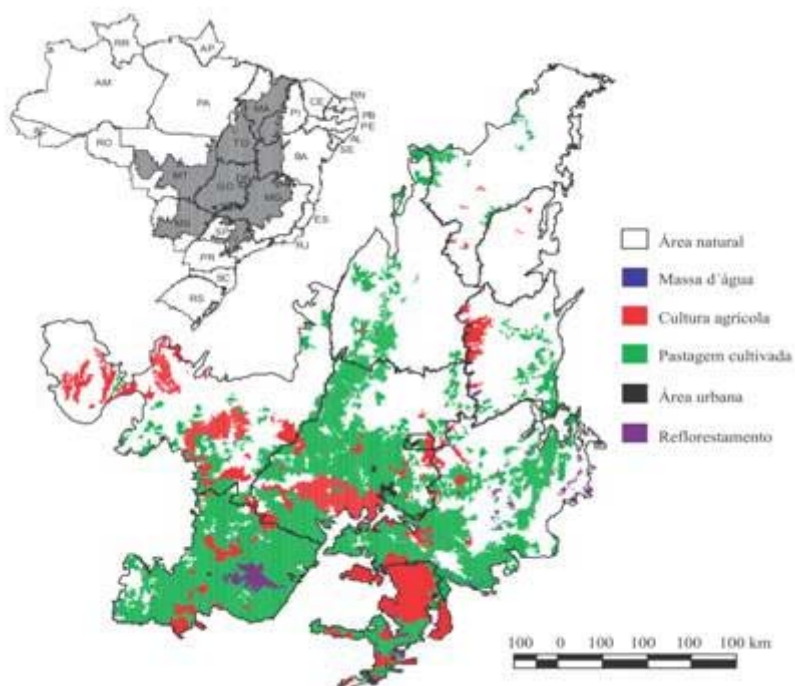
2.3 VEGETAÇÃO, SOLOS E USO DA TERRA NA REGIÃO DO CERRADO

No Cerrado registram-se diversas formações ecossistêmicas. Sob o ponto de vista fisionômico temos: o cerradão, o cerrado típico, o campo cerrado, o campo sujo de cerrado, e o campo limpo, que apresentam altura e biomassa vegetal em ordem decrescente, sendo o cerradão a única formação florestal. O Cerrado típico contém basicamente dois estratos: um superior, formado por árvores e arbustos dotados de raízes profundas que lhes permitem atingir o lençol freático, situado entre 15 a 20 metros e, um inferior, composto por um tapete de gramíneas de aspecto rasteiro.

Adamoli et al., (1986) verificaram a ocorrência de diversos tipos de solos no bioma Cerrado, desde solos rasos como Cambissolos a solos muito intemperizados como os Latossolos. Esses autores verificaram a predominância dos Latossolos sobre os demais solos representando 46% da superfície do cerrado. A distribuição espacial dos diferentes tipos de solos é predominantemente controlada pelo regime hídrico nas superfícies geomorfológicas mais antigas e pela litologia nas superfícies geomorfológicas mais recentes (MACEDO e BRYANT, 1987; MOTTA et al., 2002; MARQUES et al., 2004). De acordo com Motta et al., (2002) (Figura 2.2), nas chapadas predominam os Latossolos; na zona de dissecação, os Cambissolos

e, em menores proporções, Argissolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelhos, Nitossolos e Neossolos Litólicos; e, na zona deposicional, de pequena expressão geográfica, correspondente às planícies fluviais, ocorrem Neossolos Flúvicos.

Figura 2.3 – Distribuição espacial das classes de uso da terra no Bioma Cerrado no ano 2002, Estado: BA, Bahia; GO, Goiás; MA, Maranhão; MT, Mato Grosso; MS, Mato Grosso do Sul; MG, Minas Gerais; PR, Paraná; PI, Piauí; SP, São Paulo; TO, Tocantins (SANO et al., 2008).



Sano et al., (2008, 2009) ao realizarem o mapeamento semidetalhado de uso da terra do Bioma Cerrado, verificaram que 39% apresentou algum tipo de uso de terra. As pastagens cultivadas e culturas agrícolas foram as classes predominantes, com 26,5% e 10,5%, respectivamente. Na Figura 2.3, verifica-se que as áreas mais extensas de uso da terra foram encontradas na porção Sul, enquanto a maior parte da vegetação natural localiza-se na porção norte. De acordo com Sano et al., (2008) esse retrato é fruto do próprio histórico de ocupação das terras do Brasil. A ocupação do Cerrado iniciou-se na década de 1920, quando a indústria de café estava em plena atividade, principalmente no Estado de São Paulo. Mais tarde, com o esgotamento de terras férteis do Sul e Sudeste do Brasil e com o crescimento populacional, o governo de Getúlio Vargas (1930-1945) promoveu um incentivo à ocupação do sul do Estado de Goiás, por meio de

fornecimento de subsídios e assistência técnica aos pecuaristas. A porção norte mostrou-se relativamente preservada por causa das dificuldades de acesso e pela maior distância dos grandes centros urbanos e consumidores. São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul foram os estados que apresentaram os menores índices de cobertura vegetal natural: 15; 32 e 32%, respectivamente.

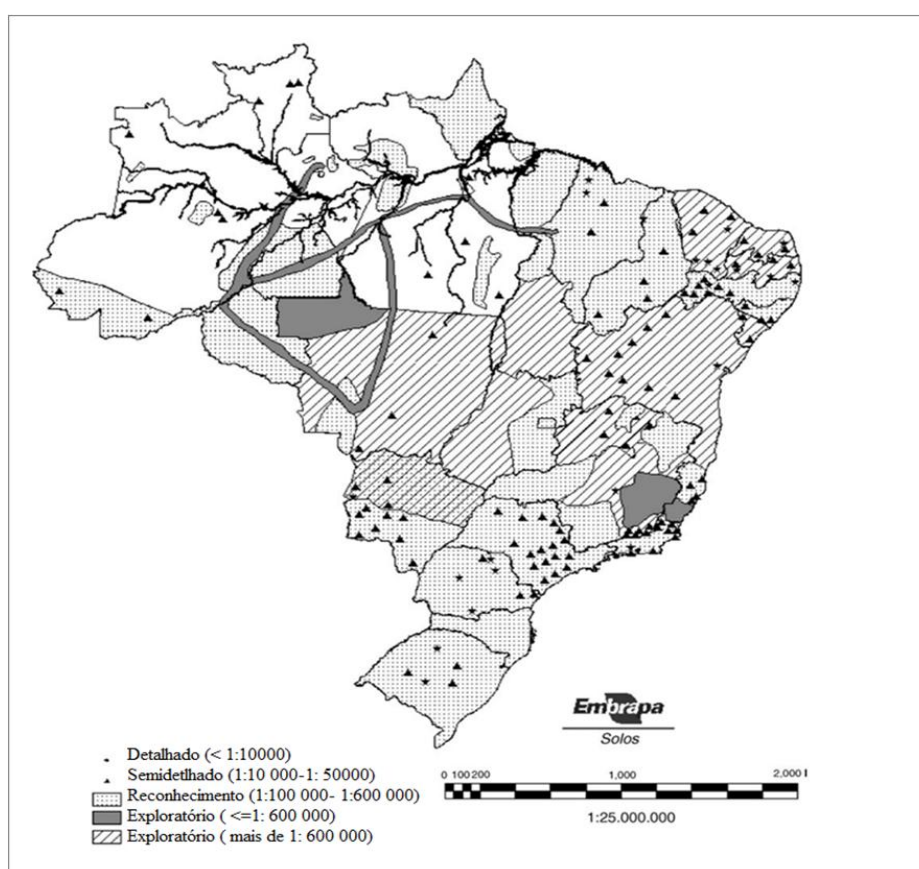
2.4 LEVANTAMENTO DO SOLO: ESTADO DA ARTE NO BRASIL E NA REGIÃO DO CERRADO

O uso racional de solos necessita de um conhecimento prévio dos atributos de solos e de sua repartição espacial. Em 1971, o Departamento Nacional da Produção Mineral, preocupado com os recursos naturais da Amazônia, desenvolveu o projeto RADAM. A partir de 1976, o projeto RADAM teve sua atuação estendida para todo o território nacional com a denominação Projeto RADAMBRASIL. No decorrer desse projeto foram publicados 38 volumes, dotado de mapas exploratórios de solos na escala 1:1000.000 de todo o território nacional e mapa de 1:100.000 a 1:600.000 em 17 Estados (dos 26 mais o Distrito Federal), 35% do território (COOPER et al., 2005; SANTOS e SANTOS, 2007). Os levantamentos executados em níveis de maior detalhe foram principalmente proporcionados pela iniciativa privada para satisfazer objetivos diversos, tais como exploração agrícola, conservação do solo, irrigação e drenagem, assentamentos de colonos, estudos ambientais. É válido mencionar que os estados de São Paulo e de Pernambuco são os únicos que tem seus territórios cobertos por levantamento de solo semidetalhados, na escala 1:100.000 (IBGE, 2007).

A Figura 2.4 apresenta a repartição geográfica de levantamento de solo realizado no território brasileiro (SANTOS e SANTOS, 2007). Nesse mapa observa-se que as regiões Norte (Amazônia) e Centro-Oeste (Cerrado) são as regiões mais carentes em levantamentos na escala semidetalhada a detalhada. Essa carência de informações detalhadas de solos se explica pelo fato que a região amazônica é coberta por uma floresta tropical úmida muito fechada, e junto a esse fator pode evocar-se a preocupação do governo em conservar esse bioma considerado como “pulmão do mundo”. Já para a região Centro-oeste, situada no centro do bioma Cerrado, a realização de levantamentos mais detalhados foi limitada pelo fato dessa região ter sido considerada erroneamente por muito tempo como região imprópria à produção agrícola.

Nas décadas 70 e 80 sob incentivo do governo, mediante crédito agrícola, a região do Cerrado foi integrada na cadeia produtiva do país. O uso de adubos, de calcário e de gesso participou de maneira decisiva para melhorar a qualidade química de solo (BROSSARD e BARCELLOS, 2005). No entanto, depois de uma década de uso intensivo desses solos, vários trabalhos relataram degradações físicas como compactação de solo e químicas como perda da matéria orgânica e da fertilidade de solos (FREITAS et al., 1998; BALBINO et al., 2002; ARATANI et al., 2009). Essa degradação é muitas vezes consequência de uso inadequado do solo, seja por falta de informações adequadas para tomada de decisão, seja por falta de se levar em consideração à variabilidade espacial dos solos no manejo adotado pelos agricultores. Tais fatos indicam a necessidade de informações detalhadas e uma sensibilização para limitar a degradação de solo e preservação desta região.

Figura 2.4 – Levantamento do solo no Brasil. Adaptado de Santos e Santos, (2007).



Além da carência de informações detalhadas sobre o recurso solo, trabalhos realizados, principalmente no estado de São Paulo, mostraram que existe variação dos atributos de solos mesmo em unidades Latossolos (VIEIRA, 2000; CORÁ et al., 2004; CAVALCANTE et al., 2007; CAMARGO et al., 2010).

2.5 DIFERENTES ABORDAGENS NO LEVANTAMENTO DE SOLO

Existem dois tipos de abordagem no levantamento de solo: a abordagem determinista e a abordagem quantitativa, chamada de pedometria.

2.5.1 A Abordagem Determinista no Levantamento de Solos

De acordo com Jenny (1941), a diversidade dos solos e a sua repartição espacial é função das interações dos fatores de formação de solo, que são: a rocha, o relevo, a vegetação, o clima e o tempo. Partindo desse pressuposto essa abordagem é baseada na fotointerpretação ou análise de fotografias aéreas, de satélites e outros materiais cartográficos que são expressões físicas dos objetivos, tais como, a geologia, a vegetação, e as formas de relevo da superfície terrestre. A abordagem explora assim as relações que existem entre os fatores de formação de solo e a distribuição espacial desse recurso natural na paisagem. Na França, Girard et al., (2003), usaram essa abordagem para a elaboração do mapa de solos na escala de 1:250000 da região de Lorraine e Laurent et al., (2003) da bacia da Moine (Maine-et-Loire). De acordo com Girard et al., (2003) e Jamagne e Boulaine (2004), essa abordagem é mais indicada para regiões extensas, pois permite uma rápida obtenção de informações em regiões que apresentam poucas informações sobre o solo. No entanto, Dalmolin et al., (2004) e Jamagne e Boulaine, (2004) ressaltam que essas informações não são diretamente aplicáveis na escala da parcela agrícola, pois podem levar a interpretações errôneas.

No Brasil, essa abordagem foi usada no decorrer do projeto RADAMBRAZIL (SANTOS e SANTOS, 2007). A fim de determinar o número necessário de amostras para representar um atributo de solo, os estudos usando essa abordagem partem do pressuposto de que as amostras são independentes e que o número delas é grande o suficiente para se aplicar a teoria do limite central, ou assume-se que a variável amostrada tem distribuição normal.

2.5.2 A Abordagem Quantitativa de Levantamento de Solos

Essas técnicas quantitativas de levantamentos de solos foram desenvolvidas e reagrupadas com o nome de pedometria. Macbratney et al., (2000) definem pedometria como um conjunto de técnicas probabilísticas e geoestatísticas.

2.5.2.1 As técnicas de geoestatísticas

Uma das técnicas quantitativas é a geoestatística ou teoria de variáveis regionalizadas. Esta técnica é uma ferramenta que permite a estimação dos atributos de solos em pontos não amostrados e a representação de modo contínuo dos atributos avaliados (VIEIRA, 2000). Os estudos com as técnicas de geoestatística têm demonstrado que os atributos de solo apresentam dependência espacial, ou seja, o valor em qualquer ponto amostrado depende de algum modo, de seu vizinho. E, a maior parte dos estudos de variabilidade espacial realizados em Latossolos no Brasil limita-se a definir principalmente o padrão espacial das propriedades na camada arável (AMARO FILHO et al., 2007; BOTTEGA et al., 2011), com poucos enfoques para levantamento pedológico. Além disso, essa abordagem lida dificilmente com mais de dois atributos simultaneamente e necessita um número grande de amostragens inviabilizando a operação em áreas extensas (MACBRATNEY et al., 2000).

2.5.2.2 Técnicas de geoestatísticas associadas aos modelos de paisagem

Entre os modelos de paisagem, podem-se destacar aqueles propostos por Ruhe (1956) e Daniels et al., (1971), que estabelecem a definição de superfície geomorfológica como sendo uma porção de terra que é especialmente definida no espaço e no tempo. Outro modelo de paisagem importante é aquele baseado na curvatura do terreno, conforme estabelecido por Troeh (1965), no qual as pedoformas podem variar desde as lineares até as côncavas, passando pelas convexas, associando o perfil e a curvatura da paisagem com o grau de intemperismo e a evolução do terreno. Além desses modelos, Dalrymple et al., (1968) estabelecem um modelo de paisagem, composto por nove unidades

hipotéticas de vertente, podendo estar parcialmente ausentes ou repetidas na catena.

Antigamente esses modelos de paisagens eram determinados com base na interpretação das fotos aéreas e com trabalhos de observação no campo. A precisão da delimitação dos compartimentos da paisagem era estreitamente ligada à experiência do profissional responsável incluindo assim certa subjetividade, enquanto nos dias atuais, com advento do sistema de informações geográficas de sistema de posicionamento global (GPS), a aquisição de dados de relevo ficou relativamente fácil, tornando o uso do modelo digital de elevação (MDE) cada vez mais frequente nos trabalhos de levantamentos de solos. O modelo digital de elevação permite, além de agilizar o trabalho, diminuir a subjetividade, aumentando assim a precisão e melhorando o entendimento das relações entre os modelos de paisagem e a distribuição de solos no espaço (CAMPOS et al., 2006).

Vários autores vêm combinando técnicas de geoestatística com modelo digital de elevação (SANCHEZ et al., 2005; SOUZA et al., 2009; SOUZA et al., 2010; CAMARGO et al., 2010). Pode-se destacar o trabalho de Camargo et al., (2010), que associando essas duas ferramentas no estudo da variabilidade espacial de atributos de um Argissolo, numa área de 200 hectares no estado de São Paulo, concluíram que a curvatura do terreno influencia na variabilidade espacial de solos, sendo que o relevo côncavo apresenta maior variabilidade de atributos de solos.

Pode-se também citar o trabalho de Souza et al., (2009) que analisando a variabilidade espacial da mineralogia em Latossolos com pedoformas linear e convexo - côncavo concluíram que a identificação das pedoformas é muito eficiente para compreender a variabilidade espacial das propriedades do solo. E que, as variações na forma da paisagem promovem variabilidade espacial diferenciada das propriedades físicas e mineralógicas do solo.

Sanchez et al., (2005) usando o modelo de superfícies geomorfológicas em estudo de variabilidade espacial dos atributos de Latossolos e de café, concluíram que a produção de café apresentou maior variabilidade espacial na superfície geomorfológica mais recente e que os limites entre as superfícies geomorfológicas podem representar limites de locais específicos de manejo.

2.5.3 As Funções de Pedotransferência

Em levantamentos de solos, geralmente, a determinação de alguns atributos é cara e trabalhosa. É o caso da densidade de solo que não é determinada nos levantamentos de solos, mas que é um dos parâmetros chave no cálculo de estoque de carbono orgânico do solo (BENITES et al., 2007) e da capacidade de retenção água e, que fazem parte das modelagens de comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, mas, cuja principal dificuldade está na sua amostragem e medição (TOMASELLA et al., 2000; REICHERT et al., 2010). Baseado neste fato, Bouma (1989) introduziu o conceito de função de pedotransferência (FPT) que está relacionado a estimativa de atributos mais difíceis de serem determinados. De acordo com Macbratney et al., (2002, 2011), as preocupações ambientais nesses últimos anos incentivaram a elaboração de equações de pedotransferência. Com o objetivo de usar eficientemente o recurso água, várias funções de pedotransferência foram determinadas para determinar a retenção de água em diferentes potenciais e principalmente nos potenciais -33kpa e -1500 kpa. Pode se destacar os trabalhos de Tomasella et al., (2000), Silva et al., (2008), Nascimento et al., (2010) e Reichert et al., (2010) que desenvolveram equações de pedotransferência para estimar a capacidade de retenção de água nos Latossolos com base na granulometria de solo, no carbono orgânico e na densidade de solo.

No campo da química de solo, Cagliari et al., (2011) verificaram que é possível estimar os valores de fósforo remanescente nos solos de estado de São Paulo usando funções de pedotransferência elaboradas com base no pH, alumínio trocável e soma de bases, e obtiveram coeficiente de determinação de 89,9%. Benites et al., (2007) estimaram a densidade de Latossolos e de Argissolos com base nos teores de carbono orgânico, soma de bases e teor de argila.

No entanto, poucos estudos foram desenvolvidos com objetivo de estimar atributos mineralógicos de solos, em particular dos óxidos de silício, de ferro e de alumínio, elementos chave na gênese, classificação e comportamento dos solos.

3 ARTIGO A**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DOS SOLOS NOS
HORIZONTES SUBSUPERFICIAIS DE LATOSSOLOS NA ESCALA DE PARCELA
AGRÍCOLA**

ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DOS SOLOS NOS HORIZONTES SUBSUPERFICIAIS DE LATOSSOLOS NA ESCALA DE PARCELA AGRÍCOLA

3.1 RESUMO

Os estudos da variabilidade espacial dos atributos dos solos apresentam como principal objetivo a divisão de áreas agrícolas em subáreas mais homogêneas, visando seu melhor manejo para garantir a sustentabilidade da produção agrícola. O objetivo deste estudo foi analisar na escala da parcela agrícola a magnitude da variabilidade espacial de atributos de solo. O estudo foi conduzido em duas glebas do Cerrado. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas na camada 0,80 - 1,00 m de profundidade, em malha regular de 200 m na Gleba 1 e de 175 m na Gleba 2, totalizando 80 e 97 pontos. Foram analisados atributos químicos, físicos e mineralógicos. A variabilidade espacial foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas. Com exceção dos óxidos de silício na Gleba 1, a gibbsita, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, saturação de bases e o delta pH na Gleba 2 que apresentaram efeito pipeta puro, os demais atributos de solos analisados nesse estudo apresentaram dependência espacial e alcance variando de 287 m a 1000 m, possibilitando a estimação destes atributos em pontos não amostrados. Para o mapeamento detalhado de solos malhas inferiores ou iguais a 200 m e inferiores a 175 m são mais indicadas para a Gleba 1 e Gleba 2, respectivamente. Os solos presentes, na Gleba 1 são o LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Ácrico hipoférrico típico e o LATOSSOLO VERMELHO Ácrico mesoférrico típico e na Gleba 2 são o LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Álico hipoférrico equiaquico e o LATOSSOLO VERMELHO Hipodistrofico

Palavras chave: Levantamento de solos. Geoestatística. Semivariograma.

