

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DA GEOESTATÍSTICA E DE RECURSOS DE GEOPROCESSAMENTO
NO DIAGNÓSTICO DA DEGRADAÇÃO DE UM SOLO ARGILOSO
SOB PASTAGEM NO ESTADO DE MATO GROSSO**

EMÍLIO CARLOS DE AZEVEDO

CAMPINAS
JANEIRO DE 2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**USO DA GEOESTATÍSTICA E DE RECURSOS DE GEOPROCESSAMENTO
NO DIAGNÓSTICO DA DEGRADAÇÃO DE UM SOLO ARGILOSO
SOB PASTAGEM NO ESTADO DE MATO GROSSO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual de Campinas, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola na área de concentração em Água e Solo

EMÍLIO CARLOS DE AZEVEDO

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Bianor Sverzut

Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Daniel

CAMPINAS
JANEIRO DE 2004

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Az25u	Azevedo, Emílio Carlos de Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no estado de Mato Grosso / Emílio Carlos de Azevedo.--Campinas, SP: [s.n.], 2004. Orientadores:.Cláudio Bianor Sverzut e Luiz Antônio Daniel Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 1. Solos degradação. 2. Pastagens. 3. Análise espacial - Estatística. 4. Sistemas de informação geográfica. I. Sverzut, Cláudio Bianor. II. Daniel, Luiz Antônio. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.
-------	---

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TESE DE DOUTORADO

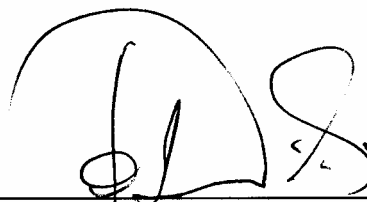
USO DA GEOESTATÍSTICA E DE RECURSOS DE GEOPROCESSAMENTO
NO DIAGNÓSTICO DA DEGRADAÇÃO DE UM SOLO ARGILOSO
SOB PASTAGEM NO ESTADO DE MATO GROSSO

EMÍLIO CARLOS DE AZEVEDO

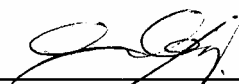
Aprovada em 20/01/2004



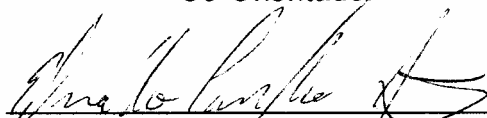
Prof. Dr. Cláudio Bianor Sverzut
FEAGRI/UNICAMP
Orientador



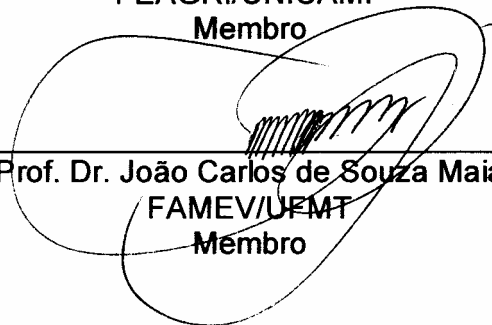
Prof. Dr. Luiz Antônio Daniel
FEAGRI/UNICAMP
Co-Orientador



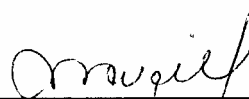
Prof. Dr. Carlos Roberto Espindola
FEAGRI/UNICAMP
Membro



Prof. Dr. Ednaldo Carvalho Guimarães
FAMAT/UFU
Membro



Prof. Dr. João Carlos de Souza Maia
FAMEV/UEMT
Membro



Profa. Dra. Mara de A. Marinho Weill
FEAGRI/UNICAMP
Membro

"O acúmulo de erudição deve ser transformado em sabedoria para que o crescimento individual seja revertido ao desenvolvimento da sociedade."

E. C. Azevedo

*A Deus,
essência da vida.*

*Aos meus pais José e Inês,
pela presença, pelo apoio, pela simplicidade,
pela doação incondicional e
pelos ensinamentos ao longo da vida.*

*À minhas irmãs Patrícia e Virginia,
pelo entusiasmo na busca do saber,
pelo apoio e
pela generosidade humana.*

*À minha esposa Elizabeth (Beth),
pela compreensão,
pela dedicação,
pelo companheirismo,
pelos ensinamentos e
pela melhor compreensão da vida.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Mato Grosso, em especial ao Departamento de Solos e Engenharia Rural da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, cujos professores apoiaram totalmente meu afastamento e pela confiança em mim depositada.

À Pró-Reitoria de Ensino de Pós-Graduação da Universidade Federal de Mato Grosso, que sempre atendeu prontamente minhas solicitações.

À Universidade Estadual de Campinas, em especial ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola, pela oportunidade da realização do curso.

À CAPES, pela concessão da bolsa de pós-graduação através do PICDT, durante a realização deste curso.

Aos meus pais José e Inês, que nunca pouparam esforços na minha educação, estando sempre dispostos a ajudar e auxiliar na transposição dos obstáculos da vida, a quem tudo devo, expresso minha eterna gratidão.

Às minhas irmãs, Patrícia e Virginia, que buscaram o mesmo caminho, acreditando que o conhecimento é a chave para formar uma sociedade mais justa e igualitária, que nunca pouparam esforços em me auxiliar, expresso minha gratidão;

À minha esposa Elizabeth (Beth), sempre companheira, que está comigo em todos os momentos, auxiliando e apoiando, seja pela palavra amiga ou pelos conselhos, seja pela ajuda propriamente dita, que muito tem ensinado sobre a generosidade humana e melhor compreensão da vida, expresso a minha mais sublime gratidão.

Ao Prof. Dr. Cláudio Bianor Sverzut, de modo especial, pela oportunidade de tê-lo como orientador, pela confiança incondicional, pela ajuda, pela dedicação, pela paciência e, acima de tudo, pela inestimável amizade e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Eduardo Guimarães Couto, pela ajuda inestimável, desde o início da formulação das idéias até a fase final da realização deste trabalho e, acima de tudo, pela dedicação na área da ciência do solo.

Ao Prof. Dr. Ednaldo Carvalho Guimarães, pela ajuda nos ensinamentos de geoestatística, pela dedicação e pronto atendimento nas horas solicitadas e pela inestimável colaboração durante a realização da pesquisa.

Ao Prof. Luiz Antônio Daniel, pela orientação no primeiro ano, pela compreensão e pela ajuda.

Aos professores, técnicos e funcionários da Coordenação de Pós-Graduação do Curso de Engenharia Agrícola, em especial à Aninha e Marta, pela dedicação e eficiência, que envidaram esforços e sempre prontamente me atenderam.

Aos Professores Drs. Jansle Vieira Rocha e Carlos Roberto Espíndola, componentes da banca examinadora de defesa do projeto de tese, pela colaboração e pelas sugestões no trabalho de pesquisa.

Ao pessoal da Biblioteca da Área de Engenharia, em especial às bibliotecárias Raquel e Rose, que sempre prontamente me atenderam, pela dedicação e eficiência na busca dos materiais necessários para a realização da revisão bibliográfica e da discussão dos resultados da tese.

À Dra. Oscarlina Lúcia dos Santos Weber, chefe do Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, pelo auxílio na realização das análises, pela colaboração, sugestões e críticas nos trabalhos de campo e pela leitura e crítica da tese.

Ao Dr. Virlei Álvaro de Oliveira, do IBGE-Goiânia, pelo auxílio na descrição morfológica, pela coleta de amostras e classificação dos solos dos perfis estudados.

Aos colegas Dr. Aloísio Bianchini, Dr. João Carlos de Souza Maia, MSc. Jonas Sguarezi e MSc. Antonio Marcos Iaia, pela ajuda, seja pelo apoio, pela colaboração ou pelas sugestões nos trabalhos relacionados à pesquisa.

Aos funcionários e professores responsáveis pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, pela realização das análises das amostras de solos.

Ao Prof. MSc. Pedro Kaiser e Prof. Dr. João Pedro Valente, Chefe do Departamento de Solos e Engenharia Rural e Diretor da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, respectivamente, pelo apoio constante e pelo pronto atendimento às solicitações durante o afastamento para realização do curso.

Ao Prof. Dr. Nilton Tocicazu Higa, do Departamento de Solos e Engenharia Rural da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, por ter assumido meus encargos didáticos durante o período de afastamento para a realização do curso.

À Lucia Ferreira, que sempre prontamente me atendeu e ajudou indiretamente nos trabalhos relacionados à pesquisa e, acima de tudo, pela amizade.

Ao pessoal da EMBRAPA Monitoramento por Satélite, em especial ao pesquisador MSc. João Alfredo de Carvalho Mangabeira, pela oportunidade, pela ajuda e auxílio nos trabalhos relacionados à utilização dos sistemas de informações geográficas.

Ao Sr. Paulo Jaci Marcondes, proprietário da fazenda Chuva da Mata, pela concessão de uso das áreas de estudo e ao Sr. José Cabulon Guerra, gerente da fazenda, pela ajuda e auxílio na coleta de informações sobre o histórico de uso da área com pastagem.

Ao Sr. Dorival José de Araújo e ao Sr. Sebastião Soares Filho (Tiãozinho), de modo especial, pela ajuda inestimável nos trabalhos de campo e pela dedicação em aprender.

Ao pessoal do município de Glória D'Oeste, que sempre esteve disposto a ajudar prontamente nas atividades direta ou indiretamente relacionadas aos trabalhos de pesquisa.

Aos professores e colegas do curso de pós-graduação em Engenharia Agrícola, pelo convívio e pela ajuda, que de uma forma ou de outra, vieram contribuir com a realização do curso.

Ao Laboratório Agroanálise, na pessoa do Sr. José Joaquim e Souza Neto, pelo subsídio nas análises de solos, pela colaboração e pela dedicação na obtenção dos resultados de forma confiável.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente nas atividades relacionadas à realização do curso e dos trabalhos de pesquisa.