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL ATTRIBUTES IN SUBSUPERFICIAL HORIZON OF LATOSSOLOS IN AGRICULTURAL FIELD SCALE IN CERRADO

3.1 ABSTRACT

The main objective of spatial variability studies of soil attributes is to divide agricultural areas in more homogeneous sub-areas, aiming to their better management and to guarantee the sustainable agricultural production. The objective of this study was to analyze at agricultural field scale the spatial variability of soil attributes. For this, the study was carried out in two areas localized in Cerrado, being Field 1 and Field 2. In both areas disturbed samples between 0,80-1,00m depth had been collected in regular grid of the 200 m in Field 1 and 175 m in the Field 2 totalizing 80 and 97 points, respectively. Chemical, physical and mineralogical attributes had been analyzed. The spatial variability was analyzed by fitting the semivariograms functions to the data. For the two areas, the range of all the attributes was between 287 m and 1000 m. The study also indicated that for determining the spatial variability of all the attributes, grid minors or equals to 200 m and menor to 175 m are needed for Field 1 and Field 2, respectively. The soil of Field 1 was classified as typic YELLOW-RED LATOSSOLO Acric, clayey texture kaolintic,

and the typic RED LATOSSOLO Acric, very clayey texture, kaolintic and of the Field 2 as YELLOW-RED LATOSSOLO, Alic, clayey texture, kaolintic and typic RED LATOSSOLO Distrophic very clayey texture, kaolintic.

Keys – words: Soil mapping. Geostatistic. Semivariogram.

3.2 INTRODUÇÃO

O bioma Cerrado constitui a mais recente fronteira agrícola na América do Sul. No Brasil, esse bioma ocupa 204,7 milhões de hectares (IBGE, 2004) e participa com mais de 60% da produção agrícola do país (IBGE, 2009). A produção agrícola do Cerrado é intensiva e principalmente dependente de uso de fertilizantes e defensivos agrícolas. O uso do solo acarreta alterações nos atributos físicos, químicos e biológicos sendo as mais comuns, a compactação de solo, que se traduz pelo aumento da densidade aparente do solo acompanhado da redução da macroporosidade, da redução da condutividade hidráulica e da redução da infiltração de água, erosão das camadas árvaeis e conseqüentemente poluição e assoreamento de cursos de água (FREITAS et al., 1998; BALBINO et al., 2002; BALBINO et al., 2004; ARATANI et al., 2009). Essas alterações podem ser acompanhadas por queda de produtividade, comprometendo a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola. Uma das possíveis explicações das alterações dos atributos de solo é a falta de informações adequadas para subsidiar à tomada de decisão para manejo das parcelas agrícolas e/ou a não consideração da variabilidade intrínseca dos solos no manejo das lavouras, indicando assim a necessidade de geração de informações mais detalhadas que possam subsidiar o uso sustentável dos recursos solo e água e o uso de insumos agrícolas.

No Brasil, a maioria dos mapas de solos publicados vai da escala de 1:100.000 até 1:1000.000 (SANTOS e SANTOS, 2007), dado às dimensões do território nacional e aos custos que demandariam trabalhos mais detalhados. Porém, Gaouas et al., (1999), Salehi et al., (2003) e Dalmolin et al., (2004) alertam que esses mapas não fornecem informações adequadas sobre a variabilidade dos solos na escala da parcela agrícola.

Para preencher essa carência de informações, a geoestatística vem sendo utilizada intensamente para avaliar a variabilidade dos atributos químicos,

físicos e mineralógicos nas parcelas agrícolas (VIEIRA, 2000; CARVALHO et al., 2003; GOMES et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2008; CAMPOS et al., 2009; GUEDES FILHO et al., 2010; SILVA et al., 2010). Esta técnica permite a partir de semivariograma simples ou cruzado, estimar os atributos desejados em locais não amostrados, desde que apresentem dependência espacial, por meio de métodos de interpolação de krigagem ou de cokrigagem (VIEIRA, 2000).

Os estudos da variabilidade espacial dos atributos dos solos apresentam como principal objetivo a divisão de áreas agrícolas em subáreas mais homogêneas, buscando o melhor manejo dos solos e garantir a sustentabilidade da produção agrícola (CORÁ et al., 2004; AMARO FILHO et al., 2007; GOMEZ et al., 2007; GOMEZ et al., 2008). Contudo, grande parte desses estudos realizadas em Latossolos no Brasil teve por objetivo definir o padrão espacial das características e propriedades na camada arável, são exemplos os trabalhos de Vieira, (2000), Vieira et al., (2003), Grego e Vieira (2005), Amaro Filho et al., (2007), Ceddia et al., (2007), Berner et al., (2007), Gomes et al., (2007), Berner et al., (2009), Camargo et al., (2010), Cavalcante et al., (2011) e Bottega et al., (2011).

São escassos os estudos de variabilidade espacial dos atributos de solos nos horizontes subsuperficiais, que são de grande relevância para o levantamento pedológico e mapeamento do solo. Além deste aspecto, a maior parte deles exploram principalmente áreas de pequena extensão, variando de 1 a 100 hectares (CORÁ et al., 2004; GRECO e VIEIRA, 2005; AMARO FILHO et al., 2007; CEDDIA et al., 2009; GUEDES FILHO et al., 2010).

Autores como Cunha et al., (2005), Sanchez et al., (2005) e Zousa et al., (2010) mostraram que a geoestatística, quando associada às superfícies geomorfológicas e aos modelos de paisagem proposta por Ruhe (1956), Troeh (1965) e Daniels et al., (1971), apresenta-se como uma ferramenta promissora nos estudos da variabilidade espacial do solo e no levantamento de solos, pois o conhecimento assim gerado pode ser transferido para outras regiões de condições pedológicas semelhantes (LACERDA et al., 2008; GOMES et al., 2008; BARBOSA et al., 2009; SOUZA et al., 2009; FERREIRA et al., 2010). Assim, o objetivo deste estudo foi analisar a variabilidade e o determinismo de atributos dos horizontes subsuperficiais de Latossolos na escala de parcela agrícola.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.3.1 Caracterização da Área de Estudo

As áreas de estudo situam-se em Planaltina de Goiás – GO, (15°22'S e 47°27'O) e no Planalto Central brasileiro. O clima, segundo Köppen, é do tipo tropical úmido (Aw) com subtipo savana, precipitação média de 1500 mm.

A região de estudo, segundo Dantal et al., (2002), enquadra-se na unidade morfoestrutural dos planaltos do Distrito Federal, caracterizada por áreas planas (chapadas) e vales de dissecação muito amplos e abertos com gradientes entre 3 e 5% de declividade, correspondendo às superfícies geomorfológicas Sul-Americana e Velhas, respectivamente. Essas superfícies são principalmente identificadas por suas diferentes altitudes, sendo a Superfície Sul-Americana a mais elevada (KING, 1956; BRAUN,1971; MOTTA et al., 2002; GOMES et al., 2004; REATTO et al., 2008).

A geologia é constituída por rochas do Grupo Paranoá (CAMPOS e FREITAS-SILVA, 1998)As informações disponíveis sobre solos da região estão no mapa de Solos do Distrito Federal, elaborado pela EMBRAPA-SNLCS (1978), na escala 1:100000, e os Latossolos são os solos predominantes.

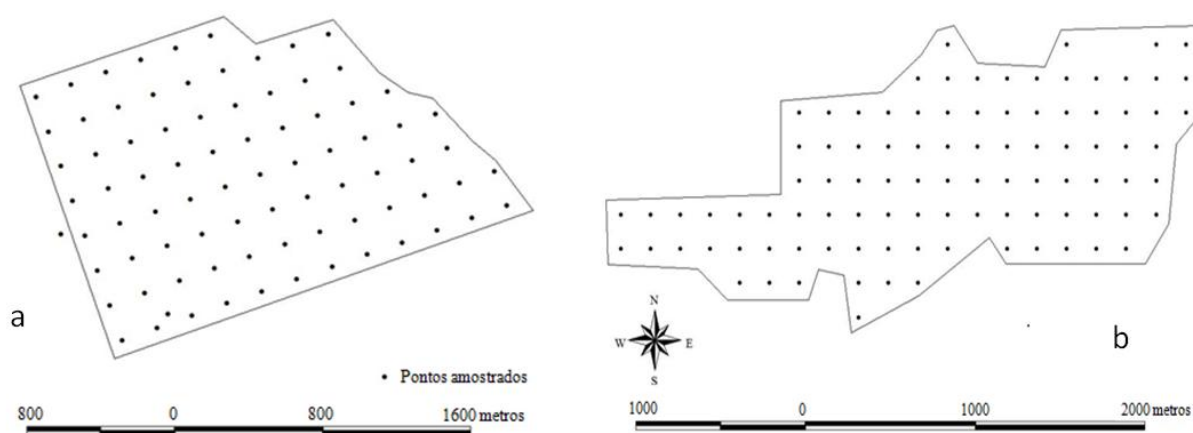
Para o presente estudo foram escolhidas duas glebas, sendo a Gleba 1 situada na superfície geomorfológica Sul Americana, com altitude média de 1068 m, constituindo um talhão de 312 ha, e a Gleba 2 inserida na superfície geomorfológica Velhas, com altitude média de 1004 m, constituindo um talhão de 297 ha. A Gleba 2 situa-se a cinco quilômetros em linha reta da Gleba 1 e, é subjacente a uma superfície de cotas maiores, sendo limitada nas partes Leste e Sul por um riacho ao longo do qual encontra-se uma mata galeria. A Gleba 1 é uma vertente de um modelo convexo, cujo sopé encontra-se na parte Noroeste da área. As áreas são cultivadas no sistema integração lavoura pecuária, com sucessão soja-milho em plantio direto no período chuvoso e pastagem no período seco.

3.3.2 Procedimento de Amostragem a Campo

A metodologia de prospecção utilizada no campo foi a da malha

rígida para levantamento detalhado de solo (IBGE, 2007). As coletas foram feitas em malha regular de 200 m em 80 pontos na Gleba 1 (Figura 3.1a) e de 175 m em 97 pontos na Gleba 2 (Figura 3.1b). A intensidade de observações correspondeu a 1 amostra por 4 e 3 hectares respectivamente, enquadrando-se nas exigências para levantamento detalhado de solo (IBGE, 2007).

Figura 3.1 – Grid amostral de 200x200m da Gleba 1 (a), grid amostral de 175x175 m da Gleba 2 (b).



Os dados de altitude da Gleba 1 e 2 foram coletados com auxílio de GPS (Global Position System) na mesma malha dos pontos de amostragem. A partir destes dados foi elaborado o modelo digital de elevação, do qual foi extraído a declividade e o plano de curvatura em cada ponto amostral.

Para caracterização química, física e mineralógica do horizonte diagnóstico foram coletadas amostras deformadas em minitrincheiras, na profundidade de 0,80 a 1,00 m (MARQUES et al., 2004; GOMES et al., 2004). A cor úmida foi determinada a campo, em todos os pontos, utilizando-se a carta de Munsell (Munsell Color Chart Co., 1975) e foi calculada o índice de avermelhamento.

3.4 PROCEDIMENTO NO LABORATÓRIO

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de malha de 2 mm (terra fina seca ao ar - TFSA), as quais foram submetidas às seguintes análises:

3.4.1 Análises Químicas

Foram determinados: $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ e pH_{KCl} , matéria orgânica (MO), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), alumínio trocável (Al^{3+}) e acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$). Foi calculada ainda saturação por alumínio (m%), soma de bases (SB), porcentagem de saturação de bases (V%), capacidade de troca de cátions (CTC), CTC efetiva (t) e CTC a pH 7 (T), conforme descrito em Claessen (1997).

3.4.2 Análises Físicas

A granulometria foi determinada utilizando o método da pipeta com agitação lenta por 16 horas e dispersão com NaOH 1N. A floculação seguiu o mesmo procedimento, sem o uso do dispersante químico.

3.4.3 Análises Mineralógicas

Os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e TiO_2 foram determinados na terra fina seca ao ar pelo método do ataque sulfúrico, conforme descrito em Claessen (1997). A mineralogia da fração argila (gibbsita (Gb), caulinita (Ct), hematita (Hm) e goetita (Gt)) foi calculada com base na cor e no teor dos óxidos do ataque sulfúrico pela metodologia de alocação, conforme Resende et al., (1987) e Resende e Santana (1988). Foram calculados também os índices K_i ($1,7x \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$) e K_r ($1,7x \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,6375 \text{Fe}_2\text{O}_3$).

3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E DE VARIABILIDADE ESPACIAL

Para análise descritiva dos dados, determinou-se a média aritmética, mediana, mínimo, máximo, desvio padrão e o coeficiente de variação (CV). A variação dos atributos do solo em torno da média foi classificada conforme a magnitude do seu coeficiente de variação (CV), segundo classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), onde os limites de $\text{CV} < 12\%$, $12\% \leq \text{CV} \leq 52\%$ e $\text{CV} \geq 52\%$ indicam baixa, média e alta variação, respectivamente.

A análise de agrupamentos *K-means* foi utilizada para agrupar os pontos amostrais em unidades homogêneas de solos dentro de cada área.

Para análise da variabilidade espacial foram escolhidos os atributos comumente utilizados para distinguir os Latossolos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). Assim, a variabilidade espacial do índice de avermelhamento, da granulometria, da saturação por bases e por alumínio, dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e os minerais da fração argila (Gb, Ct, Hm e Gt) foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas para cada um dos atributos, através da equação:

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

Em que, $\gamma^*(h)$ é a estimativa da semivariância experimental, obtida pelos valores amostrados $[Z(x_i) - Z(x_i + h)]$; h , a distância entre os pontos amostrais; e $N(h)$, o número total de pares de pontos possíveis dentro da área de amostragem, com distância h .

Os semivariogramas que apresentaram dependência espacial foram ajustados com modelos matemáticos esférico, exponencial e gaussiano, selecionados considerando a menor soma dos quadrados do resíduo. O modelo escolhido foi aquele que apresentou média e variância do resíduo mais próximo de zero e 1, respectivamente.

A classificação do grau de dependência espacial (GDE) foi feita com base na razão entre o efeito pepita e a contribuição $[\text{Co} / (\text{Co} + \text{C}_1)] * 100$, onde, Co é o efeito pepita e C_1 a contribuição. O grau de dependência é expresso em porcentagem, e é considerado forte quando a razão for $\leq 25\%$, moderado quando $25\% < \text{GDE} \leq 75\%$, e fraco quando $> 75\%$ (CAMBARDELLA et al., 1994).

3.6 CLASSIFICAÇÃO DAS UNIDADES HOMOGÊNEAS

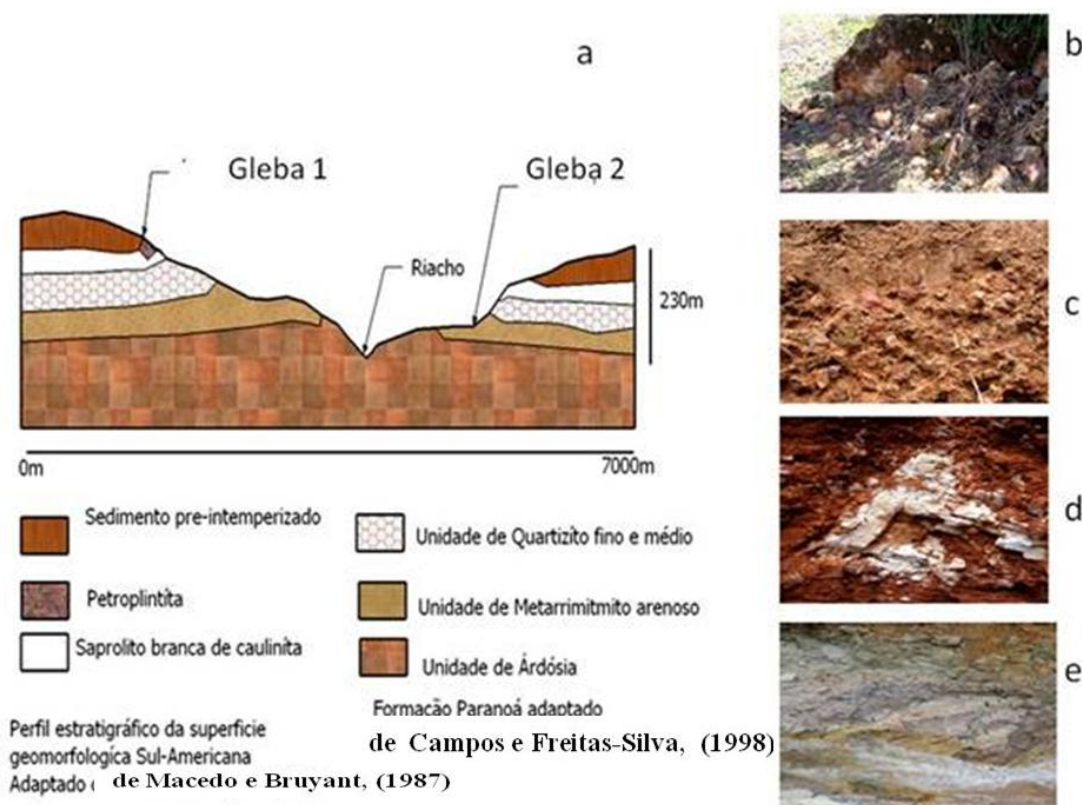
Em cada unidade homogênea de mapeamento foi aberto um perfil modal, que foi descrito de acordo com Lemos e Santos (2005), e classificado segundo as normas do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2006).

3.7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.7.1 Quadro Geomorfológico e Geológico das Glebas em Estudo

A média das cotas da Gleba 1 é de 1069 m, que corresponde a “chapada elevada” com declividade média de 3,5%, menos acentuada que a Gleba 2, que apresenta altitude de 1001 m, que corresponde aos “rebordos suaves ondulados” com declividade média de 5,3%. A denivelação entre as duas superfícies geomorfológicas foi de 67m mostrando a magnitude da erosão. Esses resultados corroboram com os relatados por Macedo e Bryant (1987), Motta et al., (2002), Marques et al., (2004), Gomes et al., (2005), Reatto et al., (2007), Campos et al., (2010) e Ferreira et al. (2010) que realizaram a descrição destas superfícies geomorfológicas em escala regional, o que permite inferir a representatividade das parcelas agrícolas avaliadas nesse estudo em relação ao Bioma Cerrado.

Figura 3.2 – Seção transversal das superfícies geomorfológicas e respectivas litologias: (a) Litofácies encontradas na região de estudo de acordo com Macedo e Bryant (1987) e de Campos e Freitas Silva (1998); (b) foto do afloramento de quartzito na Gleba 1 no ponto amostral 506; (c) Petroplintita no ponto amostral 506 de solo na Gleba 1; (d) saprólito de quartzito misturado a saprólito de argila branca na Gleba 1; (e) Saprólito de ardósia da unidade A no leito do riacho na Gleba 2.



No Planalto Central, a altitude é o principal critério para separar a superfície geomorfológica Sul Americana da superfície geomorfológica Velhas. De acordo com King (1956), Braun (1971) e Motta et al., (2002) a denivelação entre as duas glebas foi proporcionada pela erosão da superfície Sul Americana que ocorreu no período entre o Terciário e Quaternário. O relevo mais plano da Gleba 1 ocorreu provavelmente pelo fato dessa área ser originária dos processos de pleniplanação, que tende a suavizar o relevo (KING, 1956). Contudo, observa-se que a Gleba 1 não apresentou modelo de paisagem típico de “Chapada”, pois verificou-se uma denivelação de 73 metros com declividade variando de 0,6 a 7,2%, caracterizando relevo plano a suave ondulado. A Gleba 2 apresentou denivelação de 174 m e declividade variando de 3 a 8,9%, com relevo mais acentuado, conferindo uma dinâmica da água que potencializa o processo erosivo nesses solos, diferentemente da Gleba 1.

De acordo com Campos e Freitas-Silva, (1998) a geologia da região de estudo enquadra-se na unidade metarrimito do Grupo Paranoá, sendo possível caracterizar sete unidades litoestratigráficas que se correlacionam da base para o topo, com as seqüências deposicionais da unidade metassiltita com intercalação carbonática (S), da unidade de ardósia (A), da unidade Quartzito médio e fino (Q4), da unidade metarrimito com predominância de corpo arenoso (R3), metarrimito com predominância da fração pelítica (R4), metassiltito e metargilito (PC).

Macedo e Bryant (1987) ao realizar um perfil estratigráfico de 15 metros de profundidade na região, verificaram a ocorrência de cinco materiais de granulometria e natureza mineralógica diferente, sendo que da base para o topo encontraram as seguintes litofácies: um substratum de quartzito coberto por um de saprólito de quartzito, um de saprólito de argila de natureza caulínica, uma camada de petroplintita, uma *Stone line* e sedimentos pré-intemperizados do Terciário. As litofácies observadas nas áreas de estudos, são representados na Figura 3.2 e estão em concordância com os cortes estratigráficos realizados por Campos e Freitas-Silva, (1998) e Macedo e Bryant (1987). A Gleba 1 representa uma vertente inserida num modelo convexo, provavelmente uma chapada cuja sustentação é principalmente controlada pelo quartzito e petroplintita (Figura 3.2a). Encontrou-se na área um afloramento de quartzito de extensão restrita (10 metros de raio), que segundo Campos e Freitas-Silva, (1998), corresponde à unidade Q3 do grupo Paranoá (Figura 3.2b).

Próximo a este afloramento, em dois pontos amostrais (506 e 507), abaixo do horizonte Ap, foi encontrada uma camada de petroplintita de aproximadamente 90cm de espessura (Figura 3.2c) e logo abaixo, um material de cor branca (Figura 3.2d) que se desfaz facilmente quando se aplica uma pressão. O ataque sulfúrico deste último material revelou sua natureza caulínica e corresponde ao saprólito caulínico do perfil estratigráfico de Macedo e Bryant (1987). De acordo com estes autores a camada de sedimentos pré-intemperizados do Terciário aparece desde a superfície até 8 a 12m de profundidade, bem inferior a denivelação encontrada neste estudo (73m) para a Gleba 1.