SUMÁRIO

	página
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE QUADROS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Solo como parte do ambiente	3
2.2. Degradação dos solos	5
2.2.1. Qualidade do solo como indicador da sua degradação	10
2.2.2. Atributos dos solos utilizados no diagnóstico da sua degradação	13
2.2.3. Estudos sobre a degradação dos solos.....	16
2.2.4. Degradação dos solos sob pastagem	18
2.3. Geoestatística no estudo da variabilidade espacial do solo	21
2.3.1. Semivariograma e krigagem como ferramentas da geoestatística	24
2.4. Sistemas de informações geográficas na análise espacial das informações	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. Região e áreas de estudo	32
3.1.1. Características da região e das áreas de estudo	33
3.1.2. Histórico de uso da área com pastagem.....	37
3.1.3. Solos em estudo	37
3.2. Amostragem e caracterização dos solos	45
3.3. Procedimentos operacionais e estatísticos.....	50
3.3.1. Diagnóstico qualitativo	50
3.3.2. Diagnóstico quantitativo	51
3.3.2.1. Mapas da distribuição espacial dos atributos do solo.....	52
3.3.2.2. Análise quantitativa.....	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1. Diagnóstico qualitativo da degradação do solo sob pastagem	59
4.2. Distribuição espacial dos atributos do solo	81
4.3. Diagnóstico quantitativo da degradação do solo sob pastagem	109
5. CONCLUSÕES.....	125

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
APÊNDICE	139

LISTA DE FIGURAS

	página
FIGURA 1 - Fluxograma metodológico.....	31
FIGURA 2 - Localização da Fazenda Chuva da Mata em Glória D'Oeste-MT	32
FIGURA 3 - Aspecto das áreas de estudo. (a) Pastagem com <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú à frente e floresta tropical subcaducifólia ao fundo. (b) Floresta tropical subcaducifólia.....	36
FIGURA 4 - Perfil do Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico Típico, presente na área com mata (floresta tropical subcaducifólia). Coordenadas 15°42'22,9''S e 58°18'03,1''WGr	44
FIGURA 5 - Perfil do Latossolo Vermelho Eutrófico Típico, presente na área com pastagem (<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú). Coordenadas 15°42'29,8''S e 58°17'56,4''WGr.....	44
FIGURA 6 - Esquema de amostragem, contendo um conjunto de 121 pontos amostrais. Área total de 1 ha	46
FIGURA 7 - Pontos e malha amostral demarcados nas área com mata (floresta tropical subcaducifólia) e na área com pastagem (<i>Brachairia brizantha</i> cv. Marandú). (a) pontos demarcados na área com mata; (b) estaca demarcando ponto amostral da área com mata; (c) pontos demarcados na área com pastagem; (d) estaca demarcando ponto amostral da área com pastagem.....	48
FIGURA 8 - Material utilizado para amostragem e caracterização dos solos. (a) trado de caneca; (b) amostrador de koppec; (c) trado holandês; (d) penetrógrafo eletrônico automático; e (e) anel de infiltração para determinação da curva de infiltração da água no solo	49
FIGURA 9 - Fluxograma de procedimentos e operações da análise quantitativa.....	55
FIGURA 10 - Histogramas de freqüências dos atributos pH, P, K e Ca da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.....	63
FIGURA 11 - Histogramas de freqüências dos atributos Mg, SB, CTC e V da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.....	64
FIGURA 12 - Histogramas de freqüências dos atributos MO, N, C/N e B da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem	65
FIGURA 13 - Histogramas de freqüências dos atributos Cu, Fe, Mn e S da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem	66
FIGURA 14 - Histogramas de freqüências dos atributos Zn da camada de 0-20 cm e Ds, RSP e Ks da camada de 5-10 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.....	67
FIGURA 15 - Histogramas de freqüências dos atributos Ma, Mi, PT e RSP da camada de 5-10 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.....	68
FIGURA 16 - Curvas de infiltração de água do solo sob mata e do solo sob pastagem	78

FIGURA 17 - Semivariogramas ajustados do pH, P-Resíduo, K e Ca do solo sob mata, e do pH, P-Resíduo, Ca-Resíduo e Ca-Resíduo do solo sob pastagem.....	85
FIGURA 18 - Semivariogramas ajustados do Mg-Resíduo, SB, CTC e V do solo sob mata, e do Mg-Resíduo, SB-Resíduo, CTC-Resíduo e V do solo sob pastagem.....	86
FIGURA 19 - Semivariogramas ajustados do MO, N-Resíduo, C/N-Resíduo e B do solo sob mata, e do MO-Resíduo, N-Resíduo, C/N e B do solo sob pastagem.....	87
FIGURA 20 - Semivariogramas ajustados do Cu, Fe, Mn-Resíduo e S do solo sob mata, e do Cu, Fe, Mn-Resíduo e S-Resíduo do solo sob pastagem.....	88
FIGURA 21 - Semivariogramas ajustados do Zn, Ds, RSP e Ks do solo sob mata, e do Zn-Resíduo, Ds, RSP e Ks do solo sob pastagem.....	89
FIGURA 22 - Semivariogramas ajustados do Ma, Mi, PT e GF-Resíduo do solo sob mata, e do Ma, Mi-Resíduo, PT-Resíduo e GF-Resíduo do solo sob pastagem.....	90
FIGURA 23 - Mapas da distribuição espacial dos atributos pH, P e K da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.....	96
FIGURA 24 - Mapas da distribuição espacial dos atributos Ca, Mg e SB da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.....	97
FIGURA 25 - Mapas da distribuição espacial dos atributos CTC, V e MO da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.....	98
FIGURA 26 - Mapas da distribuição espacial dos atributos N, C/N e B da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem	99
FIGURA 27 - Mapas da distribuição espacial dos atributos Cu, Fe e Mn da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem	100
FIGURA 28 - Mapas da distribuição espacial dos atributos S e Zn da camada de 0-20 cm e Ds da camada de 5-10 cm, do solo sob mata e do solo sob pastagem	101
FIGURA 29 - Mapas da distribuição espacial dos atributos RSP, Ks e Ma da camada de 5-10 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem	102
FIGURA 30 - Mapas da distribuição espacial dos atributos Mi, PT e GF da camada de 5-10 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem	103
FIGURA 31 - Mapas da distribuição espacial das perdas dos atributos pH, P, K, Ca, Mg e SB do solo sob pastagem.....	111
FIGURA 32 - Mapas da distribuição espacial das perdas dos atributos CTC, V, MO, N, C/N e B do solo sob pastagem	112
FIGURA 33 - Mapas da distribuição espacial das perdas dos atributos Cu, Fe, Mn, S, Zn e Ds do solo sob pastagem.....	113
FIGURA 34 - Mapas da distribuição espacial das perdas dos atributos RSP, Ks, Ma, Mi, PT e GF do solo sob pastagem	114
FIGURA 35 - Mapas da distribuição espacial dos níveis físicos (NFD), químicos (NQD) e gerais (NGD) de degradação do solo sob pastagem	120

LISTA DE QUADROS

	página
QUADRO 1 - Atributos do solo utilizados como indicadores de qualidade, segundo LARSON e PIERCE (1991)	15
QUADRO 2 - Descrição geral do perfil do Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com mata (floresta tropical subcaducifólia).....	38
QUADRO 3 - Descrição morfológica do perfil do Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com mata (floresta tropical subcaducifólia).....	39
QUADRO 4 - Resultados analíticos das amostras dos horizontes do perfil do Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com mata (floresta tropical subcaducifólia).....	40
QUADRO 5 - Descrição geral do perfil do Latossolo Vermelho Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com pastagem (<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú).....	41
QUADRO 6 - Descrição morfológica do perfil do Latossolo Vermelho Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com pastagem (<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú).....	42
QUADRO 7 - Resultados analíticos das amostras dos horizontes do perfil do Latossolo Vermelho Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com pastagem (<i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú).....	43
QUADRO 8 - Equações utilizadas nas operações algébricas para obtenção dos mapas de perdas individuais dos atributos químicos (camada de 0-20cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob pastagem.....	55
QUADRO 9 - Equações utilizadas nas operações algébricas para obtenção dos mapas com os níveis físicos (NFD), químicos (NQD) e gerais (NGD) de degradação do solo sob pastagem.....	57
QUADRO 10 - Equações utilizadas para obtenção dos índices físico (IFD), químico (IQD) e geral (IGD) de degradação do solo sob pastagem.....	58
QUADRO 11 - Estatística descritiva dos resultados analíticos das amostras coletadas dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm), na área com solo sob mata.....	60
QUADRO 12 - Estatística descritiva dos resultados analíticos das amostras coletadas dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm), na área com solo sob pastagem.....	61
QUADRO 13 - Médias dos valores dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob mata e do solo sob pastagem ..	71
QUADRO 14 - Parâmetros da regressão entre os eixos x e y com os atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob mata e do solo sob pastagem	83

QUADRO 15 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do do solo sob mata.....	92
QUADRO 16 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do do solo sob pastagem	93
QUADRO 17 - Estatística descritiva dos mapas da distribuição espacial dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob mata.....	106
QUADRO 18 - Estatística descritiva dos mapas da distribuição espacial dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob pastagem.....	107
QUADRO 19 - Quantificação de áreas com valores de perdas positivos, negativos e nulos dos mapas da distribuição espacial das perdas dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob pastagem.....	110
QUADRO 20 - Estatística descritiva dos mapas da distribuição espacial das perdas individuais dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob pastagem.....	118
QUADRO 21 - Estatística descritiva dos mapas com os níveis físicos (NFD), químicos (NQD) e gerais (NGD) de degradação do solo sob pastagem	122
QUADRO 22 - Quantificação de áreas dos mapas da distribuição espacial dos níveis físicos (NFD), químicos (NQD) e gerais (NGD) de degradação do solo sob pastagem.....	123

RESUMO

Nas últimas décadas, a degradação dos solos tem sido detectada de forma intensiva em áreas com pastagens, devido à grande extensão que ocupam e em razão de diversos processos que levaram à alteração das características do solo, sendo os principais: compactação, erosão, redução do teor de matéria orgânica, depleção de nutrientes e super-pastoreio. A degradação, geralmente, é avaliada de forma qualitativa, o que tem dificultado, algumas vezes, a adoção de novas práticas de manejo e de recuperação dos solos sob pastagens. Considerando-se a necessidade de diagnóstico detalhado, são necessários estudos que busquem novas técnicas e procedimentos para seu emprego no sistema solo-pastagem, como a realização de diagnósticos e avaliações utilizando a geoestatística e os recursos de geoprocessamento. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivos diagnosticar, analisar e avaliar a extensão e o grau da degradação de um solo argiloso sob pastagem no Estado de Mato Grosso, a partir do uso conjunto de técnicas da geoestatística e de recursos de geoprocessamento, e testar a hipótese de que estes propiciem a análise espacial e quantitativa da degradação. Para isto, foram selecionadas duas áreas adjacentes, uma com vegetação natural (floresta tropical subcaducifólia) e uma com uso de pastagem (*Brachiaria brizantha* cv. Marandú), onde foram realizados o levantamento e a caracterização de atributos químicos e físicos do solo. Em cada área, foi estabelecida uma malha que constou de 121 pontos amostrais. Os resultados foram analisados pela estatística não-espacial (clássica), utilizando o teste t-Student, por técnicas da geoestatística (semivariogramas e krigagem) e pelos recursos de geoprocessamento (operações algébricas). Os resultados mostraram que: a) a análise utilizando técnicas da geoestatística e os recursos de geoprocessamento, propiciaram a análise espacial e quantitativa da degradação do solo sob pastagem, possibilitando a melhoria do diagnóstico; b) os atributos químicos P, V, C/N, B, Mn e os atributos físicos Ds, Ks, RSP, Ma e PT, foram os que melhor representaram as condições químicas e físicas na análise espacial e quantitativa da degradação do solo sob pastagem; c) o procedimento elaborado, utilizando técnicas da geoestatística e dos recursos de geoprocessamento, possibilitou a obtenção de índices quantitativos que representaram e consideraram a variabilidade e a distribuição espacial da degradação química e física do solo sob pastagem; e d) as análises espacial e quantitativa revelaram que a degradação química do solo sob pastagem foi baixa e a degradação física foi alta.

ABSTRACT

In the last decades it has been detected an intense degradation of soils from pasture areas. This effect is due to the great extension of this system and also to several process resulting from this practice that changes soil characteristics. Main impacts are: soil compaction, soil erosion, reduction of organic matter, nutrients depletion and super pasturing. Generally, the soil degradation is evaluated on a qualitative basis which can imply in some difficulties in the adoption of new forms of soil pasture management and recovery practices. Nevertheless, it is necessary more study using new techniques and procedures allowing more detailed evaluation and diagnosis of soil degradation such as the geostatistic and geoprocessing resources. Hence, this study aimed to diagnose, analyze and evaluate the extension and degree of soil degradation under pasture using techniques of geostatistic and geoprocessing resources. Also, the present study tested the hypothesis in which geostatistic and geoprocessing resources can provide an accurate analysis of the space and amount of degradation. In order to accomplish the study a survey and characterization of the chemical and physical components of the soil were carried out in two adjacent areas, one covered with natural vegetation (subcaducifolia tropical forest) and the other covered with grass (*Brachiaria brizantha* cv. Marandú). In each area a 121-sample points mesh was established. Results were analyzed by: non-spatial statistic (classic) using the t-Student test; techniques of the geostatistic (semivariogram and kriging); and geoprocessing resources (algebraic operations). Results showed that: a) the use of geostatistic techniques and geoprocessing resources provided an improved diagnosis of the space and quantitative analysis of the soil degradation under pasture; b) chemical attributes: P, V, C/N, B, Mn and physical attributes: Ds, Ks, RSP, Ma, PT, represented more accurately the chemical and physical conditions in the space and quantitative analysis of the soil degradation under pasture; c) the use of geostatistic techniques and geoprocessing resources allowed the achievement of quantitative index that represented and considered the variability and spatial distribution of the chemical and physical degradation of the soil under pasture; and d) space and quantitative analyzes disclosed that the chemical degradation of the soil under pasture was low and the physical degradation was high.

1. INTRODUÇÃO

A população mundial vem crescendo continuamente. Em 1900, a população estimada era de 1,6 bilhões de habitantes. Atualmente, se encontra próximo à cifra de 6 bilhões e, até 2050, é estimado que chegue próximo a 10 bilhões. Esse aumento populacional faz com que seja cada vez maior a demanda de alimentos e outros recursos provenientes do solo. A solução tem sido a incorporação de novas áreas ao processo produtivo, visando o aumento da produção.

Estimativas apontam grande quantidade de terras com potencial de utilização para suprir a demanda de alimentos gerada pelo aumento da população. Porém, apesar da quantidade de terras disponíveis, solos considerados inaptos passaram a ser explorados, causando problemas relacionados à degradação ambiental. Assim, segundo COSTA e MATOS (1997), ao mesmo tempo em que foi crescente a necessidade do aumento da produção mundial, promovendo a utilização de novos solos ou intensificação de uso dos já cultivados, as atividades humanas propiciaram sua degradação.

Nas últimas décadas, a degradação dos solos tem sido detectada de forma intensiva em áreas agrícolas, em razão de diversos processos que levaram ao depauperamento das suas características físicas, químicas e biológicas, sendo apontados como responsáveis o manejo excessivo em áreas agrícolas, as práticas agrícolas inadequadas e o super-pastejo. Estes processos são responsáveis por diversos fenômenos, que têm contribuído para a diminuição do potencial produtivo do solo, afetando a sustentabilidade do sistema.

Dentre os processos responsáveis pela degradação em nível mundial, o super-pastejo lidera a lista, sendo responsável por 34,5% da área mundial degradada (OLDEMAN, 1994). Na América do Sul, o super-pastejo é responsável por 27,9% do total das áreas degradadas (DIAS e GRIFFITH, 1998). Somente no Brasil Central, segundo MACEDO et al. (2000), é estimado que 80% da área ocupada pela pecuária esteja com pastagem com algum nível de degradação.

A utilização de áreas com pastagens tem assumido destaque pela elevada proporção que tem ocupado em relação ao total das áreas agrícolas, e devido as estimativas apontarem que a maioria das áreas degradadas encontram-se sob pastagens.

Considerando-se a necessidade do entendimento do processo de degradação dos solos e de um diagnóstico adequado, são necessários estudos que tenham como objetivo a busca do

detalhamento e da avaliação do seu estado. O objetivo final seria possibilitar, de forma eficiente, que práticas de manejo adequadas fossem sugeridas e recomendadas, visando minimizar os processos de degradação.

Para isso, é necessária a utilização de procedimentos que propiciem a sistematização e quantificação da degradação dos solos, cuja finalidade seria melhor avaliação dos seus estados. Neste sentido, diagnósticos e avaliações adequados poderiam ser realizados utilizando novas metodologias e novas técnicas, como a geoestatística e os recursos de geoprocessamento.

Neste contexto, o presente trabalho assumiu a hipótese de que a degradação do solo sob pastagem poderá ser analisada e avaliada espacial e quantitativamente, utilizando técnicas da geoestatística e dos recursos de geoprocessamento, de forma que o maior número de informações possa ser sistematizado e analisado, possibilitando, assim, o detalhamento do estado de degradação e a melhoria do diagnóstico.

O estudo teve como objetivo geral, diagnosticar a degradação de um solo argiloso sob pastagem cultivada no Estado de Mato Grosso, por meio da análise e avaliação espacial e quantitativa, utilizando técnicas da geoestatística e de recursos de geoprocessamento, considerando-se a variabilidade e a distribuição espacial dos atributos do solo.

Foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar atributos que possibilitem a análise espacial e quantitativa da degradação do solo;
- b) Elaborar procedimento para obtenção de índices quantitativos que representem e considerem a distribuição espacial da degradação do solo; e
- c) Gerar conhecimentos que contribuam na recomendação de práticas de manejo e recuperação de solo sob pastagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Solo como parte do ambiente

Numa definição mais simplista, o termo “solo” é definido como sendo a superfície inconsolidada que recobre as rochas e mantém a vida animal, constituído de camadas que diferem entre si pela natureza física, química, mineralógica e biológica, que se desenvolvem pela ação conjugada dos agentes intempéricos sobre os materiais preexistentes de natureza mineral e orgânica (FONTES e FONTES, 1992).

Em uma visão mais ampla, o termo “solo” é definido como sendo a matéria mineral não-consolidada na superfície da terra, que foi sujeita e influenciada por fatores genéticos e ambientais do material de origem, clima (incluindo efeitos de umidade e temperatura), macro e microorganismos e topografia, todos atuando durante um período e produzindo um produto-solo, o qual difere do material do qual ele é derivado em muitas propriedades e características físicas, químicas, mineralógicas, biológicas e morfológicas (CURI et al., 1993).

Neste contexto, entende-se solo como um fator ecológico resultante da atuação de fatores de formação e agentes ambientais, possuindo relações íntimas com os organismos, clima e aspectos soioeconômicos, sendo, então, utilizado para o estudo das alterações dos ecossistemas. Isto decorre do fato de que os solos são resultantes das inter-relações dos fatores de formação e agentes ambientais, comportando-se como um componente do ecossistema, um estratificador de ambientes, que possui a capacidade de servir como indicativo de alterações dos ambientes (RESENDE et al., 1995).

Reforça-se este ponto de vista pelo enfoque apresentado por OLIVEIRA (1972), que comenta que os solos não ocorrem por acaso, mas usualmente formam um modelo de paisagem, tão fortemente estabelecido que, no processo de formação, se desenvolvem como resultado do inter-relacionamento de cinco fatores de formação: material de origem, clima, relevo, organismos e tempo. Assim, conforme ALVARENGA e SOUZA (1995), o solo pode ser entendido como um corpo, que apesar de não estar vivo, possui vida, sendo a expressão de vários componentes do ambiente, e, na medida em que varia a combinação do grau de alteração dos componentes ambientais, haverá uma variação na expressão final desses componentes. Desta forma, o solo é um componente ambiental da

maior importância, e o entendimento de como ele interage com o ecossistema é, sem dúvida, uma ferramenta que pode trazer soluções a muitos problemas do ambiente, pois permite seu entendimento global. Esses autores ainda comentam que a contribuição mais importante do solo, em um meio, é o de evidenciar o papel do homem na evolução das coberturas pedológicas, por meio da comparação de áreas não-cultivadas e desmatadas, assim como a evolução dos solos, em função das técnicas de desmatamento e das técnicas de cultivo, revela que as rupturas de equilíbrio provocadas por essas mudanças ocasionam, muito rapidamente, grandes modificações. É importante ressaltar que modificações evidentes, como a erosão, entre outras, é o resultado de modificações estruturais mais profundas, cujos fatores são múltiplos: compactação do solo, alteração da atividade biológica e ressecamento, sendo que tudo isto afeta a porosidade, o regime hídrico, térmico e biológico, a circulação de água e o arraste de materiais.

O solo é um componente crítico na biosfera terrestre, funcionando não somente no sistema de produção agrícola, mas também na manutenção da qualidade ambiental, com efeito local, regional e global. É um corpo natural organizado, vivo e dinâmico, que desempenha inúmeras funções no ecossistema terrestre. Compostos minerais e orgânicos, água, ar e organismos (minhocas, bactérias, fungos e nematóides) estão em contínuo intercâmbio (REINERT, 1998).

DORAN e PARKIN (1996) comentam que o solo é um importante componente da biosfera, que tem como função produzir alimentos e fibras, como também manter o ambiente no qual se insere, atuando como um filtro para a água e o ar e como tampão para os nutrientes. Segundo esses autores, a qualidade do solo é que determina a sustentabilidade agrícola e a qualidade ambiental.