3.7.2 Variação dos Solos nas duas Glebas

A granulometria dos solos das duas áreas apresentou-se bastante distinta, o teor de argila na Gleba 1 e na Gleba 2 foi de 784 e 486 g kg⁻¹, enquadrando-se nas classes de textura argilosa e muito argilosa; a fração areia fina foi de 42 e 336 g kg⁻¹ na Gleba 1 e na Gleba 2; já os teores de silte e areia grossa foram semelhantes para as duas glebas. Os teores de óxido de silício foram de 269 e 146 g kg⁻¹ e os de caulinita de 315 e 578 g kg⁻¹ na Gleba 2 e Gleba 1, respectivamente. Presume-se que os processos de erosão que ocorreram no Planalto Central Brasileiro, mencionado por King (1956), promoveram a dissecação de uma parte da Gleba 1, proporcionando a exposição da camada de saprólito de argila de natureza caulínica. Assim, o solo da Gleba 1 seria proveniente da mistura de material da unidade metarritmíto argiloso (R3) com o saprólito de argila de natureza caulínica, o que explica a textura mais argilosa e caulínica dessa área. Já na Gleba 2, o processo de erosão da paisagem proporcionou a exposição do metarritmíto de textura média explicando a ocorrência de solos de textura menos argilosa nesta área (CURI e FRANZMEIER, 1984; MOTTA et al., 2002; MARQUES et al., 2004; GOMES et al., 2004). Tais resultados indicam que a natureza litológica é o principal fator determinante na variação da granulometria nas duas áreas.

O índice Ki foi de 1,35 e 1,04 e o Kr de 1,12 e 0,88, para a Gleba 1 e Gleba 2, respectivamente, superiores a 0,75, caracterizando solos caulínicos. A Gleba 1 apresentou maiores cotas que a Gleba 2. A Gleba 1 apresentou os maiores valores de Ki e de caulinita, enquanto era esperado encontrar solos com menores valores destes atributos que na Gleba 2 (REATTO et al., 2008). Resultados semelhantes também foram encontrados por Rodrigues e Klamt, (1979), Motta et al., (2002) e Ferreira et al., (2010), mostrando assim que a caulinita não é exclusivamente associada à superfície geomorfológica Velhas (Tabela 3.1).

Os menores valores de Ki e de caulinita na Gleba 2 são provavelmente devidas a livre drenagem proporcionada pela textura menos argilosa e ao fluxo de água advindo do escoamento superficial da superfície mais alta para essa área, que promoveram um ambiente com maior potencial de dessilicificação e maior intemperização, concordando assim com os dados de Motta et al., (2002).

A cor do solo é o atributo usado para separar os Latossolos no segundo nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos-SBCS

(SANTOS et al., 2006). Esse atributo é principalmente influenciado pelos teores de hematita e goetita no horizonte subsuperficial, devido aos baixos teores de MO nesse horizonte (CURI e FRANZMEIER, 1984). O solo da Gleba 1 apresentou maior índice de avermelhamento (IV), de 6,7. Curi e Franzmeier (1984) e Macedo e Bryant (1987), em estudo de uma hidrotopossequência no cerrado, concluíram que a variação da cor está intimamente ligada à drenagem do solo, e quanto mais avermelhada for, melhor sua drenagem. Nesse sentido, a cor mais amarelada dos solos da Gleba 2 pode ser função da sua localização mais baixa na paisagem (Figura 3.2a). Por receber a água de escoamento advinda da superfície mais elevada subjacente a essa gleba, além da água da chuva, ocorre uma elevação de lençol freático próximo à superfície do solo criando um ambiente mais úmido que proporciona um bloqueio para formação da ferrihidrita, elemento precursor da hematita, como também relatado por Macedo e Bryant, (1987; 1989), Campos et al., (2010) e Ferreira et al., (2010).

Apesar da Gleba 1 ter apresentado maior índice de avermelhamento, verificou-se presença da camada de petroplintita ou de couraça ferruginosa nos pontos 506 e 507 localizados próximos ao afloramento de quartizito (Figura 3.2c e 3.2d), explicando as cores mais amareladas nesses locais, de acordo com Macedo e Bryant, (1987), Motta et al., (2002) e Campos et al., (2010).

Os solos das duas áreas apresentam o pH_{H_2O} ácido, concordando com Marques et al., (2004) e Vendrame et al., (2010); no entanto, o pH_{KCL} foi diferente para as duas áreas. Verifica-se que o ΔpH da Gleba 1 foi positivo, enquanto o da Gleba 2 foi negativo (Tabela 3.1). Tais resultados corroboram com os encontrados por Motta et al., (2002) e Ferreira et al., (2010) que, estudando solos do Cerrado nessas mesmas superfícies geomorfológicas, observaram o caráter eletropositivo dos solos na superfície mais antiga e mais elevada na paisagem. Estes resultados indicam assim que os solos da Gleba 1 são mais intemperizados, concordando assim com Vidal-Torrado e Lepsch (1999), Motta et al., (2002) e Campos et al., (2011), que em estudo de solos em duas superfícies geomorfológicas encontraram os solos mais intemperizado na superfície mais alta.

Tabela 3.3 – Estatística descritiva das variáveis de relevo e dos atributos topográficos cor, físicos, mineralógicos e químicos dos pontos amostrais, na profundidade 0,80-1,0 m nas Gleba 1 e Gleba 2.

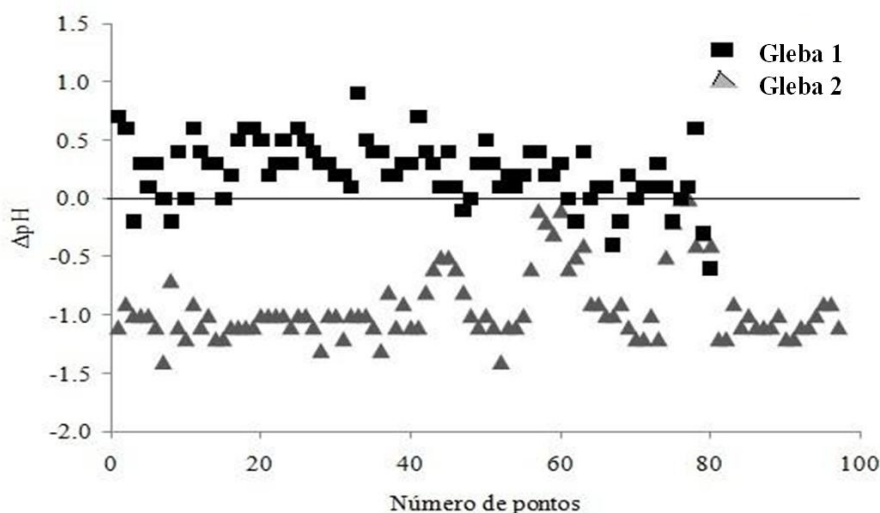
Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	CV	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	CV(%)
	Gleba 1 (n=78)					Gleba 2 (n=97)				
Altitude	1069	1029	1102	1072	2	1001	881	1055	1007	3
Declividade	3,5	0,6	7,2	3,2	42	5,3	3,0	8,9	5,4	24
IV	6,7	3,8	9,5	6,6	12	5,7	1,0	11,5	6,5	32
Argila	784	415	908	832	14	486	224	846	447	37
Silte	116	22	257	105	45	113	26	497	99	59
Areia Fina	41	15	147	29	69	336	53	606	371	48
Areia Grossa	59	15	274	34	107	65	7	138	75	45
Floculação	94	8	100	98	17	74	1	100	91	44
SiO ₂	269	142	371	277	22	146	40	364	128	50
Al ₂ O ₃	340	181	455	347	17	232	125	398	218	31
Fe ₂ O ₃	112	34	148	118	27	72	17	164	59	56
TiO ₂	17	7	26	18	23	11	5	23	10	37
Ki	1,35	0,74	1,71	1,41	16	1,04	0,42	1,62	1	29
Kr	1,12	0,6	1,41	1,17	16	0,88	0,35	1,49	0,84	31
Ct	578	305	797	594	22	315	86	782	275	50
Gb	171	72	401	152	41	164	52	321	153	36
Gt	66	21	90	71	30	49	0	139	42	59
Hm	53	4	99	54	34	29	0	154	22	96
MO	1,18	0,44	3,14	1,18	40	0,64	0,24	1,29	0,65	31
pH _{KCL}	5,1	4,4	5,9	5,1	6	4,18	3,8	5,1	4,1	8
pH _{H2O}	4,9	4,5	5,4	4,9	4	5,1	4,7	5,9	5,1	4
ΔpH	0,23	0,6	0,9	0,25	115	-0,9	-1,4	0	-0,9	-34
K ⁺	11,66	1,56	117	6,24	183	17,3	4,68	79,56	14,04	71
Ca ²⁺	0,68	0,2	3,6	0,5	88	0,47	0,1	1,7	0,40	52
Mg ²⁺	0,17	0,1	0,8	0,1	73	0,16	0,1	0,6	0,1	58
Al ³⁺	0,08	0	0,3	0,1	91	0,8	0	2	0,7	74
H ⁺ +Al ³⁺	4,82	2,59	7,87	4,79	22	3,48	1,66	7,87	2,9	40
SB	0,88	0,3	4,7	0,71	84	0,67	0,22	2,04	0,62	43
CTCe	0,95	0,4	4,8	0,79	80	1,47	0,33	2,66	1,42	43
CTCpH7	5,7	3,5	10,2	5,5	23	4,1	2,1	8,4	3,6	35
V (%)	15	5	51	13	56	17	4	44	15	46
m (%)	9	0	48	9	98	46	0	85	54	56

C.V, coeficiente de variação; DP, Desvio padrão; IV, índice de avermelhamento; declividade (%); argila (g.kg⁻¹), areia fina (g.kg⁻¹); areia grossa (g.kg⁻¹); silte (g.kg⁻¹); Fe₂O₃ (g.kg⁻¹), óxido de ferro; Al₂O₃ (g.kg⁻¹), óxido de alumínio; TiO₃ (g.kg⁻¹), óxidos de titânio; SiO₂ (g.kg⁻¹), óxido de silício; Ki (1,7x SiO₂)/Al₂O₃; Kr(1,7x SiO₂)/Al₂O₃+0,6375 Fe₂O₃); floculação (%); MO, matéria orgânica (dag.kg⁻¹); Ht (g.kg⁻¹), hematita; Gt (g.kg⁻¹), goethita; Gb (g.kg⁻¹), gibbsita; Ct (g.kg⁻¹), caulinita; K⁺ (mg.kg⁻¹), potássio; Ca²⁺ (Cmolc. kg⁻¹), cálcio; Al³⁺ (Cmolc. kg⁻¹), alumínio trocável; H⁺+Al³⁺ (Cmolc. kg⁻¹), acidez potencial; V%, Saturação por bases; m%, saturação por alumínio; CTCe (Cmolc. kg⁻¹), capacidade de troca de cátions efetiva, CTC7 (Cmolc. kg⁻¹), capacidade de troca de cátions a pH7.

O saldo de carga positiva na Gleba 1 é provavelmente proporcionado pelo maior teor de óxidos de ferro e alumínio registrados nessa área, elemento carregado positivamente na faixa de pH ácido. Conseqüentemente, a Gleba 1 apresentou menor CTCe que a Gleba 2, mesmo com o maior teor de caulinita e matéria orgânica.

Ao contrário do Ki e do Kr, que não permitiram indicar os diferentes graus de intemperismo dos solos das duas áreas, o ΔpH foi eficiente neste aspecto. Ao confrontar seus valores (Figura 3.3), verifica-se uma distinção clara entre a Gleba 1 e Gleba 2. Assim, associado à altitude, o ΔpH pode ser uma boa ferramenta para diferenciar o grau de intemperismo dos Latossolos das diferentes superfícies geomorfológicas do Cerrado.

Figura 3.3 – Valores de ΔpH para as glebas 1 e 2.



Os valores de saturação por bases foram de 15 e 17% na Gleba 1 e na Gleba 2, considerados baixos (Tabela 3.1), indicando a intensa lixiviação de bases que ocorre nos solos do Cerrado, corroborando com os resultados de Motta et al., (2002), Gomes et al., (2004), Vendrame et al., (2010) e Ferreira et al., (2010).

A Gleba 1 e a Gleba 2 apresentaram valores de alumínio trocável de 0,08 e 0,8 Cmolc kg^{-1} e saturação por alumínio de 42 e 9%, respectivamente, concordando com os resultados obtidos por Barbosa et al., (2010) e Bispo et al., (2011). O maior valor de alumínio trocável nos solos da Gleba 2, possivelmente, é oriundo da dissolução da caulinita provocada pela drenagem livre nesta área (LOUGHNAN, 1969).

3.7.3 Variabilidade Espacial dos Solos na Escala da Parcela Agrícola

Os valores da média e da mediana dos atributos estudados foram similares (Tabela 3.1). De acordo com Cambardella et al., (1994) e Borssoi et al.,

(2009) os valores similares entre a média e a mediana são indicativos de que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição dos dados, o que permite um bom ajuste do semivariograma e a obtenção de mapas de boa precisão.

Na Tabela 3.2 são apresentados os parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos dos solos e nas Figuras 3.4 e 3.5 os semivariogramas obtidos da Gleba 1 e Gleba 2, respectivamente. Na Gleba 1, com exceção dos teores dos óxidos de silício que apresentaram efeito pipeta puro, os demais atributos avaliados nesse estudo apresentaram dependência espacial moderada a forte, que de acordo com Cambardella et al., (1994) e Vieira , (2000), este resultado indica uma boa organização espacial da cobertura pedológica nas duas áreas. Na Gleba 2, os atributos fração de areia grossa, teor de óxido de alumínio, goetita, pH_{KCL} e $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, apresentaram efeito pipeta puro. Esse efeito retrata a ausência de dependência espacial, indicando que a malha amostral utilizada nesta área não foi suficiente para revelar a variabilidade espacial desses atributos e, em estudos futuros, em condições pedológicas semelhantes, é necessário intensificar a malha amostral (CORÁ et al., 2004; CORÁ e GERALDO, 2006). Por outro lado, esse efeito pipeta puro pode também indicar uma homogeneidade das áreas. O maior número de atributos de solos com efeito pepita puro na Gleba 2 indica a maior variabilidade espacial dos solos nesta área.

Tabela 3.4 – Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para os atributos de relevo, cor, granulometria, mineralogia e atributos químicos das Glebas 1 e Gleba 2

Atributos	Modelo	C ₀	C ₁	A	r ²	RMSE	GDE	Modelo	C ₀	C ₁	A	r ²	RMSE	GDE
Gleba 1								Gleba2						
Altitude (m)	Gauss	0,4	12,43314	469	0,81	0,031263	3	Esf	0,15	10,26	1129	0,98	0,01	1
Declividade	Gauss	0,02	2,74	521	0,88	0,006	1	Exp	0,21	0,35	650	0,71	0,0012	38
Índice de vermelho	Gauss	0,283843	0,292798	370	0,26	0,002058	49	Gauss	1,65	1,9	621	0,67	0,01	46
Argila	Esf	223,5667	3540,996	605	0,9	6,46319	6	Gauss	3385,61	3923,99	509	0,72	15,18	46
Silte	Esf	689,6867	1057,159	595	0,72	3,486313	39	Exp	1455,08	2972,38	960	0,74	7,15	33
Areia fina	Gauss	4,99639	8,041951	612	0,84	0,023205	38	Esf	1717,03	5197,59	629	0,91	8,27	25
Areia grossa	Gauss	597,1411	826,1096	726	0,89	2,128299	42	Exp	166,12	314,1	929	0,73	0,72	35
Fe ₂ O ₃	Gauss	136,2885	159	827	0,81	0,507912	46	Gauss	154,86	892,9	447	0,47	5,17	15
Al ₂ O ₃	Gauss	545,02	487	543	0,75	1,56352	53	EPP						
SiO ₂	EPP							Esp	37,33	637,97	365	0,5	2,6	6
Hm	Gauss	119,8602	121,6976	577	0,63	0,627213	50	Exp	426,57	6870,9	371	0,51	14,59	6
Gt	Gauss	94,72033	214,7683	850	0,94	0,372748	31	Gauss	154,86	892,9	447	0,47	5,17	15
Gb	Gauss	1408,752	3359,422	331	0,6	7,541631	3	EPP						
Ct	Gauss	6952,576	5528,49	863	0,85	15,38712	56	Exp	190	1400	400	0,52	3,13	12
pH _{KCL}	Gauss	0,029351	0,027473	589	0,74	0,000106	52	Gauss	0,0067	0,0392	391	0,55	0,0002	15
pH _{H2O}	Gauss	0,024642	0,010887	1315	0,75	2,95E-05	69	EPP						
ΔpH	Esf	0,01889	0,017296	594	0,72	5,30E-05	52	EPP						
v (%)	Esf	-23,2396	79,15644	283	0,59	0,076845	42	EPP						
m(%)	Esf	28,67234	50,5467	478	0,6	0,154463	36	Exp	112,32	181,19	731	0,52	0,68	38

C₀, efeito pipeta; C, contribuição; A, alcance (m); r², coeficiente de ajuste ao modelo; GDE, grau de dependência espacial, EPP, efeito pipeta puro, Esf, modelo esférico; Gauss, modelo gaussiano, Exp, modelo exponencial; RMSE, raiz quadrado dos erros médio, índice de avermelhamento; altitude (m); declividade(%); argila(g.kg⁻¹), areia fina(g.kg⁻¹); areia grossa(g.kg⁻¹); silte(g.kg⁻¹); Fe₂O₃(g.kg⁻¹), óxido de ferro; Al₂O₃ (g.kg⁻¹), óxido de alumínio; SiO₂ (g.kg⁻¹), óxido de silício; Ht(g.kg⁻¹), hematita; Gt(g.kg⁻¹), goethita; Gb(g.kg⁻¹), gibbsita; Ct(g.kg⁻¹), caulinita ; V(%), Saturação por bases; m(%), saturação por alumínio.

Na Gleba 1 a maior parte dos atributos ajustou-se ao modelo gaussiano, enquanto na Gleba 2 não houve frequência maior de um modelo específico. Esses resultados indicam que os atributos de solos da Gleba 1 apresentaram o mesmo padrão espacial, conseqüentemente, maior homogeneidade, enquanto que os padrões espaciais dos atributos na Gleba 2 apresentaram padrão completamente diferente indicando maior heterogeneidade de solos.

Na Tabela 3.2 verifica-se que, com exceção do pH_{H2O} na Gleba 1, os atributos dos solos analisados nas duas áreas apresentaram alcance variando de 287m a 1000 m. Esses resultados indicam que uma amostragem com malha superior a 1000 m (1:100 ha) não representaria adequadamente a variabilidade espacial dos solos nas duas áreas estudadas, corroborando com os resultados de Gaouas et al., (1999), Salehi et al., (2003) e Dalmolin et al., (2004).

Figura 3.4 – Variogramas dos atributos de solos e de relevo da Gleba 1; Esf, modelo esférico; Gauss, modelo gaussiano, Exp, modelo exponencial; índice de vermelho; altitude (m); declividade(%); argila(g.kg⁻¹), areia fina(g.kg⁻¹); areia grossa(g.kg⁻¹); silte(g.kg⁻¹); Fe₂O₃(g.kg⁻¹), óxido de ferro; Al₂O₃ (g.kg⁻¹), óxido de alumínio; SiO₂ (g.kg⁻¹), óxido de silício; Ht(g.kg⁻¹), hematita; Gt(g.kg⁻¹), goetita; Gb(g.kg⁻¹), gibbsita; Ct(g.kg⁻¹), caulinita ; V(%), Saturação por bases; m(%), saturação por alumínio; os números dentro das parênteses representam o efeito pipeta, a contribuição e alcance repectivamente.