IZABOLCS (1994) comenta que a função do solo na natureza é complexa, sendo que as mais importantes são:

- regular muitos processos bióticos, incluindo o suprimento de nutrientes e água para as plantas;
- agir como interface entre biosfera e geosfera, sustentando, regulando e controlando as movimentações e os fluxos de substâncias dessas;

- atuar como um sistema poroso, contribuindo com a movimentação da água e de vários gases;
- regular a água no ciclo hidrológico, por meio da infiltração e do escoamento superficial, alterando a composição química da precipitação; e
- agir como um manto protetor da litosfera, evitando que os efeitos destrutivos da intempéries atuem diretamente sobre essa.

Segundo LARSON e PIERCE (1991), o crescimento da necessidade de produção de alimentos e a visão de que o solo é um meio de produção, têm deixado de considerar outro enfoque a respeito do solo, ou seja, a funcionalidade deste no ambiente. O entendimento desta funcionalidade é de grande importância, uma vez que considera o solo como um componente do ambiente ao qual ele faz parte.

2.2. Degradação dos solos

Estima-se que, do total das terras mundiais, cujo montante excede 13 bilhões de ha, menos da metade pode ser utilizada para a agricultura, incluindo pastagens. O potencial de terras cultiváveis no mundo é estimado em 3,031 milhões de ha, ou seja, 22% da área total. Destas, cerca de 40%, que representam 1,461 milhões de ha, são cultivadas (LAL, 1990). Mesmo com essa grande quantidade de solos disponíveis, diversos estudos apontam sérios problemas relacionados à sua degradação (LAL e STEWART, 1990; LAL, 1993; LAL, 1997; LAL, 2000).

Para atender as necessidades crescentes da população, tornou-se necessário incorporar novas áreas para a produção de alimentos e aumentar o uso de insumos com vistas ao aumento de produção. Este aumento foi gerado pelo fato de a população mundial ter aumentado desde 1900, quando contava com 1,6 bilhões de habitantes, indo, hoje, para uma cifra próxima a 6 bilhões. Solos considerados inaptos para a prática agrícola passaram a ser explorados, mesmo acarretando grandes prejuízos ao ambiente. A exploração intensiva, submetendo o solo à maior mobilização e à crescente incorporação de fertilizantes, corretivos e defensivos, conduziram à degradação física e à poluição química do sistema solo-água-plantas (COSTA e MATOS, 1997). Assim, ao mesmo tempo em que foi crescente a necessidade do

aumento da produção mundial, promovendo a utilização de novas áreas ou a intensificação de uso das já cultivadas, as atividades humanas propiciaram a degradação dos solos.

LAL (2000) estimou que a população mundial, em 1998, era de 1,6 bilhões de habitantes e considerando-se um crescimento médio de 1,8% ao ano, é esperado que a população chegue à cifra de oito bilhões em 2025 e a 9,4 bilhões em 2050. Segundo o autor, esse aumento da população gera a demanda de alimentos e outros recursos provenientes do solo em um intervalo de tempo relativamente curto e, assim, são necessários cuidados com o solo e com a água, no sentido de manter seus potenciais.

LAL (1994) estimou que em 1990, a quantidade de solo arado por habitante era de 0,3 ha, decrescendo para 0,25 ha em 2000, podendo chegar a 0,15 ha em 2050, e a 0,10 ha em 2150. Segundo esse autor, atualmente é necessário, pelo menos, uma relação de 0,10 ha/habitante para suprir suas necessidades, e somente com inovações tecnológicas pautadas em base científica pode-se alterar essa relação. Assim, o interesse no uso sustentável dos ecossistemas é importante, no sentido de prevenir a degradação do solo e manter sua capacidade produtiva.

DORAN e PARKIN (1996) apontam que estudos e levantamentos dos solos nas últimas décadas, indicam que a capacidade produtiva dos mesmos decaiu, mostrando severa degradação, como resultado da erosão, poluição atmosférica, manejo excessivo, super-pastoreio, desmatamento, salinização e desertificação. SEYBOLD et al. (1999) reforçam isto, em razão de apontarem, como responsáveis pela degradação, as seguintes causas: desmatamento, super-pastoreio, práticas agrícolas inadequadas, cultivo intensivo e atividades industriais e bioindustriais.

A degradação do solo é a diminuição da sua produtividade e reflete o resultado de fatores naturais ou antrópicos, sendo estes últimos os principais responsáveis. Desta forma, a degradação do solo refere-se ao declínio da sua qualidade, e é decorrência do seu mau uso e manejo inadequado, sendo uma das maiores ameaças para a sustentabilidade agrícola e qualidade ambiental. O problema é particularmente severo nos trópicos e sub-trópicos, como resultado da alta densidade demográfica, do uso ineficiente da terra, do ambiente com clima mais intenso e da falta de recursos pelos produtores, os quais não têm acesso aos conhecimentos gerados pela ciência do solo (LAL, 1993).

Segundo LOES (1998), o binômio desenvolvimento e meio ambiente é, em princípio, conflitante, pois, enquanto um preconiza o crescimento e o bem estar econômico, o outro tem por objetivo a preservação e a conservação da natureza. Entretanto, o desenvolvimento e a proteção ao meio ambiente não são excludentes, ao contrário, a conciliação desses aspectos recomenda ações e comportamentos que estejam calcados no equilíbrio entre homem e natureza, por meio do desenvolvimento pautado em normas e projetos racionais e menos impactantes, mediante o que se chama, atualmente, de ecodesenvolvimento ou desenvolvimento sustentável, cujo objetivo é estabelecer uma visão global e princípios comuns que sirvam de inspiração e orientação à humanidade para a preservação e melhoria do ambiente.

A degradação de ecossistemas pode ser analisada sob o ponto de vista da degradação agrícola e da degradação ambiental. A degradação agrícola está relacionada com a perda da produtividade econômica em termos agrícola, pecuária ou florestal. A degradação ambiental refere-se aos danos ou às perdas de populações de espécies nativas animais e, ou, vegetais, entre outros, que pode ser considerada também como degradação da biodiversidade (BRIENZA et al., 1998). A degradação dos solos se enquadra tanto na degradação agrícola como na degradação ambiental.

De acordo com LAL e STEWART (1990), os processos de degradação do solo são os mecanismos responsáveis pelo declínio da sua qualidade, decorrentes do mau uso, existindo três tipos principais: degradação física, química e biológica. Para REINERT (1998), a perda de condições desejáveis do solo, relacionadas ao crescimento de plantas e ambiente, tem sido considerada como degradação, referindo-se ao declínio da qualidade do solo, sendo esta uma definição vaga, relacionada à perda de produtividade do solo por trocas adversas em nutrientes, matéria orgânica, atributos ligados à estrutura e concentração de elementos tóxicos. Há três principais tipos de degradação do solo: física, química e biológica. A degradação física refere-se à perdas de condições ligadas à forma (densidade, porosidade, infiltração, aeração, etc.) e estabilidade da estrutura do solo (resistência dos agregados), sendo exemplos a alta resistência à penetração de raízes, limitações de aeração e alta suscetibilidade à erosão. A degradação química é decorrente da retirada de nutrientes do solo sem reposição ou do acúmulo de elementos tóxicos ou desbalanceados, que são prejudiciais ao crescimento de plantas. A degradação biológica

está associada à redução de matéria orgânica e da atividade e diversidade de organismos de solos.

OLDEMAN (1994) relata que, de acordo com a visão do Projeto de Avaliação Mundial de Degradação do Solo (Global Assessment of Soil Degradation – GLASOD), pertencente ao Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas, e que foi implementado e executado pelo Centro Internacional de Informação e Referência de Solos (ISRIC), na Holanda, foram considerados os seguintes os fatores de degradação de solo:

- desmatamento ou remoção da vegetação natural para fins de agricultura, florestas comerciais, construção de estradas e urbanização;
- superpastejo da vegetação;
- atividades agrícolas, incluindo ampla variedade de práticas agrícolas, como uso insuficiente ou excessivo de fertilizantes, uso de água de irrigação de baixa qualidade, uso inapropriado de máquinas agrícolas e ausência de práticas conservacionistas de solo;
- exploração intensa da vegetação para fins domésticos, como combustível e cercas, expondo o solo à ação dos agentes de erosão; e
- atividades industriais ou bioindustriais que causam a poluição do solo.

Estimativas realizadas por OLDEMAN (1994), apontam que somente 10% das terras aráveis do mundo estão disponíveis para a atividade humana, sendo que 40% das terras cultiváveis estão afetadas pela degradação do solo induzida pela atividade humana, e que, mais de 6% estão degradadas a tal ponto que somente com grandes aplicações de investimentos é possível restaurar a produtividade original. Ele estima que cerca de 15% dos solos mundiais ($1,966 \times 10^6$ ha) encontram-se, de uma maneira ou de outra, degradados. Do total dessa área, 5% encontram-se na América do Norte, 12% na Oceania, 14% na América do Sul, 17% na África, 18% na Ásia, 21% na América Central e 23% na Europa. Considerando-se ainda, as áreas inabitadas do mundo, essa estatística torna-se mais agravante, uma vez que cerca de 24% dessas encontram-se degradadas em decorrência das atividades humanas. Em relação aos fatores de degradação, o super-pastejo é responsável por 34,5% das áreas mundiais degradadas, seguidos do desmatamento (29,4%), das atividades agrícolas (28,1%), da exploração intensa de vegetação para fins domésticos (6,8%) e das atividades industriais ou bioindustriais (1,2%).

Na América do Sul, segundo DIAS e GRIFFITH (1998), com base no projeto de avaliação mundial de degradação do solo, existem cerca de 244×10^6 ha de solos degradados, sendo o desmatamento responsável por 41%, o super-pastejo por 27,9%, as atividades agrícolas por 26,2%, e a exploração intensa da vegetação por 4,9%. No Brasil, segundo os mesmos autores, a quantificação da extensão de solos degradados é ainda muito precária. Estimativas de VEIGA et al. (1990) mostram que cerca de $17,5 \times 10^6$ ha de florestas na Amazônia tenham sido transformadas em pastagens e que, pelo menos a metade dessas áreas, encontram-se degradadas ou num avançado estado de degradação. Já MACEDO et al. (2000) estimam que 80% dos 50 a 60 milhões de hectares de pastagens cultivadas no Brasil Central encontram-se em algum estágio de degradação.

Independente da ausência de avaliações exatas a respeito da extensão de áreas degradadas no Brasil, todas as estimativas apontam para o desmatamento e para as atividades agrícolas como os principais fatores de degradação dos solos brasileiros. Na pecuária, com o super-pastejo ocorre a exposição do solo aos agentes da erosão, configurando o processo de degradação. Em termos de atividades agrícolas, o manejo inadequado dos solos agrícolas tem proporcionado aumento significativo de terras degradadas. O desconhecimento de práticas de conservação, a falta de recursos para aquisição de insumos, a ausência de planejamento a médio e longo prazo e a maior pressão pelo uso intensivo do solo, aliados à maior demanda de alimentos, podem ser considerados fatores decisivos para o estabelecimento do cenário. No entanto, é necessário lembrar que a degradação não deve apenas ser avaliada pela sua extensão, mas também pela sua intensidade (DIAS e GRIFFITH, 1998).

LAL (2000) aponta que para a recuperação do solo, é necessário o entendimento das suas características e dos fatores internos e externos que as influenciam. Desta forma, LAL (1997) relata que, para o entendimento da degradação do solo e sua recuperação, são importantes os seguintes aspectos:

- redefinição de conceitos básicos;
- desenvolvimento de métodos que quantifiquem a degradação do solo;
- estabelecimento de limites críticos e valores limites de degradação;
- desenvolvimento de práticas e métodos de recuperação do solo;
- avaliação do impacto econômico da degradação do solo em nível regional e global;

- estabelecimento das relações entre os processos sociais e a degradação e recuperação do solo; e
- desenvolvimento das relações entre causa-efeito dos processos de degradação.

2.2.1. Qualidade do solo como indicador da sua degradação

O conhecimento inicial do solo e sua propensão à degradação, é o primeiro passo ao estudo do seu diagnóstico, pois os solos são o resultado da atuação dos fatores e dos processos de formação, que fazem com que cada um apresente características intrínsecas à sua formação. Assim, ao se utilizar suas propriedades para diagnóstico de degradação, isto deve ser levado em consideração (ALVARENGA e SOUZA, 1995).

Um aspecto extremamente importante a ser considerado, segundo DIAS e GRIFITH (1998), em relação às atividades degradadoras, refere-se à dificuldade de diagnosticar o processo de degradação. A necessidade de aprimoramento dos indicadores de processos de degradação de solos e a maior sensibilidade e conscientização do agricultor para as práticas de manejo e conservação de solo, fazem-se necessários para que haja a alteração desse cenário. Esses autores comentam, ainda, que a avaliação da extensão de áreas degradadas passa a ser um processo complexo, na medida em que se faz necessário estabelecer claramente o conceito de solo degradado, pois para atividades que causam grandes distúrbios é fácil a caracterização, porém, para atividades em que a degradação ocorre de maneira lenta e gradual, como a observada em atividades agrícolas, passa a ser difícil sua caracterização. Este problema, em ciência do solo, tem sido abordado de forma a ser solucionado pela associação com a definição de qualidade do solo, ou seja, à medida que as características de um solo forem alteradas para valores indesejáveis, estabelece-se um processo de degradação. Surge aí a necessidade de associar e estabelecer a degradação a um determinado *status* de qualidade, sendo, então, necessário definir quais características definem qualidade de um solo. Daí surgem diversas definições de solos degradados, deixando a evidência de que o conceito de degradação ou de qualidade do solo pode ser relativo, dependendo da finalidade do uso atribuído a esse.

O conceito de qualidade do solo, como indicador de degradação, deve ser utilizado a partir do sentido de uma visão mais ampla. Conceitualmente, o uso da qualidade do solo como indicador de degradação é claro e vem sendo aplicado também para avaliar a sustentabilidade

de manejo do solo. O ponto limitante do processo é a sua operacionalização, ou seja, quais atributos ou características do solo devem ser avaliados e monitorados para definir a manutenção, o ganho ou a perda de qualidade? Em outras palavras, a determinação de indicadores e de seus padrões ou índices de qualidade é um fator limitante no processo (DIAS e GRIFFITH, 1998). Segundo esses autores, o uso adequado de um indicador depende de uma visão holística, procurando integrá-los de maneira harmônica ao ecossistema em estudo. O valor de referência passa a ser o ponto principal do processo de avaliação da degradação. Sempre que possível, não se deve fazer uso de padrões fixos para a comparação, e sim fazê-lo utilizando-se áreas próximas em que não tenha havido a intervenção antrópica. Isto se torna cada vez mais difícil, à medida que a intensificação do uso do solo é cada vez maior.

As propriedades químicas, físicas e biológicas do solo interagem de forma complexa, determinando o potencial e a capacidade para nutrir as plantas. Esta interação das propriedades resulta em certos níveis de produtividade, freqüentemente referida como qualidade do solo. Este termo denota os atributos do solo e suas interações que estejam interferindo em características específicas (compactação, erodibilidade e fertilidade, entre outras), referindo-se também à sua integridade estrutural, a qual oferece resistência à erosão, menor perda de nutrientes e matéria orgânica (PARR et al., 1992).

REINERT (1998) comenta que as condições ambientais do solo definem sua qualidade, tendo efeito na produtividade e sanidade de um ecossistema e o ambiente relacionado a ele. A qualidade do solo tem sido definida por diversos autores como sendo a sua capacidade de funcionamento dentro de um ecossistema, sustentando a produtividade e promovendo a qualidade animal e vegetal. Assim, a medição de atributos, relacionados à sua funcionalidade, oferece uma maneira indireta de avaliar a qualidade dos solos, servindo como indicadores de qualidade, e são altamente úteis para o monitoramento das mudanças no ambiente pedológico. A medição desses indicadores promove uma poderosa ferramenta na avaliação da qualidade do solo. Desta forma, a degradação pode ser avaliada e quantificada no tempo e comparada às condições originais de cada solo, na sua paisagem ou condição genética.

DORAN e PARKIN (1996) comentam que definir e quantificar a qualidade do solo é complexo, pelo fato de que, neste caso, não se tem um consumo direto pelos seres humanos e

animais, como é o caso da água e do ar. Assim, qualidade do solo passa a ser definida de forma indireta, por meio da avaliação de seus componentes e de sua produtividade. Entretanto, deve ser aceito que qualquer que seja a definição, qualidade do solo deve abordar o solo como uma função que faça interagir o uso da terra, seu manejo e sua manutenção, de tal forma que garanta seu estado aceitável para gerações futuras.

Segundo LARSON e PIERCE (1991), o diagnóstico do solo poderia ser obtido a partir das características indicadoras do seu estado atual, capazes de detectar e medir com eficiência as mudanças ocorridas, em razão de que a sua qualidade poderia ser definida a partir de um conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas, que promovessem o crescimento das plantas, regulassem os processos hídricos e tivessem função ambiental. Porém, essas características poderiam ter como causa, a própria variabilidade espacial do solo. Assim, os autores sugeriram que, para os estudos das mudanças na qualidade do solo, fosse realizada uma seleção rigorosa dos atributos que serviriam como indicadores. Ressaltaram ainda, que existem muitos atributos que são inter-relacionáveis e que poderiam ser estimados a partir de outros mais facilmente mensuráveis. Neste caso, poder-se-ia optar por uma função, que chamaram de função de pedotransferência. Esta se faz necessária, em razão de que muitos atributos dos solos são de difícil mensuração.

DORAN e PARKIN (1996) comentam que a efetiva identificação de indicadores apropriados para medir a qualidade do solo dependeria da habilidade de se considerar a multiplicidade de suas funções, em particular, a produtividade e o meio ambiente, integrando seus atributos físicos, químicos e biológicos. Neste sentido, a identificação de indicadores passaria a ser um processo complicado, em razão da multiplicidade de fatores (físicos, químicos e biológicos) que controlariam a variação e a intensidade dos processos biogeoquímicos, os quais seriam distribuídos no tempo e no espaço. Desta forma, um indicador deveria:

- apresentar boa relação com os processos de degradação nos ecossistemas;
- integrar os processos físicos, químicos e biológicos, além de servir como base de estimativa das propriedades do solo ou de funções que forem mais difíceis de ser medidas diretamente;

- ser, relativamente, de fácil uso em condições de campo, podendo ser utilizado tanto por especialistas como produtores;
- ser sensível às variações de manejo e de clima; e
- ser componente dos dados básicos do solo, quando possível.

Entretanto, esses autores apontam que, em razão da dificuldade de se definir qualidade do solo, deveriam ser escolhidos indicadores que tivessem maior importância, ou seja, aqueles que agissem no sentido de diagnosticar a sua qualidade de forma eficiente e rápida, identificando o problema e possibilitando, assim, que soluções pudessem ser tomadas. Reforçando este enfoque, ARSHAD e COEN (1992) apontaram que deveriam ser escolhidos os atributos do solo que fossem mais sensíveis ao manejo, como exemplo, a matéria orgânica e a condutividade elétrica, as quais têm sido freqüentemente afetadas pelos processos de degradação.

DORAN e PARKIN (1994) propõem um índice de qualidade ambiental, que contemple os seguintes componentes: produção de alimentos e fibras, erosividade, qualidade da água subterrânea, qualidade da água superficial, qualidade do ar e qualidade dos alimentos. Eles apontam que a vantagem de se trabalhar com índices é a de permitir que o resultado possa ser expresso com base em critérios específicos do desempenho individual de cada componente, estabelecido para dado ecossistema. PARR et al. (1992) propõem um índice que relacione: propriedades do solo, potencial produtivo, fatores ambientais, saúde humana e animal, erodibilidade, diversidade biológica, qualidade dos alimentos e manejo. Apontam que é necessário determinar a interação entre estes indicadores e o peso relativo de cada um, para estabelecimento do índice de qualidade ambiental. Desta forma, analogamente, alguns autores sugerem índices de desempenho do solo para avaliar sua qualidade. É proposto que este índice seja obtido por meio do estabelecimento individual de componentes que se relacionassem com a qualidade do solo.

2.2.2. Atributos dos solos utilizados no diagnóstico da sua degradação

REINERT (1998) comenta que a medição de atributos do solo, relacionados à sua funcionalidade, oferece uma maneira indireta de estimar a qualidade e são úteis para o monitoramento de mudanças no ambiente pedológico. Os mais utilizados seriam:

- descritivos: indicadores visuais e, ou, morfológicos, como crosta superficial, cor, cobertura, friabilidade, sulcos, erosão laminar, drenagem, etc.
- analíticos: físicos (textura, profundidade efetiva, densidade do solo, infiltração, água, estrutura e temperatura, entre outros), químicos (carbono e N total, pH, Al, N (NH_4 e NO_3), P, K, metais pesados e CTC) e biológicos (C e N na biomassa microbiana, N-mineralizável, respiração, população de minhocas e número de sementes de ervas ou de patógenos, dentre outros).