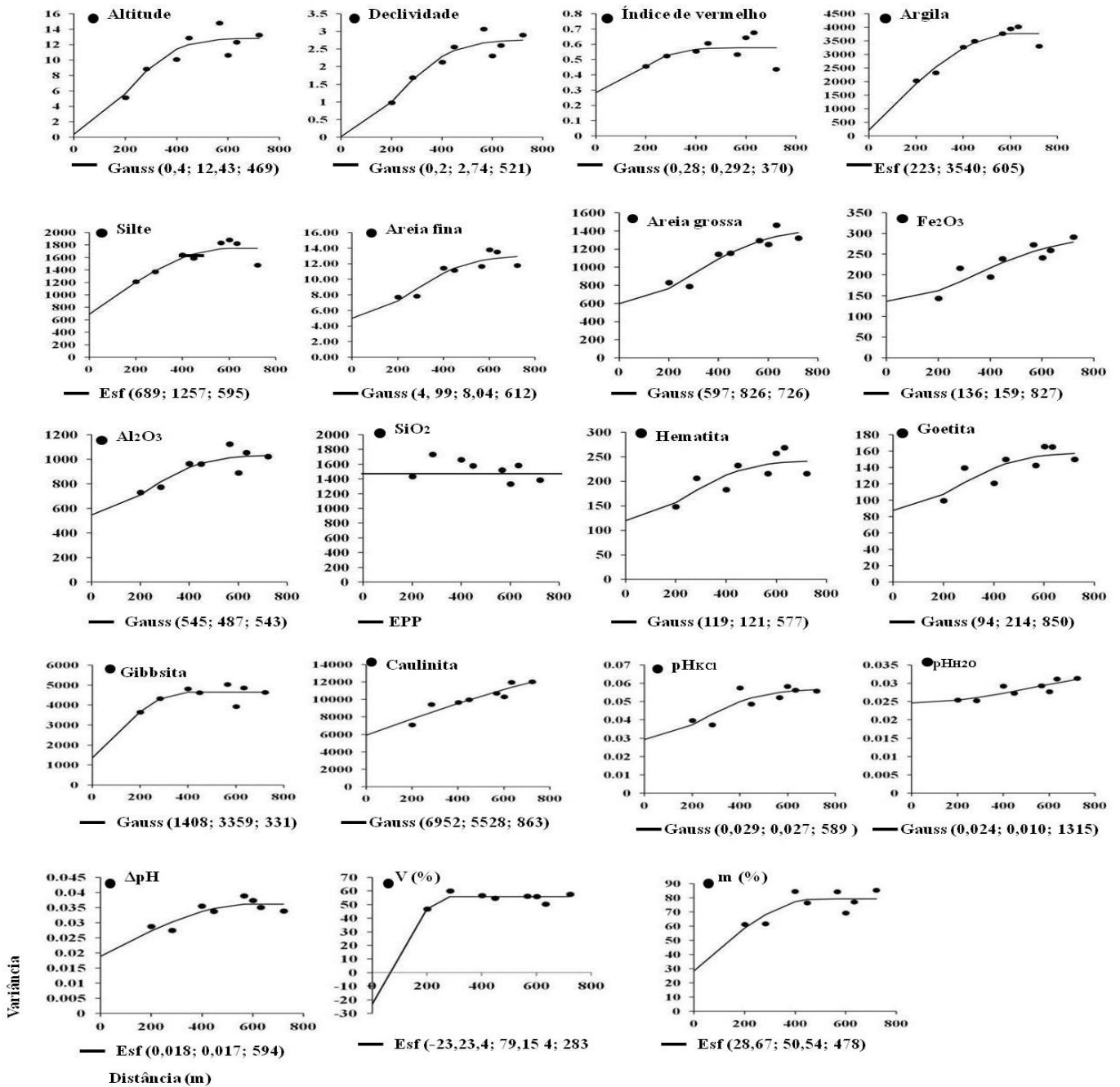
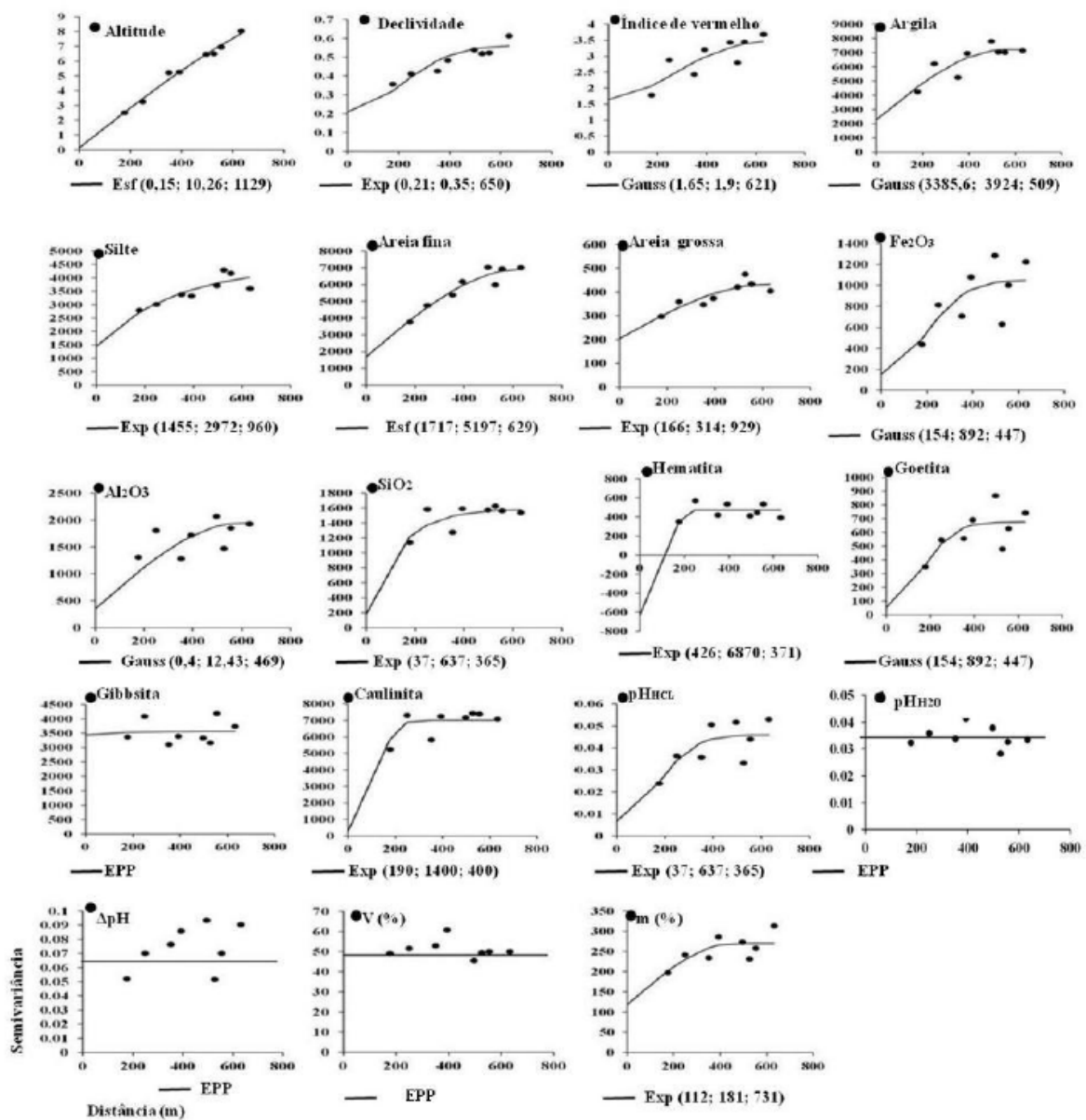


Figura 3.5 – Variogramas dos atributos de solos e de relevo da Gleba 2; Esf, modelo esférico; Gauss, modelo gaussiano, Exp, modelo exponencial; índice de avermelhamento; altitude (m); declividade(%); argila(g.kg^{-1}), areia fina(g.kg^{-1}); areia grossa(g.kg^{-1}); silte(g.kg^{-1}); Fe_2O_3 (g.kg^{-1}), óxido de ferro; Al_2O_3 (g.kg^{-1}), óxido de alumínio; SiO_2 (g.kg^{-1}), óxido de silício; Ht(g.kg^{-1}), hematita; Gt(g.kg^{-1}), goetita; Gb(g.kg^{-1}), gibbsita; Ct(g.kg^{-1}), caulinita ; V(%), Saturação por bases; m(%), saturação por alumínio; os números dentro das parênteses representam o efeito pipeta, a contribuição e alcance repectivamente.



As frações granulométricas apresentaram alcance superior ou igual a 500 m nas duas áreas em estudo. Com exceção do teor do SiO₂ e da gibbsita, que apresentaram efeito pipeta e alcance de 331 m, os atributos mineralógicos apresentaram alcance superior ou igual a 500 m, enquanto que na Gleba 2 esses atributos apresentaram alcance inferior a esse valor.

Na Gleba 1 a malha de 200 m permitiu, com exceção dos óxidos de silício, caracterizar a variabilidade espacial de todos os atributos avaliados, indicando assim que malhas inferiores ou iguais a 200 m seriam ideais para determinação do arranjo espacial dos atributos em levantamento detalhado dos solos dessa área. Já na Gleba 2, a malha de 175 m não revelou a variabilidade espacial da saturação por bases e por alumínio, atributos de extrema importância no manejo de solos, que inclusive permitem distinguir solos no segundo e terceiro nível categórico; e do pH_{H2O} e do ΔpH, atributos que permitem alocar solos em diferentes classes de reação e atribuir o caráter ácrico (EMBRAPA, 2006); indicando que malhas menores que 175 m seriam ideais para a determinação do arranjo espacial dos atributos essenciais para a classificação e levantamento detalhado dos solos nessa área.

3.7.4 Classificação de Solos das duas Áreas

A análise de agrupamento permitiu dividir a Gleba 1 em duas unidades de mapeamento (UM) e a Gleba 2 em três unidades (Tabela 3.4). Dois pontos apresentaram concreções ferruginosas, e por isso foram retirados da análise de agrupamento e discutidos separadamente. Nesses pontos, a abertura de uma trincheira permitiu observar um horizonte Ap, de 20 cm de profundidade, de estrutura em blocos subangulares forte de tamanho variando de pequenos a médio e de cor úmida 5YR4/6 (vermelho-amarela), sobreposto a um horizonte Btf1 de 74 cm de espessura, constituído de 90% de concreções ferruginosas de formas esféricas e de tamanho variando de 1 a 5 cm, extremamente firme. Abaixo deste horizonte encontrou-se um horizonte Btf2 de 39 cm de espessura, composto de fragmentos de quartizito em processo de alteração misturado a um material mais friável, e uma matriz de microagregados. A partir da profundidade de 129 cm, nota-se um horizonte Btf3 de 56 cm de espessura, onde a matriz de microagregados passa a ser predominante. A partir de 185 cm de profundidade encontra-se um substratum de

quartzito. Este perfil foi classificado com PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário léptico, textura média, cascalhento, A antrópico, caulinitico, relevo suave ondulado. Este solo é de extensão bem restrita (aproximadamente 1% da área).

Tabela 3.4 – Descrição morfológica e atributos topográficos, físicos, químicos e mineralógicos dos perfis modais das unidades de mapeamentos na Gleba 1 e Gleba 2

Horizonte	Profundidade (cm)	Altitude (m)	Declividade (%)	Textura	Mineralogia <2mm	ΔpH	V%	m%	F ₂ O ₃ (g.kg ⁻¹)	Cor úmida	Estrutura
Gleba 1											
P4	LVA Ácrico típico, textura argilosa, A antrópico, caulinitico, relevo suave ondulado										
Ap	0-23	1044	4,19	Argilosa	Caulinitico	Positivo	>50	<50	<80	5YR3/4	2-3 M F Bsa a (+++)
AB	23-63			Argilosa	Caulinitico	Positivo	<35	<50	<80	5YR3/5	2-3 M F Bsa Gr e 3 MF Gr a (+)
Bw	63-200 +			Argilosa	Caulinitico	Positivo	<35	<50	<80	5YR3/6	3 MF Gr a (++)
P5	LV Ácrico típico, textura muito argilosa, A antrópico, caulinitico, relevo plano										
Ap	0-22	1095	2,76	Muito argilosa	Caulinitico	Positivo	>50	<50	>80<180	5YR4/6	2-3 M F Bsa a (++)
AB	22-57			Muito argilosa	Caulinitico	Positivo	<35	<50	>80<180	5YR4/6	3 M F Bsa e 3 MF Gr a (+)
Bw	57-200 +			Muito argilosa	Caulinitico	Positivo	<35	<50	>80<180	5YR4/6	3 MF Gr a (++)
Gleba 2											
P1 e P2	LVA Álico , equiáquico, textura média, A antrópico , caulinitico, relevo suave ondulado										
Ap	0-25	1039/1006	6,44/3,64	Média/argilosa	Caulinitico	Negativo	<50	<50	<80	5YR3/3	2 F M Bsa c (2.5YR4/8) (++)
AB	25-89			Média/argilosa	Caulinitico	Negativo	<35	>50	<80	5YR3/4	Maciça c (2.5YR4/8) (++)
Bw	89-200 +	-		Media/argilosa	Caulinitico	Negativo	<35	>50	<80	5YR3/6	Maciça c (2.5YR4/8) (+++)
P3	LV Hipodistrofico típico, textura muito argilosa , A antrópico, caulinitico, relevo suave ondulado										
Ap	0-18	968	6,85	Muito argilosa	Caulinitico	Negativo	>50	<50	>80<180	5YR3/4	3-2 M Bsa e 3FGr a (+++)
AB	18-54			Muito argilosa	Caulinitio	Negativo	<50	<50	>80<180	2.5YR4/8	3-2 M F Bsa e 3F MF Gr a (0)
Bw	54-200 +			Muito argilosa	Caulinitico	Negativo	<35	<50	>80<180	2.5YR4/8	3 MF Gr a (++)

Descrição da estrutura (grau-tamanho-tipo). Grau 1=fraco; 2=moderado; 3=forte. Tamanho da estrutura: MF=muito fino; F=fino; M=médio; G=grande; MG=muito grande. Tipo: Gr=granular; Bsa=bloco subangular
 Raízes: abundante (+++), comum (++) raro (+) ausente (0)
 Mosqueamento: (c) comum, (r) raro e (a) ausente

Na Gleba 2, o perfil modal P1 da UM1 aberto no ponto 10 (Figura 3.1a) foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, Álico, hipoférrico, equiáquico, de textura argilosa, A antrópico, caulínítico, relevo suave ondulado. O P2 da UM2 aberto no ponto 70 (Figura 3.1a) foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Álico, hipoférrico, equiáquico, textura argilosa, A antrópico caulínítico, relevo suave ondulado. O perfil modal P3 da UM3 aberto no ponto 80 (Figura 3.1a) foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO, Hipodistrófico, mesoférrico típico, textura muito argilosa, A antrópico, caulínítico, relevo suave ondulado. A UM1 ocupa 29% da área e está localizada no topo da vertente; a UM2 42% da área, e situa-se na meia-encosta da vertente; e a UM3 ocupa 29% e encontra-se no sopé da vertente.

Os perfis modais P1, P2 e P3 apresentaram uma seqüência de horizontes Ap, AB e Bw. A cor úmida dos perfis P1 e P2, nos horizontes Ap, AB e Bw, foi bruno escuro (7,5YR3/4), bruno amarelo escuro (5YR3/3) e bruno amarelo escuro (5YR3/4), respectivamente. No P3, os horizontes Ap, AB e Bw apresentaram cor úmida bruno amarelo escuro (5YR3/3), bruno escuro (5YR3/4) e vermelho (2,5YR4/8).

Nos perfis P1 e P2, na transição Ap e AB, notou-se a presença de mosqueados abundantes distintos e pequenos de cor úmida vermelha (2,5YR3/8). O horizonte Ap apresentou estrutura composta de grãos solta e estrutura laminar de grau muito fraco. Os horizontes AB e Bw, estrutura composta de blocos subangulares pequenos a médios e estrutura maciça de grau fraco, com predominância desta no Bw. O horizonte Ap do P3, estrutura em blocos subangulares pequenos e médios fracamente desenvolvidos, e nos horizontes AB e Bw, estrutura em blocos subangulares pequenos a médios, fracos e microagregados muito pequeno de grau forte, respectivamente.

Macedo e Bryand (1987, 1989) e Ferreira et al., (2010), em estudos de solos no cerrado, também observaram Latossolos com mosqueado. Estes autores justificaram a presença de mosqueado pela flutuação do lençol freático na estação chuvosa que provoca uma dissolução redutiva da hematita, sendo este processo mais freqüente nos horizontes superficiais onde o teor de matéria orgânica (MO) é maior. Essa MO é utilizada como fonte de energia para a atividade biológica e o ferro como receptor de elétrons.

As unidades UM1 e UM2 ocupam no total 71% da Gleba 2. Estas UMs foram caracterizadas pela estrutura maça no horizonte diagnóstico, característica não comumente encontrada no Bw. Melfi et al., (1989), estudando os solos das superfícies Sul Americana e Velhas, em diversas regiões, relataram a presença de estruturas atípicas no horizonte Bw dos Latossolos na superfície geomorfológica Velhas.

Na Gleba 1, o perfil modal P4 aberto no ponto 1304 (Figura 3.1b) da unidade UM4 foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Ácrico, hipoférrico típico, textura argilosa, A antrópico, caulínítico, relevo suave ondulado. A UM4 ocupa 72% da área e encontra-se nas maiores cotas da área. O P5 da UM5 aberto no ponto 5011(Figura 3.1b) foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Ácrico, mesoférrico típico, muito argiloso, A antrópico, caulínítico, relevo plano. A UM5 ocupa o restante da área e encontra-se no sopé da vertente.

O perfil P4 apresenta sequência de horizontes Ap, AB e Bw com cor úmida bruno amarelo escuro (5YR3/3) no AB e vermelho amarelo (5YR3/6) no Bw. O P5 apresentou cor úmida vermelha amarela (5YR4/6) e vermelha (2.5YR4/8) nos horizontes AB e Bw. Nos dois perfis, as estruturas observadas foram em blocos subangulares, fraca nos horizontes Ap e AB, e microagregado muito pequena e forte no Bw. As características morfológicas dos perfis P4 e P5 assemelham-se aos perfis descritos por Motta et al., (2002) e Balbino et al., (2002, 2004) nessa superfície geomorfológica.

Nas duas áreas foi observada boa distribuição das raízes até 2 m de profundidade, em todos os perfis, assim como a presença de muitas cavidades oriundas de atividade biológica com magnitude maior nos perfis da Gleba 1 em relação a Gleba 2.

A existência da dependência espacial dos atributos de solos e o enquadramento dos solos das duas áreas em diferentes classes de solos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos-SiBCS (EMBRAPA, 2006) sugerem que estas áreas podem ser subdividas em unidades homogêneas para implantação de sistemas agrícolas que visem manejos em zonas específicas do solo.

3.8 CONCLUSÕES

1- Com exceção dos óxidos de sílcio da Gleba 1, e da gibbsita, pH_{H_2O} , saturação de bases, delta pH da Gleba 2, que apresentaram efeito pipeta puro, os atributos de solos analisados nesse estudo apresentaram dependência espacial e alcance variando de 287m a 1000 m, possibilitando assim a estimação destes atributos em pontos não amostrados.

2-Para o mapeamento detalhado de solos dessas Glebas malhas inferiores ou iguais a 200 m e inferiores a 175 m são mais indicadas para as Glebas 1 e 2 , respectivamente.

3-Os solos presentes na Gleba 1 são o LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Ácrico e LATOSSOLO VERMELHO Ácrico mesoférrico típico, e na Gleba 2 são o LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Álico e o LATOSSOLO VERMELHO Hipodistrófico.

4 ARTIGO B

**LEVANTAMENTO DETALHADO DE SOLOS E EFICIÊNCIA DO MODELO
DIGITAL DE ELEVAÇÃO NA DEFINIÇÃO DE UNIDADE DE MAPEAMENTO EM
DUAS VERTENTES NO CERRADO**

LEVANTAMENTO DETALHADO DE SOLOS E EFICIÊNCIA DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO NA DEFINIÇÃO DE UNIDADE DE MAPEAMENTO EM DUAS VERTENTES NO CERRADO

4.1 RESUMO

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma ferramenta que pode subsidiar o levantamento de solo. Os objetivos deste trabalho foram de realizar mapas detalhados de solos em áreas representativas das duas principais superfícies geomorfológicas do Cerrado e avaliar a eficiência do MDE no levantamento detalhado de solo. O estudo foi realizado em duas áreas agrícolas, Gleba 1 e Gleba 2. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas em 80 e 97 pontos na Gleba 1 e na Gleba 2, respectivamente para análises físicas (granulometria, densidade de partículas e densidade de solo), mineralógicas (óxidos de silício, de alumínio, de ferro e de titânio) e químicas (macronutrientes, pH_{KCL} e $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$). Para auxiliar a determinação das unidades de solo presente em cada área foi utilizado o método do agrupamento não hierárquico *K-means*. Em cada unidade pré determinada foi feita a descrição morfológica de um perfil modal, ou dois, caso necessário, e para cada área foi confeccionado o mapa de solo na escala 1:20.000. Concomitante à determinação das unidades dos solos, as áreas foram divididas em unidades de mapeamento utilizando-se somente os atributos derivados do modelo digital de elevação (MDE). Para investigar as relações solo-paisagem, foram usadas a correlação linear de Spearman's Rho e matriz de erro relacionando os mapas de solos convencionais e preditas pelo MDE. Para avaliar a eficiência de modelo digital de elevação no levantamento detalhado de solo foram calculados os índices kappa e a exatidão geral. A partir do modelo digital de elevação foi possível obter mapas de solos, com 55 e 74% de exatidão geral e de índice Kappa de 0,43 e de 0,61 na Gleba 1 e Gleba 2, respectivamente, sendo que a delimitação precisa das unidades de mapeamento pode ser realizada com mais facilidade no campo prospectando-se ao longo dos limites já preestabelecidos pelo modelo digital de elevação, amenizando assim, o tempo e os custos de levantamentos

Palavras – chave: Exatidão geral. Índice kappa. Modelo da paisagem. Cerrado.