LARSON e PIERCE (1991) apontam que os indicadores de qualidade do solo devem ser selecionados a partir da avaliação do ambiente em que estão, considerando-se a sua funcionalidade, podendo ser utilizados indicadores quantitativos e qualitativos. Assim, qualquer atributo físico, químico ou biológico do solo que promova um meio para o crescimento das plantas, regule o regime hídrico e tenha função ambiental, pode ser utilizado como indicador. Esses atributos devem apresentar as seguintes funções:

- reter, armazenar e liberar nutrientes para as plantas, rios, córregos, etc.;
- reter, armazenar e liberar água;
- promover e sustentar o crescimento e desenvolvimento de plantas;
- promover e sustentar o habitat biótico do solo; e
- responder positivamente ao manejo e resistir à degradação.

Desta forma, esses autores relacionam essas funções com alguns atributos do solo, que são mostradas no Quadro 1.

Com base no Quadro 1, LARSON e PIERCE (1991) recomendam os seguintes atributos como indicadores de qualidade para os estudos de degradação do solo: propriedades relacionadas ao suprimento de nutrientes (macro e micronutrientes, nitrogênio, fósforo, produtividade biológica, etc.), carbono orgânico, textura, estrutura, profundidade do sistema radicular, pH, condutividade elétrica e outros atributos, com função de pedo-transferência. Porém, PARR et al. (1992) sugerem que, para a seleção dos melhores indicadores de qualidade do solo, sejam considerados as zonas climáticas, os fatores agroclimáticos e os sistemas de manejo, pois estes interferem sobremaneira nesta seleção.

QUADRO 1 - Atributos do solo utilizados como indicadores de qualidade, segundo LARSON e PIERCE (1991).

Atributos do solo	Indicadores de qualidade do solo com função de:				
	reter armazenar e liberar nutrientes	reter, armazenar e liberar água	promover e sustentar o crescimento	sustentar o habitat biótico	resistir à degradação
Hor. Superficial					
matéria orgânica					
- total	x	x	x	x	x
- lábil	x		x	x	x
supr.de nutrientes	x		x	x	x
textura	x	x	x	x	
profundidade	x	x	x		x
estrutura		x	x		x
pH	x	x	x	x	x
cond. elétrica	x		x	x	x
Hor.subsuperficial					
textura	x	x	x	x	x
profundidade	x	x	x		x
estrutura		x	x		x
pH	x		x		x
cond. elétrica	x		x	x	x

De acordo com o levantamento realizado por DIAS e GRIFFITH (1998), diversos autores recomendam como levantamento mínimo necessário para diagnosticar a degradação dos solos, os seguintes indicadores: nutrientes disponíveis, carbono orgânico total, carbono orgânico lábil, estrutura, textura, densidade do solo, resistência à penetração, profundidade máxima de sistemas radiculares, pH e condutividade elétrica. Assim, segundo esses autores, foi proposta uma lista de indicadores pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, que são:

- indicadores físicos: textura, densidade do solo, taxa de infiltração, capacidade de retenção de água, profundidade do solo e profundidade do horizonte superficial e das raízes;
- indicadores químicos: carbono orgânico total, matéria orgânica do solo, N total, pH, condutividade elétrica e N, P e K disponíveis; e
- indicadores biológicos: C e N contidos na biomassa microbiana, N potencialmente mineralizável (incubação anaeróbica) e taxa de respiração do solo.

YAKOVCHENKO et al. (1996) comentam que as características microbiológicas, como conteúdo de biomassa microbiana, atividade e diversidade microbiana, atividade

enzimática, entre outras, podem servir como eficientes indicadores de qualidade do solo, em razão de que os microorganismos são muito importantes biologicamente para o ecossistema agrícola. Isto seria decorrência de que as atividades biológicas dependem de complexas interações dos componentes físicos e químicos. Entretanto, as propriedades biológicas têm recebido menor ênfase do que as propriedades físicas e químicas na caracterização da qualidade do solo. Reforçando o comentário desses autores, TURCO et al. (1994) apontam que os microorganismos são mais sensíveis biologicamente na avaliação das alterações e contaminação dos sistemas, em razão de que os processos microbiológicos são parte integral desse processo da qualidade do solo. Desta forma, para um melhor entendimento das alterações, é importante que os processos microbiológicos sejam considerados. PANKHURST (1994) comenta que os indicadores biológicos de qualidade, dentre eles os microrganismos, poderiam ser utilizados como medidas dos processos que ocorrem no solo, o que possibilitaria uma melhoria na avaliação das suas condições. Segundo esse autor, as análises microbiológicas têm sido negligenciadas na avaliação das alterações pedológicas em razão da dificuldade das suas realizações.

PARR et al. (1992) e TURCO et al. (1994) comentam que, o fato das propriedades biológicas receberem menor ênfase na caracterização da qualidade do solo, tem ocorrido em razão da dificuldade de medição e predição dessas, somado ao aspecto de que essas propriedades são dinâmicas e requerem efetivo monitoramento. Relatam ainda que a qualidade do solo é freqüentemente baseada nas suas propriedades químicas e físicas devido à relativa facilidade de medição e aquisição de dados e informações, decorrentes dos métodos atualmente disponíveis.

2.2.3. Estudos sobre a degradação dos solos

DIAS e GRIFFITH (1998) apontam que são poucas as pesquisas no Brasil que procuram avaliar a qualidade do solo sob um enfoque de degradação. É uma área onde as pesquisas precisam evoluir, para que rotinas sejam estabelecidas e o monitoramento e diagnóstico sejam facilmente realizáveis.

LAL (1997) comenta que uma medição quantitativa da degradação poderia ser obtida pela avaliação do seu impacto na produtividade de diversos usos e sistemas de manejo,

utilizando uma sistemática de avaliações em experimentos de longa duração. Assim, pesquisas interdisciplinares seriam necessárias para quantificar os efeitos da degradação do solo sobre o decréscimo na produtividade, na redução de biomassa e no declínio da qualidade ambiental.

Apesar da evolução das metodologias de avaliação de impactos ambientais, no sentido de quantificá-los, cabe ressaltar que, muitas vezes, na falta de informações quantitativas, os mesmos são classificados muito subjetivamente, ficando a critério da experiência do técnico responsável, o que não invalida o estudo, apesar de não ser a forma ideal de avaliação (ALVARENGA e SOUZA, 1995).

Existem vários estudos realizados sobre a degradação dos solos (BOUMAN et al., 1999; CHAUVEL et al., 1999; RASMUSSEN, 1999). No entanto, estes estudos não consideram procedimentos ou metodologias que possibilitem avaliar detalhadamente o estado atual de degradação dos solos, em razão das limitações dos métodos utilizados ou dos objetivos pretendidos.

Um dos procedimentos iniciais está na necessidade de sistematização e quantificação da degradação dos solos que propiciem uma melhor avaliação dos seus estados. Estes, por sua vez, esbarram em problemas como a inexistência de mapas e inventários confiáveis ou suficientemente detalhados para permitir uma análise adequada do problema (LAL e STEWART, 1990), e compreensão dos fenômenos, em razão da multiplicidade e simultaneidade dos processos em um mesmo espaço geográfico, bem como o período de tempo necessário para sua observação. Estas dificuldades estão relacionadas à própria limitação dos métodos de análise, em relação à complexidade das características inerentes ao problema, o que tem revelado situações de análise bastante complexas (BARROW, 1994).

Neste sentido, COELHO (1999) afirma que estudos mais detalhados que busquem diagnósticos e avaliações mais adequados podem ser realizados utilizando-se técnicas tradicionais em conjunto com técnicas modernas, como o uso de dados de sensoriamento remoto, de sistemas de informações geográficas (SIG) e de técnicas da geoestatística. Isto permitiria que maior número de informações sejam coletadas e sistematizadas, resolvendo problemas de grande complexidade, e a partir daí possibilitando avaliar, analisar e diagnosticar adequadamente os problemas decorrentes da degradação.

DESBARATS (1996) reforça esta colocação, uma vez que comenta que a geoestatística permite espacializar a variabilidade de uma área, sendo representada como uma imagem digital ou mapa de variabilidade. Estas informações, segundo GOOVAERTS (1999), em uma etapa posterior, poderiam ser manejadas e tratadas pelos sistemas de informações geográficas (SIGs), possibilitando melhor entendimento da relação dependência-escala dos processos físicos.

SMITH et al. (1994) reforçam a necessidade de novas técnicas nos estudos de solos, sugerindo que métodos de análise multivariada poderiam ser utilizados para obtenção de índices de qualidade, onde seria possível agregar um número ilimitado de indicadores. Estes índices seriam denominados índices gerais de qualidade do solo, os quais representariam uma boa estimativa de sua qualidade. Comentam ainda que, técnicas da geoestatística, como a krigagem, poderiam ser utilizadas nos estudos de solos, permitindo que a definição e identificação de sua qualidade pudessem ser realizadas adequadamente.

LAL e STEWART (1990) comentam que uma completa caracterização do recurso solo é necessária nos estudos relacionados à sua degradação, sendo que os métodos tradicionais de avaliação disponíveis consomem tempo e recursos. Entretanto, os cientistas dessa área têm se esforçado em utilizar novas tecnologias, mais modernas, como por exemplo, os sistemas de informações geográficas, com o objetivo de melhorar a análise dos resultados obtidos das caracterizações. Porém, ressalta-se que um aspecto importante no desenvolvimento das novas tecnologias, seria o de permitir que os resultados locais pudessem ser extrapolados e aplicados em escala regional e global, somado ao fato de que deveriam também ser compatíveis com a aceitação dos padrões de qualidade ambiental.

2.2.4. Degradação dos solos sob pastagem

A conversão de florestas em áreas agrícolas, segundo MULLER et al. (2001) inevitavelmente altera o equilíbrio existente, modificando as propriedades do solo. Estas modificações invariavelmente vêm seguidas da degradação das propriedades físicas do solo. ANJOS et al. (1994) constataram a degradação da estrutura do solo, comprovada pelo

aumento da sua densidade, diminuição da porosidade total e diminuição da taxa de infiltração, quando compararam as propriedades físicas de quatro solos sob mata nativa e sob cultivo, em diferentes sistemas de manejo.

Em áreas utilizadas com pastagem, a degradação das propriedades físicas se pronuncia de forma intensiva. Segundo MORAES e LUSTOSA (1997), a deterioração das condições físicas do solo sob pastagem é atribuída ao pisoteio do gado, que causa sua compactação, impresso pelo aumento da sua densidade, redução do espaço poroso e aumento da resistência à penetração. HOLT et al. (1996) atribuíram a redução dos valores das propriedades hidráulicas do solo ao aumento da sua densidade, devido ao pisoteio dos animais e remoção da cobertura vegetal. WATKIN e CLEMENTS (1978) estimaram que um animal poderia pisotear até 0,01 ha/dia, admitindo que um bovino provocaria entre 8.000 a 10.000 impactos/dia, tendo cada impacto uma área aproximada de 90 cm². Porém, a área que poderia ser efetivamente pisoteada dependeria do comportamento animal em resposta ao clima e da disponibilidade da forragem, entre outros. SOUZA et al. (1998) verificaram que a influência da pressão exercida pelo pisoteio de animais na compactação do solo foi intensa, pois a pressão da pata de um animal de 400 kg foi de 190,3 kPa, indicando que esta pressão poderia ser até duas vezes superior a exercida pelas rodas de um trator, que é de 92,1 kPa.

MULLER et al. (2001) comentam que a degradação física do solo sob pastagem propiciou a compactação do mesmo, promovendo o aumento da microporosidade, em razão da transformação dos poros grandes em poros menores, fazendo com que a água retida aumentasse; em compensação, a macroporosidade e a porosidade total diminuíram. CORREA e REICHARDT (1995) ressaltam que a degradação do solo sob pastagem faz com que a porosidade total da camada superficial seja reduzida, tornando-se similar às camadas subsuperficiais, que naturalmente é menor, resultando em menor capacidade de infiltração de água e maior suscetibilidade à erosão. HUMPHREYS (1994) atribui a diminuição da taxa de infiltração da água à redução do espaço poroso total e da macroporosidade do solo, devido à compactação causada pelo pisoteio do gado, o que gerou, como consequência, o aumento das perdas de água por escoamento superficial.

MORAES (1991) comenta que, além da intensidade de pastejo, o tempo do mesmo representa um fator importante na compactação do solo e conseqüente redução da produção da pastagem. CORREA e REICHARDT (1995) avaliaram uma pastagem de *Brachiaria humidicula* em pastejo de 4, 6 e 10 anos e concluíram que houve aumento da densidade do solo e da sua resistência à penetração com o passar dos anos, na camada de 0-10 cm. MORAES e LUSTOSA (1997) comentam que o efeito na compactação é diferente segundo a espécie e a categoria animal utilizada em pastejo, acrescentando-se a isto que ele depende também do tipo de solo e forrageira. Porém, ao longo do tempo, independente do tipo de solo, animal e forragem, espera-se que a compactação seja maior.

Uma das condições que tendem a maximizar a compactação em áreas com pastagem seria o alto teor de umidade no solo. PINZÓN e AMÉSQUITA (1991) e CORREA e REICHARDT (1995), ressaltam que o alto teor de argila promove maior compactação do solo quando sob pastejo e que uma das condições que tende a maximizar esse processo seria o solo estar com teor de água inadequado para as operações. Segundo esses autores, solos argilosos com umidade elevada se tornam plásticos e, com a excessiva compressão causada por equipamentos ou por pisoteio de animais, haveria um aumento da sua densidade. Para HUMPHREYS (1994) o efeito da compactação se pronuncia mais na época chuvosa, em razão da alta umidade do solo, o que coincide com a alta lotação empregada em razão da maior disponibilidade de forragem, maximizando a compactação.

Apesar do interesse sobre a compactação do solo nos últimos anos, para LEÃO et al. (2003), o impacto de sistemas de pastejo sobre as suas propriedades físicas tem sido subestimado por parte de técnicos e produtores. LEONEL et al. (2003) reforçam esta colocação parcialmente, uma vez que comentam que o setor de pastagens no Brasil necessita de maiores informações de manejo e conservação do solo, pois a degradação das pastagens e a redução da sua capacidade de suporte poderiam estar associadas a vários fatores, como as classes e manejo dos solos, forrageira e condições climáticas, além da compactação ao longo dos anos.

2.3. Geoestatística no estudo da variabilidade espacial do solo

Na área da ciência do solo, o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo tem como objetivo obter informações que permitam melhor entendimento dos processos que levam à produção. Isto possibilita melhoria nas tomadas de decisões sobre o manejo para corrigir os problemas nas práticas agrícolas (TSEGAYE e HILL, 1998a).

A variabilidade espacial dos solos é resultado de processos pedogenéticos e pode ser demonstrada por resultados dos levantamentos e análises, bem como pelas diferenças encontradas nas produções das plantas. São muitas as suas causas: os fatores de formação (material de origem, relevo, organismo, clima e tempo), as práticas agrícolas (manejo, rotação de culturas, fertilizações, etc.) e os processos erosivos, entre outras. Estas podem atuar isoladamente ou em conjunto, numa escala espacial e temporal (CASTRIGNANO e STELLUTI, 1999; CASTRIGNANO et al., 2000).

SYLLA et al. (1995) comentam que a variabilidade espacial do solo pode ser dividida em aleatória e sistemática, sendo que a distinção entre elas depende da escala de trabalho. Assim, segundo PERRIER e WILDING (1986), a variabilidade sistemática é função: a) da forma de relevo: montanhas, platôs, vales bacias, planícies, terraços, etc.; b) da geomorfologia: regiões de topo, depressões, escarpas, etc.; c) dos fatores de formação do solo: cronosequências (função da idade geomorfológica e estabilidade do relevo), litosequências (função do material de origem ou tipo de rocha), toposequências (função do relevo sobre o similares materiais de origem), biosequências (função da biologia, como floresta *versus* cobertura vegetal e orgânica *versus* sequência mineral) e climosequências (função do macro e do microclima); e d) das interações entre os três primeiros. Já a variabilidade aleatória é originada por vários processos, como atividades humanas, fauna e influência das intempéries, sendo que a causa precisa não é conhecida, o que dificulta a modelagem da variável explicativa. Desta forma, a variabilidade sistemática pode ser modelada pela geoestatística, enquanto que a variabilidade aleatória não.

LIMA e SILANS (1999) comentam que mesmo os solos com aparência homogênea apresentam considerável variabilidade, no espaço, de suas propriedades. CASTRIGNANO, et al. (2000) comentam que os manejos do solo e da cultura são adotados como se as áreas fossem homogêneas, causando manejo excessivo, em alguns locais, e insuficiente em outros,

tendo como consequência diminuição do retorno econômico e aumento da poluição e do gasto de energia.

MULLA et al. (1990) acrescentam que na área de pesquisa, a variabilidade espacial do solo pode vir a ser um dos maiores fatores adversos em experimentos de campo, uma vez que estes envolvem muitos pontos ou muitos tratamentos sob áreas que raramente são uniformes. Neste caso, a heterogeneidade pode propiciar baixa eficiência na completa aleatoriedade dos pontos na área. Segundo DAVIS et al. (1995), não considerar a variabilidade do solo poderia acarretar erros em detectar diferenças entre tratamentos. LÓPEZ e ARRÚE (1995) avaliaram a eficiência da utilização do delineamento com blocos incompletos, com base na geoestatística, comparando com o delineamento com blocos completos sem sua utilização. Os resultados comparativos de 1050 análises de variância revelaram que, o delineamento com blocos incompletos, neste caso, aumentou a eficiência da análise em 24%, com redução do quadrado médio do erro em 33% e aumento do número de casos com significância em 25%, em relação aos blocos completos.

OVALLES e COLLINS (1988) sugerem que o conhecimento da variabilidade das propriedades do solo é essencial para produzir seguras interpretações, com o objetivo de produzir eficientes previsões do seu desempenho em locais específicos. CASTRIGNANO et al. (2000) comentam que isto se torna evidente na medida que a variabilidade do solo precisa ser entendida, para tornar possível uma análise detalhada das suas propriedades, uma vez que os diversos fatores que refletem na sua variabilidade refletem no manejo, na penetração de raízes e no transporte de ar e água, entre outros.

Atualmente, são muitos os estudos envolvendo a variabilidade espacial do solo (CASTRIGNANO et al., 2000; GOOVAERTS, 2000; LARK, 2000; MOUSTAFA, 2000; UTSET et al., 2000; KUZUYAKOVA et al., 2001; OLIVER e KHAYRAT, 2001; UTSET e CID, 2001; FIDALSKI et al., 2003) e basicamente todos utilizam a geoestatística como uma ferramenta para tal propósito. Esta permite detectar e modelar os padrões de dependência espacial dos atributos no espaço, possibilitando melhor avaliação.

CROMER (1996) comenta que a geoestatística é utilizada nas avaliações e caracterizações espacial e temporal de certos fenômenos, sendo inicialmente aplicada na mineração de ouro, introduzida pelo pioneiro Danie Krige em 1950, sendo seus

fundamentos matemáticos realizados por George Matheron no início de 1960. Posteriormente, a geoestatística foi aplicada nas indústrias de exploração de petróleo, e o sucesso da atividade estava ligado ao sucesso na aplicação de casos, uma vez que envolvia elevado capital, sendo as operações práticas baseadas na interpretação de dados espaciais. Assim, a base da geoestatística foi elaborada. A partir daí, a aplicação das técnicas da geoestatística expandiu-se para diversas áreas da ciência da terra, servindo como uma ferramenta de tomada de decisões e possibilitando melhoria na caracterização e entendimento de certos fenômenos.

Na ciência do solo, a intensificação do uso de técnicas de geoestatística deu-se a partir de 1980, sendo que muitas pesquisas e artigos foram desenvolvidos desde então, uma vez que os métodos clássicos de análise na ciência da terra já não eram mais suficientes e aplicáveis (BRUS e GRUIJTER, 1997).

A intensificação do uso da geoestatística, a partir dos anos 80, decorreu do fato de que até então, segundo GOOVAERTS (1999), a geoestatística era vista essencialmente como um modo de descrever o padrão espacial por meio de semivariogramas. Novas ferramentas foram desenvolvidas para resolver os problemas, tais como o melhoramento da incerteza com que os valores eram estimados. Hoje, a aplicação da geoestatística na ciência do solo, é utilizada no sentido de estimar e mapear os atributos do solo para locais não-amostrados, estimando os valores por meio de técnicas de interpolação, mais comumente a krigagem. Esse autor comenta que o crescente interesse de cientistas e pesquisadores da ciência do solo, pelas técnicas da geoestatística, foi decorrente da melhoria da eficiência da análise de estimativa espacial incorporada por estas técnicas. Comenta, ainda, que o recente desenvolvimento de aquisição de dados e de recursos computacionais propiciou que a geoestatística fosse largamente difundida, sendo utilizada em diferentes áreas do conhecimento. Estas colocações são reforçadas KUZUYAKOVA et al. (2001), que discutem que as novas possibilidades de aplicação da geoestatística na ciência do solo foram decorrentes do desenvolvimento da sua base teórica e da ciência da computação, sendo que, atualmente, sua utilização é realizada de forma relativamente simples.