DETAIL SOIL MAPING AND DIGITAL ELEVATION MODEL EFFICIENCY IN SOIL MAP UNITS DELIMITATION IN CERRADO

4.1 ABSTRACT

The digital elevation model (DEM) is a tool that can subsidize in the soil survey. The objective of this work was to elaborate high scale soil map (1:20.000) in two field, Field 1 and Field 2 in Cerrado and to evaluate the efficiency of DEM in detailed soil survey. The. Disturbed and non-disturbed sample were collected in 80 and 97 grid points in Field 1 and Field 2 ,then were performed chemicals ; physical and mineralogical analyzis. Detail soil maps of the fields were made in the scale 1:20.000 using Cluster analysis and morfological description of modal soil profiles was performed in each soil unit. Paralelly,the areas had been divided in relief phases in

the base of the attributes derived from DEM. Spearman correlation and an error matrix relating the relief phases and the soil units were used to investigate the soil-landscape relationship. To evaluate the efficiency of DEM in the detailed soil survey the Kappa index and the general accuracy was calculated. Based on the DEM data, it was possible to get soil maps with accuracy 55 and 74% with kappa index value of 0.43 and 0.61 in Field 1 and Field 2, respectively, indicating that DEM can be useful in soil unit prediction.

Key-word: General exactness. Kappa index. Landscape model.

4.2 INTRODUÇÃO

O mapa de solo é uma ferramenta muito importante na gestão sustentável do solo. O Projeto RADAMBRASIL foi responsável, na década 70, pelo levantamento dos recursos naturais em todo o território brasileiro, e permitiu a publicação de 38 volumes contendo mapas temáticos de geologia, geomorfologia, solos, topografia e de vegetação em diversas escalas, porém, em função do elevado custo envolvido na execução desse projeto, poucos desses mapas apresentam-se em grande escala (COOPER et al., 2005).

Os dados contidos nos mapas de pequena escala representam informações valiosas para planejamento de uso de solo em escala regional, contudo, a sua natureza generalizada traz pouco subsídio para tomada de decisão na escala de uma propriedade agrícola (GAOUAS et al., 1999; SALEHI et al., 2003; DALMOLIN et al., 2004). Assim, a utilização de metodologias de levantamento de solo de baixo custo com uma precisão aceitável poderá ser alternativa de geração de informações detalhadas sobre os solos de propriedades agrícolas (SANTOS e SANTOS, 2007). São exemplos os trabalhos de Oballos e Lagacherie (2003), Grinand et al., (2008) e Chagas et al., (2010).

Para obter informações detalhadas com baixo custo sobre o recurso solo no bioma Cerrado, estão sendo elaborados modelos que relacionam a distribuição de solo e as superfícies geomorfológicas (MOTTA et al., 2002; CUNHA et al., 2005; LACERDA et al., 2008; BARBOSA et al., 2009; FERREIRA et al., 2010). O Cerrado brasileiro é caracterizado por apresentar duas principais superfícies geomorfológicas, denominadas superfície Sul Americana e superfície Velhas (KING, 1956; BRAUN, 1971). O modelo proposto por Motta et al., (2002) mostra que a distribuição de solo na superfície Sul-Americana é principalmente condicionada pela

variação do regime hídrico, enquanto que nas superfícies Velhas I e II, é condicionada pela mistura de sedimentos provenientes da primeira superfície e da rocha subjacente.

A delimitação das unidades de pedopaisagem é realizada na base de estudo de fotointerpretação (NANNI et al., 2010) entretanto, essa operação é totalmente qualitativa e depende, em parte, da experiência do especialista em operação (LEGROS et al., 1996). Com o advento dos sistemas de posicionamento global (GPS), de sistemas de informação geográfica e de computadores mais eficientes no processamento de dados, é possível, na base de imagens satelitárias, de fotos aéreas ou de um conjunto de pontos georreferenciados na superfície terrestre (BORNAND et al., 1997), elaborar um modelo digital de terreno que fornece de maneira contínua e tridimensional as características quantitativas dos solos de uma região, eliminando, assim, toda subjetividade.

Segundo Webster et al., (2011), a altitude, o plano de curvatura e a declividade podem ser derivados a partir dos modelos digitais de elevação (MDE) e tais atributos topográficos já se mostraram eficiente nos estudos da variabilidade das propriedades de solos (MANNING et al., 2001; FRANZEN et al., 2006; CAMARGO et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2010; MCKINION et al., 2010). Contudo, existem poucos estudos que avaliam de maneira quantitativa a eficiência do MDE no levantamento detalhado de solos na região de Cerrado.

Os objetivos desse trabalho foram de realizar mapas detalhados de solos em áreas representativas das duas principais superfícies geomorfológicas do Cerrado e avaliar a eficiência do MDE no levantamento detalhado de solo visando fornecer subsídios para amenizar o tempo e os custos do levantamento dos solos na parcela agrícola.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

4.3.1 Caracterização das Áreas

A região de estudo situava-se no Planalto Central Brasileiro, Planaltina de Goiás – GO, (15°22'S e 47°27'O) e o clima local é caracterizado, segundo Köppen, como tropical úmido (Aw) com subtipo savana, com precipitação média anual de aproximadamente 1.500 mm.

De acordo com Dantal et al., (2002) essa região enquadra-se na unidade morfoestrutural dos planaltos do Distrito Federal, caracterizada por áreas planas (chapadas) e vales de dissecação muito amplos e abertos com gradientes entre 3 e 5% de declividade e amplitudes de relevo entre 20 e 50 m correspondendo às superfícies geomorfológicas Sul Americana e Velhas, respectivamente, sendo principalmente identificadas por suas diferentes altitudes (KING, 1956; BRAUN, 1971).

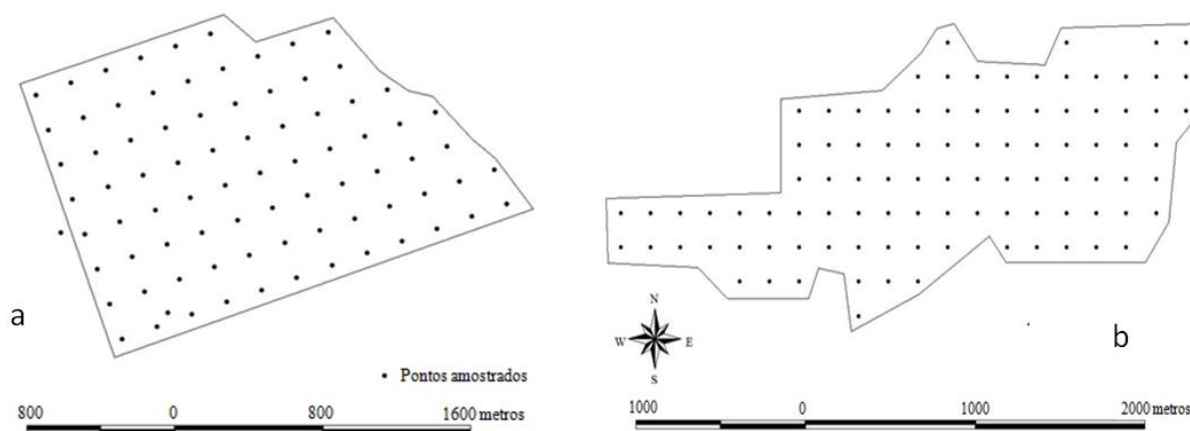
A geologia é constituída por rochas do Grupo Paranoá (CAMPOS e FREITAS-SILVA, 1998). As informações disponíveis sobre os solos da região estão no mapa de Solos do Distrito Federal, elaborado pela EMBRAPA-SNLCS (1978), na escala 1:100000 no qual os Latossolos são predominantes.

Duas glebas foram escolhidas: a Gleba 1, com altitude média de 1.068 m, constituiu um talhão 375ha representativo da superfície geomorfológica Sul Americana, e a Gleba 2 com altitude média de 1.004 m, constituiu um talhão de 310 ha inserida na superfície geomorfológica Velhas. As duas glebas distam cinco quilômetros em linha reta uma da outra, sendo que a Gleba 2 é subjacente a uma superfície de cotas maiores, limitada nas partes Leste e Sul por um riacho ao longo do qual se encontra uma mata de galeria, enquanto que a Gleba 1 localiza-se em uma “chapada” de cotas maiores. Ambas são cultivadas em sistema plantio direto, com a sucessão soja-milho no período chuvoso e em pastagem no inverno.

4.3.2 Procedimento de Amostragem a Campo

A metodologia de prospecção utilizada no campo foi a da malha regular, na Gleba 1 de 200 x 200 m com 80 pontos amostrais e na Gleba 2 de 175 x 175 m somando 97 pontos (Figura 4.1). A intensidade de observações correspondeu a 1 amostra por 4ha e 1 amostra por 3ha, respectivamente, enquadrando-se nas exigências para levantamento detalhado de solo (IBGE, 2007).

Figura 4.1 – Grade amostral com malha regular e com malha regular de 200m na Gleba 1 (a) de 175m na Gleba 2(b).



Os dados de altitude das duas glebas foram coletados com auxílio de GPS (Global Position System) na mesma malha dos pontos de amostragem. Para caracterização física, mineralógica e química do horizonte diagnóstico foram coletadas 3 amostras indeformadas e uma amostra deformada na profundidade de 0,80 a 1,00 m (GOMES et al., 2002; MARQUES et al., 2004). A cor úmida foi determinada a campo para todas as amostras utilizando-se a carta de Munsell (Munsell Color Chart Co., 1975).

4.3.3 Procedimento no Laboratório

As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de malha 2 mm (terra fina seca ao ar - TFSA), as quais foram submetidas às seguintes análises:

4.3.3.1 Análises físicas

As densidades do solo (D_s) e de partículas (D_p) foram obtidas pelo método do anel volumétrico e balão volumétrico (CLAESSEN, 1997). Para determinação da granulometria foi utilizado o método da pipeta com agitação lenta por 16 horas e dispersão com NaOH 1N.

4.3.3.2 Análises mineralógicas

Os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 foram determinados pelo método do ataque sulfúrico, conforme Claessen, (1997). A mineralogia da fração argila (gibbsita (Gb), caulinita (Ct), hematita (Hm) e goetita (Gt)) foi calculada com base na cor e no teor dos óxidos, conforme Resende et al., (1987) e Resende e Santana (1988). Também foram calculados os índices $K_i (1,7x \text{SiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$) e $K_r (1,7x \text{SiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,6375 \text{Fe}_2\text{O}_3$) (EMBRAPA, 2006).

4.3.3.3 Análises químicas

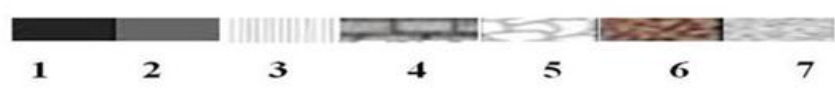
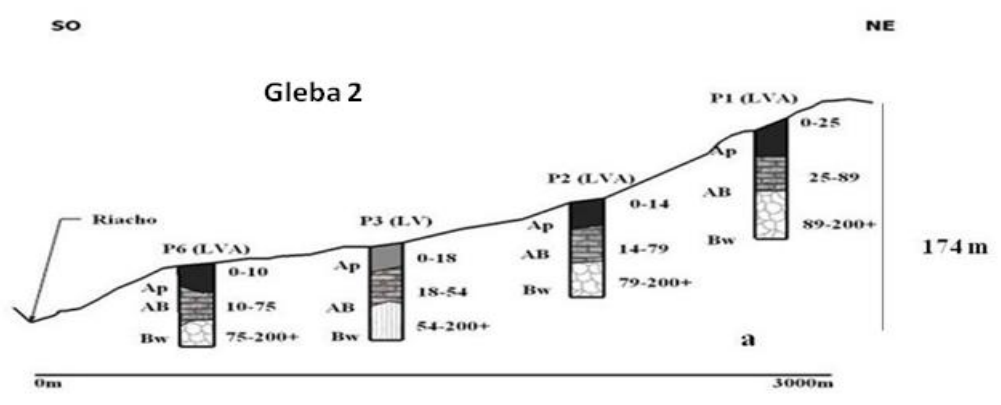
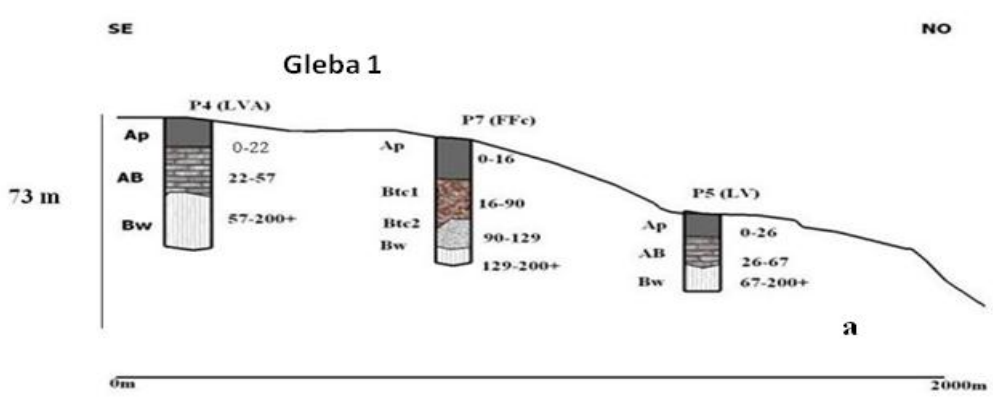
Foram determinados: $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ e pH_{KCl} , matéria orgânica (MO), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), alumínio trocável (Al^{3+}), acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) e fósforo disponível (P). Foram calculados ainda, soma de bases (SB), porcentagem de saturação de bases (V), capacidade de troca de cátions efetiva (CTCe), CTC a pH 7 (CTC_7) e saturação por alumínio (m), conforme descrito em Claessen, (1997). O P remanescente (Prem) foi determinado de acordo com Alvarez et al. (2000).

4.3.3.4 Levantamento convencional de solo: definição das unidades de mapeamento e abertura dos perfis modais

Os pontos amostrais foram agrupados em unidades de mapeamento (UM) mediante análises de agrupamento não hierárquico tipo *K-mean* dos atributos de solos (HAIR et al., 2005; TABACHINICK, 2007) sendo que os pontos que apresentaram concreções ferruginosas foram retirados da análise de agrupamento e discutidos separadamente dos demais. O número das unidades de mapeamento foi determinado observando as diferenças dos atributos de solos entre as diferentes unidades, tais como: granulometria, caráter álico, saturação por base e ΔpH , usado na classificação dos solos (EMBRAPA, 2006). Foram confeccionados mapas de solos na escala 1:20000 das áreas com auxílio Sistema de Informação Geográfica (SIG) do software Surfer 9.0 (Garden software, 2010) utilizando o método do inverso da distância para interpolação dos grupos. O refinamento da divisão das unidades de mapeamentos foi completado pelas informações contidas no caderno de campo.

(2)
ex
su
av
pro

om
lor
10
64
za



Os perfis modais P1, P2 e P3 apresentaram uma seqüência de horizontes Ap, AB e Bw. A cor úmida dos perfis P1 e P2 foi bruno escuro (7.5YR3/4), bruno amarelo escuro (5YR3/3) e bruno amarelo escuro (5YR3/4) nos horizontes Ap, AB e Bw, respectivamente. No P3 os horizontes Ap, AB e Bw apresentaram cor úmida bruno amarelo escuro (5YR3/3), bruno escuro (5YR3/4) e vermelho (2,5YR4/8), respectivamente. (Figura 4. 2).

Nos perfis P1 e P2 notou-se a presença abundante de mosqueados de cor 2.5YR3/8, distintos e pequenos na transição Ap e AB. O horizonte Ap apresentou uma estrutura composta, de grãos soltos e estrutura laminar média de grau muita fraco. Os horizontes AB e Bw apresentaram uma estrutura composta de blocos subangulares pequenos a médios e estrutura maciça de grau fraco, com predominância desta no Bw. O horizonte Ap do P3 apresentou uma estrutura em blocos subangulares pequenos a médios, enquanto que os horizontes AB e Bw apresentaram uma estrutura em blocos subangulares pequenos a médios, fracos e microagregados muito pequeno de grau forte, respectivamente.

Macedo e Bryant (1987), Macedo e Bryand (1989) e Ferreira et al., (2010), em estudos de solos no Cerrado, também verificaram Latossolos com mosqueados. Estes autores justificaram a presença de mosqueados pela flutuação do lençol freático na estação chuvosa que provoca uma dissolução redutiva da hematita, sendo que esse processo é mais freqüente nos horizontes superficiais onde tem mais matéria orgânica, que é utilizada como fonte de energia para a atividade biológica e o ferro como acceptor de elétron.

As unidades UM1 e UM2 ocupam ao total 71% da área total. Estas UMs foram caracterizadas pela estrutura maciça no horizonte diagnóstico, estrutura não característica de Bw Latossólico. Melfi et al., (1989) caracterizando solos semelhantes ao da Gleba 1 e da Gleba 2 em diversas regiões do Brasil, relataram também que a estrutura do horizonte Bw dos Latossolos na Superfície geomorfológica Velhas não apresenta microagregados.

Na Gleba 1 o perfil P7 (ponto 505 na figura 4.1b), próximo ao afloramento de quartizito na UM4, foi classificado como PLINTOSSOLO PÉTRICO, concrecionário léptico, textura média, cascalhento, A antrópico, caulinitico, fase cerrado senso estrito e relevo suave ondulado. Este solo é de extensão bem restrita (aproximadamente 1% da área) e localiza-se na meia encosta da vertente.

Na Gleba 1, o perfil modal P4 (situado no ponto 5011 na figura 4.1b) foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Ácrico, hipoférrico típico, textura argiloso, A antrópico, caulínítico, cerrado senso estrito e relevo suave ondulado. A unidade deste perfil ocupa 72% da área e encontra-se nas maiores cotas da área. O P5 situado no ponto 1306 foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Ácrico, mesoférrico típico, muito argiloso, A antrópico, caulínítico, cerrado senso estrito e relevo plano. A unidade deste perfil ocupa o restante da área e encontra-se no sopé da vertente.

O perfil P4 apresentou seqüência de horizontes Ap, AB e Bw com cor úmida bruna amarela escura (5YR3/3) no AB e vermelha amarela (5YR3/6) no Bw. O P5 apresentou cor úmida de vermelha amarela (5YR4/6) e vermelha (2.5YR4/8) nos horizontes AB e Bw, respectivamente. Nos dois perfis as estruturas observadas foram em blocos subangulares, fraca nos horizontes Ap e AB, e o horizonte diagnóstico Bw foi caracterizado principalmente pela estrutura em microagregado muito pequena e forte.

As características morfológicas dos perfis P4 e P5 assemelham-se aos perfis decritos por Motta et al., (2002), Balbino et al., (2002) e Reatto et al., (2009), nessa mesma superfície geomorfológica. Foi observada uma boa distribuição das raízes até 2m de profundidade em todos os perfis, assim como a presença de muitas cavidades oriundas de atividade biológica com mais magnitude nos perfis da Gleba 1 em relação à Gleba 2.

4.4.3 Caracterização Geomorfológica e Relação Solo-Relevo nas Glebas 1 e 2

A média das cotas da área Gleba 1 é de 1069 m, com declividade média de 3,5% e a Gleba 2 apresentou altitude de 1001 m e declividade média de 5,3% (Tabela 4.2). A denivelação entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo na Gleba 1 e Gleba 2 foi de 73 e de 174 m, respectivamente, enquanto entre as duas superfícies geomorfológicas a denivelação foi de 67m. De acordo com King (1956) e Braun (1971) a Gleba 1 é mais antiga que a Gleba 2, pois a primeira corresponde à “chapada elevada” enquanto que a Gleba 1 corresponde aos “rebordos suaves ondulados”. A denivelação entre as duas áreas foi proporcionada pela dissecação da superfície Sul Americana pelo processo de erosão que ocorreu no período entre o Terciário e Quaternária. O relevo mais plano da Gleba 1 ocorreu provavelmente pelo

fato dessa área ser originária dos processos de peniplanação, que tende a suavizar o relevo (KING, 1956; BRAUN, 1971).

Tabela 4.2 – Estatística descritiva dos atributos de relevo na Gleba 1 e na Gleba 2

Variável	Média	Mínimo	Máximo	DP	Média	Mínimo	Máximo	DP
	Gleba 1				Gleba 2			
Altitude (m)	1069	1029	1102	19,94	1001	881	1055	30,7
Declividade (%)	3,47	0,55	7,17	1,47	5,3	3,0	8,9	1,2
Plano de Curvatura (m ⁻¹)	-0,01	-2,20	2,27	0,51	0,005	-1,080	0,902	0,264

DP, desvio padrão.

A Tabela 4.3 apresentou os atributos topográficos das unidades preliminares de mapeamento, obtidos pela análise de agrupamento da Gleba 2 e da Gleba 1, respectivamente. A análise de agrupamento dos atributos de relevo (altitude, declividade e curvatura de terreno) permitiu agrupar os pontos amostrais em três unidades de mapeamento na Gleba 2: UM1*, UM2* e UM3* (Figura 4.2b) e duas unidades na Gleba 1: UM4* e UM5* (Figura 4.2d). Na Gleba 2 a UM1* é caracterizada como suave ondulado (5% de declividade), com plano de curvatura convexo segundo a nomenclatura de Troeh (1965). Esta unidade representa 28% da área total e localiza-se no topo da vertente com altitude média de 1035m. As unidades UM2* e UM3* apresentaram 5 e 6% de declividade e foram classificadas como suave ondulada, convexa-linear para UM2 e côncava para UM3*. Essas unidades ocupam 42 e 28% da área total, localizadas na meia encosta e no sopé da vertente, respectivamente.

Tabela 4.3 – Unidades preliminares de mapeamentos de solos obtidos pela análise de agrupamento hierárquico (*K-mean*) dos atributos topográficos nas áreas da Gleba 2 e Gleba 1.

Variável	Gleba 1		Gleba 2		
	UM4*	UM5*	UM1*	UM2*	UM3*
N	23	55	28	41	28
Área (%)	29	71	29	42	29
Altitude (m)	1044	1081	1035	1004	923
Declividade (%)	4	3,5	5	5	6
Curvatura (m ⁻¹)	0,12	-0,17	0,02	0,02	-0,2

N, número de pontos amostrais; UM*, unidades de mapeamento definidas em funções dos atributos de relevo, extraídas do modelo digital de elevação.

Na Gleba 1 a UM4* foi classificada como suave ondulada, de forma convexa. Essa unidade representa 29% da área total e localiza-se no sopé da vertente. A UM5* foi classificada como suave ondulada e côncava. Essa unidade ocupa 71% da área total e localiza-se no topo da área.

Na Gleba 2 notou-se que entre os atributos topográficos a altitude apresentou as maiores correlações com os atributos granulométricos, mineralógicos e químicos (Tabela 4.4). Chagas et al., (2010), ao avaliar a contribuição do MDE na discriminação de solo numa bacia hidrográfica no estado de Rio de Janeiro, concluíram que a declividade e a altitude foram os atributos de relevo que mais contribuíram para a delimitação das unidades de mapeamentos. Na Gleba 1 as correlações foram menores, ressaltando assim que os atributos dos solos nessa área são menos dependentes da altitude, provavelmente pelo fato da Gleba 1 ter apresentado menor denivelção. As baixas correlações lineares dos atributos de solos com a declividade e com o plano de curvatura é, provavelmente, o fato da pequena amplitude de declividades e de curvatura registradas nas duas áreas e sua pouca influência nos atributos nos horizontes subsuperficiais.

Na Gleba 2, os teores de argila, óxidos de ferro, alumínio, silício e titânio e o teor de caulinita apresentaram correlação negativa com a altitude (Tabela 4.4). Em relação a granulometria, a correlação negativa pode ser explicada provavelmente devido ao transporte da fração argila em cotas menores, tanto pelo coluvionamento quanto pela água do material pré-imtemperizado advindo da área de maior cotas adjacentes a esta gleba (MOTTA et al., 2002; FERREIRA et al., 2010), concordando assim com a ocorrência de solos muito argilosos da UM3 nas cotas mais baixas da Gleba 2. Em relação à variação da caulinita, o acúmulo de silício nas partes mais baixas da área condicionou provavelmente o teor maior desse mineral no sopé da vertente (FERREIRA et al., 2010) estando de acordo com os valores de Ki e de teor de caulinita na UM3 situadas no sopé.

O inverso foi observado na Gleba 1, o teor de argila, óxidos de alumínio e titânio e a caulinita apresentaram correlação positiva com a altitude (Tabela 4.4). O decréscimo desses elementos nas partes mais baixa da área, pode ser explicada pelo fato da dissecação da paisagem ter exposto a camada de quartizito da unidade R3 do grupo Paranoá, de textura mais grosseira, como discutido anteriormente, subjacente às camadas espessas de sedimentos pré-imtemperizado muito argiloso que caracteriza a superfície Sul-Americana (CAMPOS

e SILVA-FREITA, 1998; MOTTA et al., 2002; MARQUES et al., 2004; GOMES et al., 2004), concordando com a ocorrência de solos de textura menos argilosa da UM4 situada nas cotas mais baixas e de solos de textura muito argilosos da UM5 nas cotas mais alta da Gleba 1.

Tabela 4.4 – Matriz de correlação linear Rho de Spearman entre os atributos dos solos e os atributos topográficos para as Glebas 1 e 2.

Atributos	Gleba 1			Gleba 2		
	Altitude	Declividade	Curvatura	Altitude	Declividade	Curvatura
Argila	0,54*	-0,09	-0,27	- 0.88 *	0	0.44
Silte	-0,55*	0,27	0,21	0.14	-0.16	-0.11
Areia grossa	-0,14	-0,23	0,10	0.58 *	0.11	-0.18
Areia fina	-0,23	-0,31	0,09	0.85 *	0.06	-0.41
Ds	-0,12	0,05	0,03	0.58 *	-0.06	-0.19
Dp	0,11	0,35	-0,02	-0.34	0.07	0.02
Floculação	0,13	0,02	-0,15	-0.33	0.06	0.17
SiO ₂	0,58*	-0,12	-0,08	- 0.84*	-0.04	0.35
Al ₂ O ₃	0,72*	-0,18	-0,16	- 0.84 *	0.05	0.43
Fe ₂ O ₃	0,70*	-0,14	-0,09	-0.58 *	0.02	0.35
TiO ₂	0,37	0,01	-0,05	- 0.76 *	0.08	0.41
Ki	0,06	0,02	0,08	-0.55 *	-0.09	0.13
Kr	-0,05	-0,03	0,09	-0.48	-0.07	0.1
pH _{KCl}	-0,03	-0,03	0,12	-0.65 *	0.03	0.44
pH _{H2O}	0,34	-0,26	0,03	-0.36	0.14	0.25
MO	0,60*	-0,18	-0,11	-0.17	-0.02	0.14
V (%)	0,29	-0,26	0,05	0.58 *	-0.02	-0.3
m (%)	-0,15	0,17	-0,12	-0.49	-0.06	0.22
Prem	0,04	-0,01	-0,16	0.81 *	0	-0.37

*Significativo a 5%; Fe₂O₃, óxido de ferro; Al₂O₃, óxido de alumínio; TiO₂, óxido de titânio; SiO₂, óxido de silício; Ki, (1,7x SiO₂) /Al₂O₃; Kr, (1,7x SiO₂) /Al₂O₃+0,6375 Fe₂O₃; Ct, caulinita; Gb, gibbsita; Gt, geotita; Ht, hematita; Ds, densidade do solo; Dp, densidade de partículas; MO, matéria orgânica; Prem, fósforo remanescente; P, fósforo disponível; V(%), saturação por bases; m (%), saturação por alumínio.

Na Tabela 4.5 é apresentada a matriz de erro e na tabela 4.6 os índices Kappa entre o mapa de solo com metodologia convencional de levantamento e o mapa de solo realizado em função dos parâmetros topográficos. As fases do relevo em altitude mais elevadas, intermediárias e mais baixas foram cruzadas com as unidades do mapa de solo na Gleba 2 (UM1 x UM1*; UM2 x UM2* e UM3 x UM3*) e na Gleba 1 (UM4 x UM4**, UM5 x UM5*).

Na Gleba 2, a exatidão geral foi 74% com índice Kappa 0,61, classificado como muito bom (LANDIS e KOCH, 1977), e na Gleba 1 a exatidão foi de 55% com índice Kappa de 0,43, classificado como bom (LANDIS E KOCH, 1977)

(Tabela 4.5). A porcentagem de solos bem classificados nas unidades foi 67%, 74% e 87% para as unidades UM1, UM2 e UM3 na Gleba 2 e de 100% e 78% para UM4 e UM5 na Gleba 1, sendo todos superiores a 50%. Observou-se então que, utilizando os dados derivados do MDE, foi possível definir unidades de mapeamentos preliminares nas duas áreas com uma precisão aceitável, concordando com os dados de Chagas et al., (2010), ressaltando, porém, a menor precisão na Gleba 1, provavelmente pela menor amplitude de elevação registrada nessa área, já que a declividade e a curvatura de terreno mostraram-se pouco eficazes na distinção das unidades de mapeamentos nas duas áreas. Esses resultados mostraram que três perfis de solos dispostos em toposequência na Gleba 2, sendo uma amostra para cada unidade de mapeamento delimitada e dois perfis, uma em cada unidade de mapeamento na Gleba 1, foram suficientes para caracterizar satisfatoriamente as unidades de mapeamentos destas áreas. A delimitação precisa das unidades de mapeamentos pode ser realizada com mais facilidade no campo, prospectando-se ao longo dos limites preestabelecidos pelo modelo digital de elevação (Figura 4.3b e 4.3d). O processo de coleta e de tratamento de dados para elaboração de modelo digital de elevação é relativamente mais rápido e mais barato que o processo da amostragem e de análise de solo, proporcionando neste caso, uma redução de tempo e de custos de levantamento de solo.

Tabela 4.5 – Matriz de erro gerada para a classificação dos pontos em função dos Modelos Digital de Elevação tomando como referência o mapa detalhado de solos destacando as amostras que foram classificadas corretamente (diagonal principal).

Gleba 1						
Unidade de solos	UM4*	UM5*	Total	Erro de inclusão(%)	Acurácia geral	
UM4	8	0	8	0,00	55%	
UM5	15	55	70	21		
Total	23	55	78			
Bem classificado (%)	100	78				
Erro omissão (%)	65	0				
Gleba 2						
Unidades de solos	UM1*	UM2*	UM3*	Total	Erro de inclusão (%)	Acurácia geral
UM1	26	12	1	39	33	74%
UM2	2	26	7	35	26	
UM3	0	3	20	23	13	
Total	28	41	28	97		
Bem classificado (%)	67	74	87			
Erro omissão (%)	7	37	29			

UM, unidades de mapeamento de solos; UM*, Unidades de mapeamento definidas pelo modelo digital de elevação.

Os maiores valores da exatidão geral e do índice Kappa na Gleba 2, indicam que a repartição das classes de solos é fortemente ligada ao relevo, principalmente ao fator altitude cuja variação indica indiretamente a variação da litologia.

Tabela 4.6 – Índice Kappa e desempenho da classificação nas unidades de mapeamento de solos (UM) das duas áreas estudadas.

Unidades de solos	Índice Kappa de Cohen	Concordância	P-valor
UM4	0,43	Razoável	0,05
UM5	0,43	Razoável	0,05
Gleba 1	0,43	Razoável	0,05
UM1	0,70	Muito bom	0,05
UM2	0,50	Bom	0,05
UM3	0,70	Muito bom	0,05
Gleba 2	0,61	Muito bom	0,05

UM unidades de mapeamento de solos.

Os menores valores de índices Kappa e de exatidão geral na Gleba 1 são devidos, possivelmente, a menor amplitude de altitude dessa área, indicando, assim, que em áreas com variação de altitude menor que 73m, além dos atributos

topográficos usado nesse estudo, outros fatores de formação de solo devem ser acrescentados para auxiliar na determinação preliminar das unidades dos solos (MACEDO e BRYANT, 1987; MOTTA et al., 2002; BARBOSA et al., 2009; FERREIRA et al., 2010; CAMPOS et al., 2010).

4.5 CONCLUSÃO

1-No presente estudo observou-se que o modelo digital de elevação possibilitou delimitar com 55 e 74% de precisão as unidades de mapeamentos na Gleba 1 e na Gleba 2 sendo que a delimitação precisa das unidades de mapeamento pode ser realizada com mais facilidade no campo prospectando-se ao longo dos limites já preestabelecidos pelo modelo digital de elevação, amenizando assim, o tempo e os custos de levantamentos.

5 ARTIGO C

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA OS ÓXIDOS DE SILÍCIO, DE FERRO E DE ALUMÍNIO EM LATOSSOLOS.

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA OS ÓXIDOS DE SILÍCIO, DE FERRO E DE ALUMÍNIO EM LATOSSOLOS.

5.1 RESUMO

As funções de pedotransferência (FPTs) permitem estimar atributos do solo a partir de outros determinados em laboratório. Neste estudo desenvolveram-se FPTs para a determinação dos teores de óxidos de silício, de ferro e alumínio para os Latossolos. Relacionou-se os teores de óxidos de silício, de ferro e de alumínio com a granulometria, matéria orgânica, pH_{KCl} , $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, soma de bases, capacidade de troca de cations a pH do solo (CTCe) e a pH 7 (CTC_{pH7}). Para tanto se utilizou uma base de dados com 1174 horizontes superficiais e subsuperficiais de Latossolos de várias regiões do Brasil. A validação estatística das PTFs para a escala regional e local foi feita utilizando-se duas séries de dados independentes de 147 amostras cada. As FPTs obtidas apresentaram coeficientes de determinação de 0,75 e 0,88 e 0,42 para os óxidos de silício, alumínio, e de ferro, respectivamente. A partir do erro médio de predição (MPE) e do desvio padrão dos erros de predição (SDPE), concluiu-se que as funções de pedotransferência elaboradas neste estudo podem ser utilizadas para estimação dos teores de óxidos de silício e de alumínio na escala regional e local, enquanto que as funções de pedotransferência elaboradas para os óxidos de ferro se revelaram não viáveis para estimação dos mesmos. A fração argila apresenta-se como uma variável de grande importância na elaboração das funções de pedotransferência para predição dos teores dos óxidos de silício e alumínio nos Latossolos.

Palavras – chave: Atributos de solos. Banco de dados. Erro de predição.

PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR SILICUM, IRON AND ALUMINIUM OXIDES CONTENT IN LATOSSOLOS

5.1 ABSTRACT

The pedotransfer functions (PTFs) allow predicting expensive soil properties from easily measured soil attributes routinely determined in the laboratory. In this study PTFs were developed for the aluminum, iron and silicon oxides content in the Latossolos by means of Stepwise multiple linear regressions analysis. Aluminum, iron and silicon oxides content were estimated from soil particles sizes distribution, organic matter content, pH_{KCL} , $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, effective soil cations exchange capacity (CTCe), soil cations exchange capacity at pH7 (CTC_{pH7}). A database of 1174 samples of surface and subsurface horizons from various regions of Brazil was used to elaborate the PTFs. For the validation of the PTFs at regional and at local extension, two series of independent data of 147 samples each were used. The PTFs presented determination coefficient value of 0.75 and 0.88 and 0.42 for aluminum and silicon oxides content, respectively. The mean error of prediction (MPE) and standard deviation of the mean errors of prediction (SDPE) indicated that pedotransfer functions elaborated for silicon and aluminum oxides content in the Latossolos is promising to predict theses attributes at the regional and local scale

while theses elaborated for iron oxides content are inefficient at the two scale. The clay content is the most important soil attribute in the elaboration of theses pedotransfer functions.

Keys – words: Soils attributes. Data base. Mean estimation error.

5.2 INTRODUÇÃO

Latossolo é a ordem de solo de maior representatividade no Cerrado, cobrindo 46% deste bioma (ADAMOLI et al, 1986). Na fração argila desses solos, encontram-se principalmente minerais de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, representados pela caulinita, gibbsita, hematita e goetita (GHIDIN et al., 2006; SCHAEFER et al., 2008; REATTO et al., 2008; EBERHARDT et al., 2008). Esses minerais influenciam diretamente a porosidade, agregação (FERREIRA et al., 1999; CAMARGO et al., 2008), suscetibilidade à compactação (CENTURION et al., 2004) e retenção de água (BEUTLER et al., 2004) desses solos.

A determinação desses óxidos de ferro, de alumínio e de silício não é rotineiramente realizada nos laboratórios, pois é uma análise que demanda alto investimento de tempo e recursos financeiros. Portanto, esses atributos são usados no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos para calcular os índices K_i ($1,7 \times \text{SiO}_2$) / Al_2O_3) e K_r ($1,7 \times \text{SiO}_2$) / $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,6375 \text{Fe}_2\text{O}_3$) (EMBRAPA, 2006). Estes índices permitem estimar o grau de intemperismo de solos e separar solos cauliniticos de solos gibbsíticos. Os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 determinados pelo método do ataque sulfúrico, conforme Claessen, (1997), permitem também calcular, com base na cor e no teor dos óxidos, a mineralogia da fração argila como gibbsita, caulinita, hematita e goetita calculada, conforme Resende et al., (1987) e Resende e Santana (1988).

Devido às dificuldades na determinação de algumas propriedades dos solos, tanto no campo quanto em laboratório, verifica-se um crescente interesse pelo estabelecimento de métodos indiretos para suas estimativas (MACBRATNEY et al., 2002). Esses métodos são denominados de “funções de pedotransferências” (FPTs), e vem sendo largamente utilizados na ciência do solo para estimação de atributos de solos (TOMASELLA et al., 2000; BENITES et al., 2007; MICHELON et al., 2010). A inclusão dos óxidos de ferro e alumínio nessas funções pode reduzir o

erro padrão de predição pela estreita relação com os atributos do solo, a exemplo da predição da umidade do solo (BERG et al., 1997; REICHERT et al., 2009).

São escassos os trabalhos que desenvolvem equações para obtenção da mineralogia do solo. Assim, o objetivo deste trabalho é elaborar funções de pedotransferência para estimar os óxidos de alumínio e silício para os Latossolos.

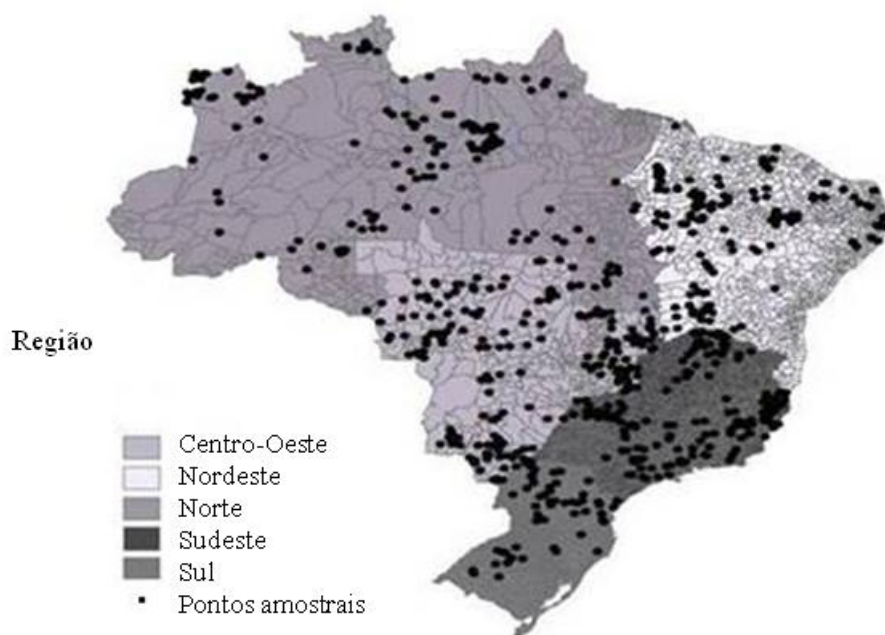
5.3 MATERIAL E MÉTODOS

5.3.1 Bancos de Dados

Para elaborar as FPTs, foi utilizado um banco de dados de 1073 horizontes, 536 subsuperficiais e 537 superficiais, de Latossolos provenientes de perfis de solos das cinco regiões do território brasileiro, obtidos em Cooper et al., (2005). Esse banco de dados agrupa atributos de Latossolos provenientes de levantamentos executados na década de 70 pelo projeto RADAMBRASIL.

Para validar as funções de pedotransferência na escala regional, utilizou-se um banco de dados de 147 amostras, 74 superficiais e 73 subsuperficiais, obtidos em Vendrame et al., (2010), contendo amostras situadas nos estados de Goiás, Mato Grosso e Minas Gerais. E, para validar as FPTs na escala local, um banco de dados de 147 amostras de horizontes subsuperficiais, provenientes de duas glebas de uma propriedade agrícola localizada no Planalto Central Brasileiro e Planaltina de Goiás – GO, (15°22'S e 47°27'O).

Figura 5.1 – Distribuição geográfica das amostras obtidos em Cooper et al., (2005), utilizadas para elaboração das funções de pedotransferência dos óxidos de silício de ferro e de alumínio.



Os três bancos de dados foram constituídos de teores de argila, areia fina, areia grossa, silte, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ e pH_{KCl} , matéria orgânica (MO), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions efetiva (CTCe), capacidade de troca de cátions a pH7 (CTCpH7) e teores de SiO_2 e Al_2O_3 totais, determinados conforme descrito em Claessen (1997).

5.3.2 Estatística

Na análise estatística descritiva foram calculados: média, mínimo, máximo e desvio padrão de todas as variáveis, com auxílio do programa SPSS 19.0. Foram realizadas correlações não lineares de Spearman entre os atributos dos solos e os óxidos de silício e alumínio. O método de análise utilizado para a construção das FPTs foi regressão linear múltipla passo a passo (*Stepwise*), que inclui no modelo apenas as variáveis independentes que contribuem de forma significativa no aumento do coeficiente de determinação, tornando assim os modelos mais simples. A multicolinearidade entre as variáveis preditoras foi analisada através do fator de incremento das variâncias (VIF). Segundo Hair et al., (2005), valores de

VIF menores que 10 indicam que a multicolinearidade não está influenciando os resultados da análise de regressão.

A avaliação da eficiência da predição de cada FPT foi feita com base no coeficiente de determinação (R^2) e no erro-padrão da estimativa (EPE). Foi feita a validação de modelos com maior número de atributos independentes e com coeficiente de determinação superior a 0,50, e a validação dos modelos na escala regional e local baseou-se no cálculo do erro médio de predição (MPE) e no desvio padrão do erro de predição (SDPE). Estes parâmetros foram calculados da seguinte forma:

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)$$

$$SDPE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(\hat{y}_i - y_i) - MPE]^2}$$

Onde \hat{y}_i e y_i são os atributos estimado e medido, respectivamente, e n é o número de amostras.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para obter-se uma FPT precisa é importante que o banco de dados seja representativo de todas as variações possíveis de solos da região alvo (MACBRATNEY et al., 2000, 2002; REICHERT et al., 2009). Na tabela 5.1 foram apresentados a média, máximo, mínimo e o desvio padrão dos atributos dos Latossolos. Observou-se que o banco de dados apresenta solos com teor de argila variando de 60 a 930 g.kg⁻¹, enquadrados como solos de textura arenosa a solos muito argilosos, conforme Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). O teor de silício total variou de 9 a 379 g.kg⁻¹ e o teor de alumínio total de 22 a 448 g.kg⁻¹. O teor de ferro variou de 3 a 692 g.kg⁻¹. A relação molecular K_i variou de 0,1 a 2,2 e a relação K_r de 0,03 a 2,04, englobando assim desde solos gibbsíticos a cauliniticos. As relações K_i e silte/argila foram inferiores a 2,2 e 0,7, respectivamente, indicando solos com grau avançado de imtemperismo, que neste estudo correspondem aos Latossolos (EMBRAPA, 2006). A variação tanto da

granulometria como da mineralogia é a expressão dos diversos materiais de origem e das diferentes condições ambientais que deram origem a esses solos.

A matéria orgânica variou de 1,0 a 54 g.kg⁻¹. É importante lembrar que o banco de dados deste estudo é constituído tanto de horizontes superficiais quanto subsuperficiais. Esse fato justifica o valor mínimo de matéria orgânica registrada, enquanto o valor 54 g.kg⁻¹ é um valor provavelmente dos horizontes superficiais onde tem mais deposição de resto de vegetais e animais.

O pH_{H₂O} variou de 3,5 a 6,90, sendo representativo de solo muito ácido e alcalino, respectivamente. Latossolos ácidos são comuns enquanto que Latossolos alcalinos são mais difíceis de encontrar. Esses altos valores de pH_{H₂O} justifica-se pelo fato que foi incluído nesse banco de dados alguns horizontes Ap de solos cultivados que, se supõe, receberam aplicações excessivas de calcário, prática comum para melhorar as propriedades químicas dos solos. O pH_{KCL} variou de 3,0 a 6,4, sendo que os baixos valores desse atributo indicam solos com alta saturação de alumínio, provavelmente amostras da Amazônia. O ΔpH variou de -1,9 a 1,8, indicando solos com predominância de cargas negativas e positivas na superfícies dos colóides, respectivamente. Solos com inversão de carga são geralmente encontrados nas antigas superfícies geomorfológicas do Brasil Central (KING, 1972; MOTTA et al., 2002), enquanto os com predominância das cargas negativas são encontradas em superfícies geomorfológicas mais recentes. A predominância das cargas negativas pode ser devido aos altos teores de carbono orgânico que apresenta predominância de cargas negativas, mesmo em condições de pH ácido.

A soma de bases variou de 0,6 a 32,9 cmolc.dm⁻³ e a CTCpH7 de 0,35 a 35,31 cmolc.dm⁻³, sendo que os valores mais baixos caracterizou provavelmente os horizontes superficiais geralmente muito intemperizados, enquanto que os elevados são provavelmente devidos aos altos teores de matéria orgânica dos horizontes superficiais.

Na Tabela 5.2 foram apresentadas as correlações lineares entre os óxidos e os atributos químicos e físicos. Observou-se que a fração argila e as frações areia grossa e fina apresentaram maiores correlações com os óxidos analisados. Dentre as frações granulométricas, a fração argila apresentou maior correlação com os óxidos de silício (r=0,83**) e de alumínio (r=0,91**). Relações estreitas entre a fração argila e os óxidos de ferro e alumínio ocorreram provavelmente pelo fato desses elementos tenderem a se acumular no solo

conforme a evolução do intemperismo, com menor magnitude para os óxidos de silício, mais sujeitos a lixiviação que os óxidos de alumínio. Esse fato justifica a maior correlação desses últimos com a fração argila.

Tabela 5.1 – Estatística descritiva do banco de dados para elaboração das funções de pedotransferência

Atributos de solo	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	CV(%)
Argila	1073	60	930	430	219	51
Areia grossa	1073	10	810	254	171	67
Areia fina	1073	10	770	214	149	69
Areia total	1073	20	900	468	247	53
Silte	1073	10	340	102	58	57
Silte/argila	1073	0,02	0,74	0,27	0,16	57
SiO ₂	1073	9	379	146	74	50
Al ₂ O ₃	1073	22	448	159	80	50
Fe ₂ O ₃	1073	3	692	82	81	99
Kr	1073	0,03	2,04	1,30	0,40	31
Ki	1073	0,10	2,25	1,66	0,44	26
pH _{H2O}	1073	3,20	6,90	4,94	0,60	12
pH _{KCL}	1073	3,00	6,40	4,25	0,56	13
ΔpH	1073	-1,90	1,80	- 0,69	0,35	
MO	1073	1,00	54,50	16,24	12,53	77
CECpH7	1073	0,35	35,33	5,93	4,00	67
SB	1073	0,06	32,09	1,29	2,26	175

N, número de amostras; areia fina (g.kg⁻¹); areia grossa (g.kg⁻¹); silte (g.kg⁻¹); Ds (g.cm⁻³) densidade de solo; Dp (g.cm⁻³), densidade de partículas, floculação (%); Fe₂O₃ (g.kg⁻¹), óxido de ferro; Al₂O₃ (g.kg⁻¹), óxido de alumínio; SiO₂ (g.kg⁻¹), óxido de silício; Ki (1,7x SiO₂)/Al₂O₃; Kr(1,7x SiO₂)/Al₂O₃+0,6375 Fe₂O₃; MO, matéria orgânica (g.kg⁻¹); SB(Cmolc. kg⁻¹), soma de bases, CTC7 (Cmolc. kg⁻¹), capacidade de troca de cátions a pH7; ΔpH, delta pH.

A areia total apresentou correlação significativa e negativa com os óxidos de silício e alumínio na mesma magnitude que a fração argila, provavelmente pelo fato de que essa fração é predominantemente constituída pelo quartzo, mineral resistente ao intemperismo. Quando se divide a fração areia em areia fina e grossa, os valores de correlação decrescem. A fração silte, pH_{H2O} e pH_{KCL}, matéria orgânica, soma de bases e CTCpH7 apresentaram as correlações mais baixas, provavelmente pelo baixo teor de silte nos Latossolos (TOMASELLA et al., 2000; EMBRAPA, 2006), enquanto as baixas correlações entre os óxidos, pH_{H2O}, pH_{KCL}, matéria orgânica; soma de bases e CTCpH7 indicam que esses atributos tem pouca influência nos teores dos óxidos, sendo provavelmente mais dependente das condições de drenagem e do material de origem.

Tabela 5.2 – Correlações lineares não paramétricas (Spearman) entre os óxidos e os atributos químicos e físicos (N=1073).

Atributos	Argila	Areia grossa	Areia fina	Areia total	Silte	Ki	Kr	pH _{H2O}	pH _{KCL}	ΔpH	MO	CEC_pH7	SB
SiO ₂	0.84 **	-0.63**	-0.68**	-0.83**	0.40	0.09	0.07	-0.03	-0.01	0.03	0.14	0.35	0.15
Al ₂ O ₃	0.95 **	-0.72**	-0.74**	-0.93**	0.45	-0.43	-0.41	0.10	0.22	0.17	0.27	0.32	0.00
Fe ₂ O ₃	0.78**	-0.68**	-0.56**	-0.79**	0.49	-0.45	-0.68**	0.20	0.30	0.12	0.32	0.35	0.11

Al₂O₃, óxido de alumínio; SiO₂, óxido de silício; Fe₂O₃, óxido de ferro; Ki, (1,7x SiO₂)/Al₂O₃; Kr (1,7x SiO₂)/Al₂O₃+0,6375Fe₂O₃; MO, matéria orgânica; SB, Soma de bases; ΔpH, delta pH; CTCpH7, capacidade de troca de cations a pH7

Os seguintes modelos foram feitos para estimar os teores de óxidos de silício e de alumínio e de ferro:

Modelo SiO₂ (1) = 26,732 + 0,278Argila
 Modelo SiO₂ (2) = 92,685+0,283Argila -16,065 pH_{KCL}
 Modelo SiO₂ (3) = 125,865 +0,278Argila - 25,153pH_{KCL}+6,052SB
 Modelo SiO₂ (4) = 168,636+ 0,293Argila -32,983pH_{KCL}+8,867SB- 1,207MO
 Modelo SiO₂ (5) = 181,689+ 0,278Argila - 32,788pH_{KCL}+8,723SB- 1,235MO-0,031 Areia fina

Modelo Al₂O₃ (1) = 13,612 + 0,339Argila
 Modelo Al₂O₃ (2) = -47,003+ 0,334Argila +14,875 pH_{KCL}
 Modelo Al₂O₃ (3) = -62,567 + 0,337Argila + 19,014pH_{KCL} - 2,756SB
 Modelo Al₂O₃ (4) = - 78,622 + 0,331 Argila + 21,195pH_{KCL}-3,813 SB+ 0,453MO
 Modelo Al₂O₃ (5) = - 79,487 + 0,327 Argila + 21,521pH_{KCL}- 4,036 SB+ 0,404MO +0,057Silte
 Modelo Fe₂O₃ (1) = -7,605 + 0,208Argila
 Modelo Fe₂O₃ (2) = -161,003+ 0,196Argila +37,384 pH_{KCL}
 Modelo Fe₂O₃ (3) = -164,722 -0,169Argila + 34,385pH_{KCL} - 0,276Silte
 Modelo Fe₂O₃ (4) = - 183,033 + 0,161 Argila + 37,406pH_{KCL}+0,227 Silte+ 0,836MO

Na Tabela 5.3 foram apresentados os parâmetros estatísticos das funções de pedotransferência (FPTs) elaboradas para estimar os teores de óxidos de silício. O fator de incremento de variância (VIF) foi inferior a 2,5 em todos os modelos, indicando ausência de colinearidade entre os atributos que foram retidos para elaboração dos modelos. Os modelos 1, 2 e 3, explicaram 69; 70; 73 e os modelos 4 e 5 explicaram cada 76% da variação total dos dados. O modelo 2 apresentou como variáveis preditoras a argila e o pH_{KCL}, no entanto, a inclusão desse segundo atributo permitiu aumentar apenas 1% de precisão na predição dos óxidos de silício. O modelo 3 apresentou a argila, o pH_{KCL} e a soma de bases com

um incremento de 2% de explicação em relação ao modelo anterior. O modelo 4 apresentou a argila, o pH_{KCL} , a soma de bases e a matéria orgânica como variáveis preditoras com um incremento de 2,8% da explicação e uma diminuição de erro de estimação de 2%, quando comparado ao modelo 3. O modelo 5 apresentou além dos atributos do modelo 4, a areia fina com pouco incremento na explicação da variação de dados comparado ao modelo 4.

Tabela 5.3 – Parâmetros estatísticos das funções de pedotransferências para estimação de óxidos de silício (N=1073).

Modelo	R	R ² ajustado	SEE	F	Intercepto	Argila	pH_{KCL}	SB	MO	Areia fina
1	0,826**	0,682**	41,49	2301	26,732	0,83 ^a (1,00)				
2	0,835**	0,697**	40,53	42	92,685	0,84 ^a (1,17)	-0,12 ^a (1,17)			
3	0,852**	0,726**	38,54	114	125,636	0,82 ^a (1,03)	-0,19 ^a (1,19)	0,19 ^a (1,18)		
4	0,871**	0,758**	38,17	145	168,636	0,87 ^a (1,09)	-0,25 ^a (1,30)	0,27 ^a (1,30)	-0,21 ^a (1,34)	
5	0,872**	0,760**	36,05	8	181,689	0,82 ^a (2,22)	-0,25 ^a (1,29)	0,27 ^a (1,42)	-0,21 ^a (2,14)	-0,063 ^a (2,24)

R, coeficiente de correlação múltipla; R², coeficiente de determinação; SEE, Erro padrão de estimação; a letra a como expoente corresponde aos coeficientes padronizados; números entre parênteses correspondem ao fator de incremento da variância associados às variáveis dos modelos; SB, soma de bases; MO, matéria orgânica; ** significativa a 1%.

Do modelo 1 que incluiu somente a fração argila até o modelo 5 que incluiu três atributos de solos a mais, incrementou somente 6% na predição dos óxidos de silício e reduziu cinco unidades no erro padrão da estimação (EES). Ao observar o coeficiente padronizado, parâmetro que indica a contribuição dos atributos independentes na predição do atributo dependente, nota-se, que o teor de argila apresentou o maior valor deste parâmetro em todos os modelos. Esses resultados destacam a importância da fração argila na elaboração de pedotransferência visando à estimação dos óxidos de silício no solo.

Tabela 5.4 – Parâmetros estatísticos das funções de pedotransferência para estimação de óxidos de alumínio (N=1073).

Modelo	R	R ² ajustado	SEE	F	Intercepto	Argila	pH_{KCL}	SB	MO	Silte
1	0,929**	0,863**	29,62	6734	13,612	0,929 ^a (1,00)				
2	0,935**	0,873**	28,45	91	-47,45	0,915 ^a (1,02)	0,104 ^a (1,02)			
3	0,937**	0,878**	27,88	45	-62,567	0,922 ^a (1,03)	0,133 ^a (1,18)	-0,078 ^a (1,18)		
4	0,939**	0,882**	27,44	35	-79,487	0,907 ^a (1,09)	0,154 ^a (1,30)	-0,108 ^a (1,44)	0,063 ^a (1,30)	
5	0,940**	0,883**	27,30	12	-79,487	0,894 ^a (1,21)	-0,151 ^a (1,30)	-0,114 ^a (1,44)	0,063 ^a (1,33)	0,041 ^a (1,30)

R, coeficiente de correlação múltipla; R², coeficiente de determinação; SEE, Erro padrão de estimação; a letra a como expoente corresponde aos coeficientes padronizados; números entre parênteses correspondem ao fator de incremento da variância associados às variáveis dos modelos; SB, soma de base; MO, matéria orgânica; ** significativa a 1%.

Na Tabela 5.4 foram apresentados os parâmetros estatísticos das funções de pedotransferências elaboradas para estimar os óxidos de alumínio. O modelo 1 explicou 86% da variação de dados; o modelo 2, 87%, e os modelos 3, 4 e 5 explicaram 88%. Todos esses modelos foram significativos a 1%. No modelo 1, a argila foi a única variável preditora. O modelo 2 apresentou como variáveis preditoras a argila e o pH_{KCL} . Além dessas duas variáveis, o modelo 3 inclui a soma de bases. O modelo 4 apresentou a fração argila, o pH_{KCL} , a soma de bases e a matéria orgânica como variáveis preditoras e o modelo 5 apresentou a fração silte a mais, além dos atributos que foram registrados no modelo 4. Do modelo 1 que inclui somente a fração argila até o modelo 4 que inclui quatro variáveis a mais, houve um aumento de somente 1% na predição dos óxidos de silício e uma redução de erro padrão de estimação de uma unidade. Como no caso dos modelos para os óxidos de silício, o teor de argila apresentou os maiores valores de coeficiente padronizado. Esses resultados estão em concordância com Tomasella et al., (2000), Reichert et al., (2009) e Benites et al., (2007) que relataram também a importância dessa fração na elaboração de pedotransferência para outros atributos nos Latossolos.

Tabela 5.5 – Parâmetros estatísticos das funções de pedotransferência para estimação de óxidos de ferro (N=1073).

Modelo	R	R ² ajustado	SEE	F	Intercepto	Argila	pH_{KCL}	Silte	MO
1	0,563**	0,316**	66,94	497,388	-7,605	0,563 ^a (1,00)			
2	0,619**	0,382**	63,65	114,358	-161,084	0,529 ^a (1,03)	0,259 ^a (1,20)		
3	0,645**	0,414**	61,96	60,128	-164,722	0,456 ^a (1,18)	0,238 ^a (1,03)	0,198 ^a (1,19)	
4	0,656**	0,428**	61,22	27,131	183,003	0,436 ^a (1,21)	0,259 ^a (1,1)	0,163 ^a (1,27)	0,126 ^a (1,64)

R, coeficiente de correlação múltipla; R², coeficiente de determinação; SEE, Erro padrão de estimação; a letra a como expoente corresponde aos coeficientes padronizados; números entre parênteses correspondem ao fator de incremento da variância associados às variáveis dos modelos; SB, soma de base; MO, matéria orgânica; ** significante a 1%.

Todos os modelos elaborados para os óxidos de ferro apresentaram coeficiente de determinação inferior a 0,50, indicando a não eficiência destes modelos na predição dos teores de óxidos de ferro nos Latossolos. Uma das possíveis explicações deste baixo coeficiente de determinação é a alta variação de teores de ferro observado. Este atributo apresentou um coeficiente de variação de 99%, quase o dobro do coeficiente de variação apresentado pelos óxidos de silício e de alumínio.

Ao observar os coeficientes padronizados com exceção do modelo 4 para predição de óxido de silício, nota-se que todos os modelos apresentam mais de uma variável preditora, e que o pH_{KCL} é o segundo atributo mais importante, tanto para predição dos óxidos de silício como de alumínio (Tabelas 5.3 e 5.4), de outra forma, a soma de bases e a matéria orgânica trazem as menores contribuições. A contribuição do pH_{KCL} e da soma de bases pode refletir a amplitude de variação mineralógica dos Latossolos.

A contribuição da matéria orgânica nos modelos de predição dos óxidos de silício e de alumínio reflete a capacidade que apresentam estes últimos atributos e os minerais nos quais são elementos de composição, como a caulinita e a gibbsita, de sequestrar o carbono.

As FPTs para estimação dos óxidos de alumínio foram mais precisas, pois apresentaram os maiores valores de coeficientes de determinação e os menores erros de estimação que as elaboradas para estimar os óxidos de silício. Não foi possível a avaliação destas FPTs por falta de outros modelos na literatura. No entanto, ao compararmos coeficientes de determinação com as da FPTs de Tomasella et al., (2000), Benites et al., (2007) e Reichert et al., (2009), elaboradas para estimar a retenção de água em diferentes potenciais e da densidade de solos nos Latossolos, respectivamente, observou-se que os coeficientes de determinação obtidos neste estudo apresentaram valores maiores que os obtidos por esses autores.

Tabela 5.6 – Parâmetros de validação das funções de pedotransferência para óxidos de silício e de alumínio na escala regional (N=147) e local (N=147).

Modelos	Escala Regional	
	MPE (g.kg^{-1})	SPEP (g.kg^{-1})
Modelo SiO_2 (4)	46	84
Modelo Al_2O_3 (4)	-38	83
	Escala local	
Modelo SiO_2 (4)	-6	53
Modelo Al_2O_3 (4)	-50	32

MPE, erro médio de predição; SDPE, Desvio padrão de predição.

Na Tabela 5.6 encontram-se parâmetros estatísticos para validação das FPTs na escala regional e local. Os modelos desenvolvidos para óxidos de silício e de alumínio foram mais precisos na escala local. Na escala regional, o

modelo 4, para estimar os teores de óxidos de silício e de alumínio, apresentaram valores semelhantes de desvio padrão de erro de predição, indicando uma precisão semelhante para estes modelos. Já na escala local, o modelo de estimação do teor de alumínio apresentou um valor menor de desvio padrão de erro de predição, indicando maior precisão.

Ao observar os erros médios de predição notou-se que os modelos desenvolvidos para óxidos de silício superestimam os teores dos óxidos de silício na escala regional e subestimam na escala local. Enquanto que os modelos para os óxidos de alumínio subestimam os teores óxidos de alumínio tanto na escala regional como local.

5.5 CONCLUSÕES

1-As funções de pedotransferência elaboradas neste estudo para estimar os teores de óxido de silício e de alumínio nos Latossolos podem ser utilizadas na escala regional e local enquanto as elaboradas para os óxidos de ferro se revelaram não viáveis para estimação deste atributo;

2- A fração argila apresentou-se como uma variável de grande importância na elaboração das funções de pedotransferência para predição dos teores dos óxidos de silício e alumínio nos Latossolos.

6 CONCLUSÕES GERAIS

1-No presente estudo observou-se que o modelo digital de elevação possibilitou delimitar com 55 e 74% de precisão as unidades de mapeamento na Gleba 1 e na Gleba 2, sendo que a delimitação precisa das unidades de mapeamento pode ser realizada com mais facilidade no campo prospectando-se ao longo dos limites já pré-estabelecidos pelo modelo digital de elevação, proporcionando assim uma redução de tempo e custos no levantamento de solos.

2- As técnicas de geoestatística permitiram representar melhor a variabilidade espacial de solos, pois possibilitaram estimar atributos de solos em pontos não amostrados quando apresentaram dependência espacial. Neste estudo o alcance dos atributos de solos variou de 284 m a 1000 m.

3-Para realizar estudos de variabilidade espacial de solos o número mínimo de pares de pontos é de 30, no caso deste estudo notou-se que mesmo com 78 e 97 pontos amostrais não foi possível revelar a dependência espacial de alguns atributos.

4- Os atributos de solos de determinação laboriosa e mais caros, como os óxidos de silício e de alumínio, podem ser estimados com auxílio de funções de pedotransferência para complementar a caracterização de solos. Mas, ter-se em mente que medir é sempre mais preciso que estimar.

5- Os solos da Gleba 1 foram classificados de LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Ácrico hipoférrico típico, textura argilosa e o LATOSSOLO VERMELHO Ácrico mesoférrico típico, textura muito argilosa, A moderado, e da Gleba 2 foram classificados de LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Álico hipoférrico equiaquico, textura média e o LATOSSOLO VERMELHO Hipodistروفico mesoférrico típico, textura muito argilosa.

REFERÊNCIAS

- ADAMOLI, J; MACEDO, J; AZEVEDO, L. G.; MADERA NETO, J. Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, W.J. (ed.). Solos dos cerrados: tecnologia e estratégia de manejo. São Paulo, **Editora Nobel**, 1986. p. 33-74.
- ALVAREZ VENEGAS, V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim Informativo da Sociedade. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.25, p.24-32, 2000.
- AMARO FILHO, J.; DELMIRO DE NEGREIROS, R. F.; ASSIS JÚNIOR R. N.; MOTA, J. C. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.31, p. 415-422, 2007.
- ANGELICO, J. C. Desempenho da co-krigagem na determinação da variabilidade de atributos do solo. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.30, p.931-936, 2006.
- ARATANI, R. G.; FREDDI, O. D. S.; FCENTURION, J.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um latossolo vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.33, p. 677-687, 2009.
- ASSAD, E.D., SANO, E. E., MASUTOMO, R., CASTRO, L. H. R. SILVA, F. A. M. Veranicos na região dos cerrados brasileiros: frequência e probabilidade de ocorrência. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.28, p. 993–1002, 1993.
- BALBINO, L. C.; BRUAND, A. ; COUSIN, I.; BROSSARD, M.; QUÉTIN, P.; GRIMALDI, M. Change in the hydraulic properties of a Brazilian clay Ferralsol on clearing for pasture. **Geoderma**, v.120, p. 297-307, 2004.
- BARBOSA, I. O. ; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R. Relações pedomorfogeológicas nas chapadas elevadas do distrito federal. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.33, p.1373-1383, 2009.
- BASTET, G. ; BRUAND, A. ; QUÉTIN, P. ; COUSIN, I. Estimation des propriétés en rétention en eau des sols a l'aide des fonctions de pedotransfer (FPT) : une revision bibliographique. **Étude et Gestion des sols**,v.5, p. 1, 1998.
- BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v.139, p.90– 97, 2007.
- BERG, M. V. D.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solos na região do planalto médio, RS: II. Análise da semivariância e da variância. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v.21, p. 401-408, 1997.
- BERNER, P. G. M.; VIEIRA, S. R.; Lima, E.; CUNHA DOS ANJOS L. H. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.31, p. 837-844, 2007.

BISPO, F. H. A.; SILVA, A. C.; VIDAL TORRADO, P. Highlands of the upper Jequitinhonha valley, Brazil. I – characterization and classification. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.35, p. 1069-1080, 2011.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, New York, v.9, p. 177-213, 1989.

BORNANG, M. ; ROBBEZ-MASSON; J. M. ; DONNET, A.; LACAZE, B. Caractérisation des sols et paysages des garrigues méditerranéennes. **Etude et gestion des Sols**, v.4, n.1, 1997.

BORSSOI, J, A.; URIBE-OPAZO, M. A.; ROJAS M. G. Diagnostic techniques applied in geostatistics for agricultural data analysis. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.33, p. 1561-1570, 2009.

BOTTEGA, E. L.; SILVA, S. A.; COSTA, M. C.; BOTTEGA, S. P. Cokrigagem na estimativa dos teores de Ca e Mg em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista. Ciência Agrícola**, v.42 p. 821-828, 2011.

BRAUN, O. P. G. Contribuição à geomorfologia do Brasil Central. **Revista Brasileira de Geografia**, v.32, p. 3-39, 1971.

BROSSARD, M.; BARCELLOS, A. O. Conversão do cerrado em pastagens cultivadas e funcionamento de latossolos. **Caderno de Ciência Tecnológica**, v.22, p. 153–168, 2005.

CAGLIARI, J.; VERONEZ, M. R.; ALVES, M. E. Remaining phosphorus estimated by pedotransfer function. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.35, p. 203-212, 2011.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of na alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.34, p. 617-630, 2010.

CAMARGO, A. L.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência de. Solo**, v.32, p. 2279-2288, 2008.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, J. E. G.; SILVA, H. F. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal**. Brasília, IEMA/SEMATEC/UnB, 1998. 84p.

CAMPOS, M. C. C; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C. Relações solo-paisagem em uma topossequência sobre substrato granítico em Santo Antônio do matupi, manicoré (AM). **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.35, p. 13-23, 2011.

CAMPOS, M. C.C.; CARDOZO, N. P.; MARQUES JÚNIOR, J. Modelos de Paisagem e sua Utilização em Levantamentos Pedológicos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.6, n.1, 2006.

CAMPOS, P. M.; LACERDA, M. P. C.; SILVA, C. L.; SÁ, M. A. C.; SOUSA, D. M. J. Drenagem interna como fator de diferenciação de Latossolos do Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.3, p. 306-314, 2010.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.27, p. 695-703, 2003.

CAVALCANTE, E.G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**. v.31, n.6, p. 1329-1339, 2007.

CEDDIA, M. B.; VIEIRA, S. R.; VILLELA, A. L. O. ; MOTA, L. S.; CUNHA DOS ANJOS, L. H.; CARVALHO, D. C. Topography and spatial variability of soil physical properties. **Scientia Agricola**. (Piracicaba, Braz.), v.66, n.3, p. 338-352, 2009.

CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; SOUZA, Z. M. Physical attributes of kaolinitic and Oxidic Oxisols resulting from different usage systems. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.47, n.5, p. 725-732, 2004.

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; VIEIRA, C. A. O.; SCHAEFER, C. E. G. R.; CARVALHO JÚNIOR, W. Atributos topográficos e dados do Landsat7 no mapeamento digital de solos com uso de redes neurais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.5, p. 497-507, 2010.

CLAESSEN MEC (ORG). 1997. Manual de métodos de análise de solo. 2nd ed., **Embrapa-CNPS**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 212 p.

COELHO F. F.; GIASSON, E. Métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. **Ciência Rural**, v.40, n.10, 2010.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Education Psychology Measure**, v.46, p. 20:37, 1960.

COOPER, M. ; MENDES, L. M. S.; SILVA, W. L. C. ; SPAROVEK, G. A National Soil Profile Database for Brazil Available to International Scientists. **Soil Science Society America Journal**, 2005.

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

CORÁ, J.; BERALDO, G. 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**, Jaboticabal, v.26, n.2, p. 374-387, 2006.

CUNHA, P; MARQUES. ; J. J R; CURI, N.; PEREIRA, T. G.; I. F LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de latossolos em uma seqüência arenítica-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p. 81-90, 2005.

CURI, N., FRANZMEIER, D. P. Toposequence of oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p. 341-346, 1984.

DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; PEDRON, F. de A.; AZEVEDO, A. C. de. Relação entre as características e o uso das informações de levantamentos de solos de diferentes escalas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.5, p. 1479-1486, 2004.

DALRYMPLE, J. B. BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land surface model. Z. **Geomorphology**, Berlin, v.12, n.1, p. 60-76, 1968.

DANIELS, R. B.; GAMBLE, E. F.; CADY, J. G. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. **Advances in Agronomy**. Madison, v.23, p. 51-87, 1971.

DANTAL, M. E. Projeto zoneamento ecológico-econômico da região integrada de desenvolvimento do distrito federal e entorno ZEE RIDE - fase I, **Mapa geomorfológico**, escala 1:250.000, Datum horizontal: SAD-69 - MG, 2002.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T.; GUIMARÃES, M. F. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção de fósforo em Latossolos sob pastagens no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 1009-1016, 2008.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Coservação dos Solos. Levantamento e reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Rio de Janeiro: **EMBRAPA-SNLCS**, 1978.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 2006. 354 p.

FERREIRA, C. A.; SILVA, A. C.; VIDAL-TORRADO, P.; ROCHA, W. W. Genesis and classification of oxisols in a highland toposequence of the Upper Jequitinhonha valley (MG). **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.34, p. 195-209, 2010.

FIGUEIREDO, S. R; GIASSON, E; C. G; TORNQUIST; NASCIMENTO C. G. P. Uso de regressões logísticas múltiplas para mapeamento digital de solos no planalto médio, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 2779-2785, 2008.

FRANZEN, D. W. ; NANNA, T. NORVELL, W. A. A Survey of Soil Attributes in North Dakota by Landscape Position. **Agronomy journal**, v.98, 2006.

FREITAS, P. L. ; BLANCANEUX, PH, MOREAU, R. ; Caractérisation structurale des sols de Cerrados Brésiliens (Savanes) sous différents modes d' utilisation. **Etudes e Gestion des Sols**,v.2,5, p. 93-105, 1998.

GAOUAS, A., BELLAHRECHE, A. ; KARA-HASSAN ; A. Utilisation des systemes d'information geographique pour la connaissance et la gestion des ressources en sol. **Annales de l'Institut National Agronomique-EL-HARRACH**. v. 20, n.1 e 2, 1999.

GHIDIN, A.; MELO V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Topossequências de latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II – relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.30, p. 307-319, 2006.

GHIDIN, A.; MELO V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Topossequências de latossolos originados de rochas basálticas no Paraná I – mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.30, p. 293-306, 2006.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.26, p. 885-893, 2002.

GIASSON, E; CLARKE, R. T.; INDA JUNIOR, A. V. MERTEN, G. H.; TORNQUIST, C.G.3. Digital soil mapping using multiple logistic regression on terrain parameters in southern brazil. **Scientia Agrícola. (Piracicaba, Braz.)**, v.63, n.3, p. 262-268, 2006.

GIRARD, M-C. ; GURY, M. ; FLORENTIN, L. Comparaison de la synthèse de cartes de sol et de la segmentation d'images satellitales pour l'élaboration d'une carte des sols au 1 : 250 000 : application à une zone de la Lorraine. **Étude et Gestion des Sols**, v.10, n.1, p. 43-60, 2003.

GOMES, J. B. V.; CURTI, N.; SCHULZE, D. G.; MARQUES, J. C. KER.; J. J. G. S. M.; MOTTA, P. E. F. Mineralogia, morfologia e análise microscópica de solos do Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.28, p. 679-694, 2004.

GOMES, N. M.; FARIA M. A. SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; VIOLA M. R. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.4, p. 427-435, 2007.

GOMES, J. B. V.; BOLFE, E. L.; CURTI, N.; FONTES, H. R.; BARRETO, A. C.; VIANA, R. D. Variabilidade espacial de atributos de solos em unidades de manejo em área piloto de produção integrada de coco. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.32, p. 2471-2482, 2008.

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

GRINAND, C.; ARROUAYS, D.; LAROCHE B.; MARTIN, M. P. Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: Sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. **Geoderma**, v.143, p. 180-190, 2008.

GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S. R.; CHIBA, M. K.; GREGO, C. R. Geostatistical analysis of crop yield maps in a long term no tillage system. **Bragantia**, Campinas, v. 69, Suplemento, p. 9-18, 2010.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAGIA E ESTATÍSTICA IBGE, 2004.
Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm>>. Acesso em: 17 fev. 2011. IBGE. Mapa de biomas do Brasil. Escala 1:5. 000.000. Rio de Janeiro:

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAGIA E ESTATÍSTICA- IBGE. Produção Agrícola Municipal, 2009, Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 15 dez. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAGIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais**. Manual Técnico de Pedologia 2.ed. Rio de Janeiro, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAGIA E ESTATÍSTICA- IBGE. Mapa de biomas do Brasil. Escala 1:5. 000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/>. Acesso em: 15 dez 2011.

IPPOLITI, R. G A.; COSTA, L. M. D.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO. I. E. ; GAGGERO, M. R. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de “mar de morros (MG)”. **Revista Brasileira Ciência de Solo**, v.29, p. 269-276, 2005.

JAMAGNE, M. ; BOULAINÉ, J. Quelques données sur les activités du Service d’Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France. **Etude et Gestion des Sols**, v.11, n.3, p. 353-366, 2004.

JENNY, H., 1941. **Factors of soil formation**: a system of quantitative pedology. Dover Publications, New York, 281 p.

KING, L. C. A. A geomorfologia do Brasil Central. **Revista Brasileira de Geografia**, v.18, n.2, p. 147-256, 1956.

LACERDA, M P C; QUEMÉNÉUR, J. J. G; ANDRADE, H; ALVES, H. M. R; TATIANA GROSSI CHQUILLOF VIEIRA, T. G. C. Estudo da relação pedomorfogeológica na distribuição de solos com horizontes b textural e b nítico na paisagem de lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p, 271-284, 2008.

LANDIS, J.; KOCH, G. **The measurement of observer agreement for categorical**, 1978.

LAURENT, F ROSSIGNOL, J. P. Cartographie des propriétés hydriques des sols à partir de la lithologie et des pentes. Application au bassin versant de la Moine (Maine-et-Loire, France). **Étude et Gestion des Sols**, v.10, n.3, p. 155-172, 2003.

LEGROS, J. P; KOLB, O; FALIPOU, P; Délimitation d’unités de paysages sur des photographies aériennes, éléments de réflexion pour la définition d’une méthode des tracés. **Études et gestion des sols**. v.2,n.3, p. 113-124, 1996.

LEHMANN, S.; BEGON, J. C. ; EIMBERCK, M; DAROUSSIN, J. ; WYNN, R. ; ARROUAYS, D. Utilisation du logiciel CLAPAs pour l'aide à la délimitation de pédopaysages Un test sur la carte des sols de Mirande (Gers, France). **Etude et Gestion des Sols**, v.14, n.2, p. 135-151, 2007.

LEMOS R. C. e SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3.ed. Campinas: SBSC/CNPS, 2005. 84 p.

LOPES, A. S.; COX, F. R. A survey of the fertility status of surface soils under cerrado vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, .v.41, p. 742–747, 1977.

LOUGHNAN, F.C. Chemical weathering of the silicate minerals. New York, **Elsevier**, 1969. 154 p.

MACEDO, J e BRYANT, R. B. Morphology, mineralogy, and genesis of a hydrosequence of Oxisols in Brazil . **Soil Science Society America Journal**, v.51, p. 690-698, 1987.

MACEDO, J.; BRYANT, R. B. Preferential Microbial Reduction of Hematite Over Goethite in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society America Journal**, v.53, n.4, 1989.

MANNING, G. ; FULLER, L. G ; EILERS, R. G. ; FLORINSKY, I. Topographic influence on the variability of soil properties within an undulating Manitoba landscape **Canadian Journal of Soil Science**,v.81, p. 439–447, 2001.

MARQUES, J. J. ; SCHULZE , D .G. ; CURI, N. ; MERTZMAN, S. A. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v.119, p. 179–195, 2004.

MCBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; THOMAS F.A. BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M .An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**,v.97, p. 293–327, 2000.

MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; CATTLE, S. R. VERVOORT, R. W. From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, v.109, p. 41-73, 2002.

MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; TRANTER, G. Necessary meta-data for pedotransfer functions **Geoderma**, v.160, p. 627–629, 2011.

MCKINION, J. M. ; WILLERS, J. L. ; JENKINS , J. N. Spatial analyses to evaluate multi-crop yield stability for a field. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.70 p. 187–198, 2010.

MELFI, A. J.; PEDRO, G.; VOLKOFF, B. Natureza e distribuição dos compostos ferríferos nos solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência de solo**, v.3, n.1, p. 47-54, 1979.

MOTTA, P. E. F.; CARVALHO FILHO, A.; KER, J. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO JUNIOR, W.; BLANCANEUX, P. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p. 869-878, 2002.

MUNSELL COLOR COMPANY. **Munsell soil color charts**. 1975.

NANNI, M. R.; CÉZAR, E; CHICATI, M. L.; HATA, F. T.; OLIVEIRA, R. B; DEMATTÊ, J. A. Discriminação de unidades de paisagem para fins de levantamentos pedológicos por meio da resposta espectral orbital. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.32, n.3, p. 555-561, 2010.

NASCIMENTO, G. B.; ANJOS, L. H.C.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; SANTOS, H.G Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.5, n.4, p. 560-569, 2010.

OBALLOS, J. ; LAGACHERIE, P. Utilisation d'un secteur de référence pour désagréger les unités cartographiques complexes d'un référentiel régional pédologique Un premier essai en plaine viticole héraultaise . **Étude et Gestion des Sols**, v.10, n.2, p. 81 à 94, 2003.

REATTO , A. A. B. ; BRUAND B A. ; EDER, S. M. A. ; FABRICE, M. B. ; EUZEBIO M. S. A. ; OSMAR, A. C. J. R. C; BROSSARD, M. Variation of the kaolinite and gibbsite content at regional and local scale in Latosols of the Brazilian Central Plateau. C,R,**Geoscience**,v 340, p. 741-748 2008.

REATTO , A.; BRUAND, A.; MARTINS, E. S.; MULLER, F.; SILVA, E. M.; CARVALHO J, O. C.; BROSSARD, M.; GUY RICHARD, G. Development and origin of the microgranular structure in latosols of the Brazilian Central Plateau: Significance of texture, mineralogy, and biological activity. **Catena**, v.76, p. 122–134, 2009.

REICHERT, J. M.;ALBUQUERQUE,J.A.; KAISER, D. R, REINERT, D. J.; URACH, F. L.; CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.33, p. 1547-1560, 2009.

RESENDE, M.; BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M. Mineralogia da argila de latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p. 17–23, 1987.

RESENDE, M.; SANTANA, D. P. Uso das Relações Ki e Kr na estimativa da mineralogia para classificação dos Latossolos. In. REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., Rio de Janeiro, 1988. **Anais...** Rio de Janeiro. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA–SNLCS/SECS, 1988. p. 225-229.

REUTER H. I; GIEBEL, A.; WENDROTH, O. Can Landform Stratification Improve Our Understanding of Crop Yield Variability? **Precision Agriculture**, v.6, p. 521–537, 2005.

RODRIGUES, T.E.; KLAMT, E. Mineralogia e gênese de uma sequência de solos do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.2, p. 132-139, 1978.

RUHE, R. V. Geomorphic surfaces and the nature of soils. **Soil Science**, Baltimore, v.82, p. 441-445, 1956.

SALEHI, M. H. E. G. ; HBAL , M. K .; KHADEMI, H .Comparison of soil variability in a detailed and a reconnaissance soil map in central Iran. **Geoderma**, v.111, p. 45–56, 2003.

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

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO J. L. S.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.1, p. 153-156, 2008.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO J. L. S.; FERREIRA, L. G Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environment Monitorament Assess**,v.4, p. 10661-009-0988, 2009.

SANTOS , M. L.; H.G. DOS SANTOS, H. G, The state of the art of brazilian soil mapping and prospects for digital soil mapping. **Developments in Soil Science**, v.31, 2007.

SILVA, A. P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.32 p. 1-10, 2008.

SILVA, F. H. F.; CAMPOS, J. E. G. Geologia do Distrito Federal. **In inventário hidrogeológico dos recursos hídricos superficial de Distrito federal**, Brasilia, SEMATEC, IEMA: SRH, 1999, Cd Room.

SILVA, S. D. A.; LIMA, J. S. D. 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.

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

SOUZA , Z. M.; CERRI D. G. P.; MAGALHÃES.; P. S. G.; SIQUEIRA, D. S. Spatial variability of soil attributes and sugarcane yield in relation to topographic location. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.12, p. 1250–1256, 2010.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T . Spatial Variability of the Physical and Mineralogical Properties of the Soil from the Areas with Variation in Landscape Shapes. **Brazilian Archealogy and Biology Technology**. v.52 n.2, p. 305-316, 2009.

SURFER. Surfer 8.0: Contouring and 3d surface mapping for scientists and engineers. **User's Guide**. New York, Golden Software, Inc., 2002. 619p.

TOMASELLA, HODNETT, J. M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, 2000.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **Soil Science Society of American Journal**. New York, v.263, p. 616-27. 1965.

VENDRAME, P R. S; BRITO ,O .R. ; GUIMARÃES, M. F. ; MARTINS , E. S.; BECQUER,T. Fertility and acidity status of Latossolos (oxisols) under pasture in the Brazilian Cerrado. **Anales Académica Brasileira Ciencia**, v.82, n.4, 2010.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V.H. e SCHAEFER, G. R., Eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2000, v.1.p. 1-54.

VOLKOFF, B ; MELFI, A. J ; PEDRO, G. Nature des oxydes de fer dans les sols du Brésil répartition en fonction du climat **Science Géologique**, Bulletin, n.42, n.1, p.15-25, Strasbourg, 1989.

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, 1980.cap. 2, p. 319-344.

WEBSTER, K. L; CREED, I. F; BEALL, F. D.; BOURBONNIÈRE, R. A. A. Topographic template for estimating soil carbon pools in forested catchments. **Geoderma**, v.160, p. 457–467, 2011.