Essa intensificação do uso das técnicas de geoestatística na ciência do solo ocorre porque assumiu-se que a distribuição espacial de pontos de observação apresentam correlação, ou seja, existe dependência espacial. Esta pressuposição não é assumida na

estatística clássica, a qual assume que os pontos de observação são independentes, o que, na maioria dos casos, não acontece nos estudos envolvendo as ciências da terra (WEBSTER, 1985; SRIVASTAVA, 1996). Segundo COUTO e KLAMT (1999), em estudos de solos é comum presumir que determinadas propriedades possam ser representadas pela média e variância, a partir de um número suficientemente grande de amostras. Esta pressuposição, conforme TRANGMAR et al. (1985), baseia-se na hipótese de que a variabilidade de determinada área associada à sua média é aleatória e não apresenta dependência espacial entre amostras dentro de uma mesma mancha de solo, considerada homogênea. SRIVASTAVA (1996) comenta que a estatística clássica (não-espacial) serve somente para analisar a distribuição estatística dos dados coletados. Já a geoestatística, incorpora, além da análise da distribuição estatística dos dados, as relações espaciais entre estes, na forma de correlação entre os pontos amostrados. Por essas diferenças, os problemas da ciência da terra são efetivamente analisados, atualmente, por técnicas da geoestatística, quando a interpretação da distribuição espacial dos dados tem forte impacto sobre os resultados e sobre a tomada de decisão.

CROMER (1996), por outro lado, relata que a geoestatística, apesar de propiciar uma melhoria na avaliação e análise de atributos ligados à ciência da terra, não é uma solução, mas sim uma ferramenta, com a qual se pode ter uma melhoria de análise e avaliação, pois não se pode produzir bons resultados a partir de dados ruins. Desta forma, a geoestatística serve para auxiliar na maximização das informações para um melhor julgamento.

2.3.1. Semivariograma e krigagem como ferramentas da geoestatística

DAVIS et al. (1995) comentam que o semivariograma é uma ferramenta da geoestatística, pautado na hipótese da estacionaridade da variância, sendo utilizado para descrever a dependência espacial entre observações, com base na Teoria das Variáveis Regionalizadas. Assim, ISAACS e SRIVASTAVA (1989) comentam que a estrutura da distribuição espacial dos dados observados pode ser caracterizada e quantificada, considerando-se que os valores das variáveis são registrados pelas suas posições.

Desta forma, considerando-se uma área A , para a qual um número de n valores são medidos, $Z(x_i)$, e em cada ponto, x_i , identifica-se sua coordenada (posição) no espaço, sendo

que cada $z(x_k)$ pode ser considerado uma realização particular de uma certa variável aleatória, $Z(x_k)$, para um ponto em particular fixo, x_k . A variável regionalizada $Z(x_i)$, para todo x_i na área A pode ser considerada uma realização da variável aleatória $z(x_i)$ para todo x_i na área A . Assume-se que a variância entre as observações $Z(x_i)$ depende somente da distância, h , entre elas, e não depende do atributo Z em questão. Para isto, deve-se assumir que os atributos possam ser enquadrados dentro de uma condição de quase-estacionaridade, ou seja, o fato de que os atributos mudam de valores dentro de uma determinada área, assumindo-se que exista a variância do incremento $z(x_i) - z(x_i+h)$, onde h é a distância que separa os valores do atributo z nas posições x_i e x_i+h . Assim, segundo WEBSTER e OLIVER (1990), leva a dizer que:

$$Z(x_i) = \mu_A + \varepsilon(x_i)$$

onde:

$Z(x_i)$ - valor do atributo Z para uma posição x_i dentro da área A ;

μ_A - valor médio (esperança) dentro da área A ; e

$\varepsilon(x_i)$ - componente aleatório com média zero e variância definida como:

$$\text{var}[\varepsilon(x_i) - \varepsilon(x_i+h)] = E\{[\varepsilon(x_i) - \varepsilon(x_i + h)]^2\} = 2\gamma(h)$$

Com base nisto, pode-se estimar a semivariância $\gamma^*(h)$ para cada distância h , que separa os valores dos atributos Z nas posições x_i . Assim, o semivariograma é estimado pela equação que segue (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978):

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

onde:

γ^* - semivariância entre pares de valores medidos para determinada distância h ;

h - distância entre valores medidos;

$N(h)$ - número de pares de pontos medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$;

Z - valor do atributo; e

x_i - posição de determinado atributo.

O gráfico $\gamma^*(h)$ versus os valores correspondentes de h é chamado semivariograma e é uma função da distância h ; portanto, depende da sua magnitude e direção. A partir do semivariograma obtêm-se três parâmetros importantes, também denominados propriedades do

semivariograma: efeito pepita (Co), patamar (C + Co) e alcance (a). O efeito pepita refere-se à descontinuidade do semivariograma próximo à origem e expressa o conjunto da variabilidade para uma escala menor que o intervalo de amostragem e a variação não-espacial. O patamar, quando existe, ocorre a partir da distância onde a variância aproxima-se assintoticamente do máximo. O alcance expressa a distância além da qual as amostras não são correlacionadas (VIEIRA et al., 1983).

WEBSTER (1985) comenta que os semivariogramas, além de fornecerem informações a respeito da anisotropia e medidas de correlação entre a distância h , são utilizados no estimador e na variância da krigagem, sendo este um procedimento não-estocástico de interpolação, que apresenta estimadores não-tendenciosos e de variância mínima. Este interpolador considera, ainda, o número de amostras utilizadas, as posições das amostras, a zona a ser estimada e a continuidade espacial da variável em estudo.

Segundo ROUHANI (1996), a vantagem desse interpolador, em relação aos outros, é a de incorporar o modelo da variabilidade espacial dos dados, permitindo que os critérios de estimativa sejam baseados em condições estatísticas bem definidas. Isto faz com que essa técnica seja mais eficiente em relação às outras técnicas de interpolação, que adotam critérios subjetivos.

A interpolação por krigagem, conforme VIEIRA et al. (1983), consiste em estimar valores para locais onde estes não são determinados no campo de estudo, sendo que cada estimativa representa a média ponderada dos valores observados na sua vizinhança, conforme mostra a equação a seguir:

$$z^*(x_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$$

onde:

z^* - valor a ser estimado na posição x_o ;

x_o - posição onde não se tem valores medidos, ou seja, posição do valor a ser estimado dentro do campo de estudo;

λ_i - pesos associados a cada valor medido, $Z(x_i)$;

$Z(x_i)$ - valor medido em uma posição conhecida; e

N - número de valores medidos utilizados na estimativa de $z^*(x_o)$.

2.4. Sistemas de informações geográficas na análise espacial das informações

O perfeito conhecimento dos recursos naturais (solos, clima, vegetação, relevo, etc.) e das características socioeconômicas (população, produção, uso atual, etc.), constituem o embasamento indispensável para avaliação do potencial de uso das terras e permite que a pesquisa agropecuária desempenhe um papel importante no desenvolvimento do País. Atualmente, melhor entendimento dos recursos naturais pode ser conseguido com a análise espacial dos dados sobre os recursos naturais e características socioeconômicas. Assim, esta análise passa a ser de grande importância. Isto se faz necessário, uma vez que hoje o tratamento destas informações espaciais é um requisito para controlar e ordenar a ocupação das unidades físicas do meio ambiente, as quais devem ser pautadas em decisões mais lógicas e racionais (ASSAD e SANO, 1998).

Dado espacial denota qualquer tipo de dado que descreva fenômenos aos quais esteja associada alguma coordenada espacial, ou seja, dados que descrevem fatos, objetos e fenômenos associados à sua localização sobre a superfície terrestre, num certo instante ou período de tempo (CÂMARA et al., 1996). Estes são normalmente denominados dados geo-referenciados e tem as seguintes características:

- características não-espaciais, descrevendo o fenômeno estudado, tais como nome da variável e tipo da variável;
- características espaciais, informando a localização espacial do fenômeno, ou seja, seu geo-referenciamento, associada às propriedades geométricas e topológicas;
- características temporais, identificando o tempo para o qual tais dados são considerados, isto é, quando foram coletados e sua validade; e
- relacionamento, ou seja, os fenômenos geo-referenciados não existem sozinhos no espaço, isto é, tão importante quanto localizá-los, é descobrir e representar seus relacionamentos.

Assim, segundo esses autores, a análise das informações espaciais passa a ser fundamental no entendimento dos fenômenos que podem ser descritos espacialmente.

Com esse objetivo, os sistemas de informações geográficas (SIGs) têm sido amplamente utilizados, uma vez que permitem a espacialização das informações, sendo uma ferramenta cada vez mais utilizada nos processos de planificação econômica, territorial e ambiental (MIRANDA et al., 1995; MATOS, 1996). Para GONZALES (2002), os SIGs são

uma tecnologia que oferece um novo caminho para juntar diferentes áreas do conhecimento, de forma que a interdisciplinaridade esteja presente nos estudos e no manejo dos recursos naturais.

Os sistemas de informações geográficas são definidos como sistemas automatizados utilizados para armazenar, analisar e manipular dados geo-referenciados, ou seja, dados que representem objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la (CÂMARA et al., 1996).

STAR e ESTES (1990), GOODCHILD (1992) e MONTGOMERY e SCHUCH (1993) comentam que, desde os anos 60, quando começaram a ser utilizados, os SIGs vêm sendo aplicados nos mais diversos campos de atividades. SILVA (1999) relata que a ampla aplicação com que os SIGs estão sendo utilizados foi devido às notáveis melhorias na análise das informações, havendo aumento expressivo dos estudos e pesquisas a partir de 1980, sendo que esta melhoria deu-se graças ao desenvolvimento na área da informática. CÂMARA et al. (1996) corroboram este fato, afirmando que com a evolução e desenvolvimento das tecnologias na área da informática, desenvolvendo máquinas mais potentes e programas mais acessíveis, foi que os SIGs foram amplamente utilizados. Desta forma, todos esses autores comentam que, hoje, para se ter um melhor entendimento dos fenômenos que possam ser descritos espacialmente, os SIGs representam uma ferramenta bastante promissora.

Atualmente, os SIGs constituem conjuntos sofisticados de aplicativos que se tornaram indispensáveis para os estudos de quaisquer variáveis ou fenômenos que se distribuam espacialmente (BURROUGH, 1986; BURROUGH e MCDONNELL, 1998). Segundo ASSAD e SANO (1998), a possibilidade de efetuar operações lógicas entre os diversos planos de informações, a partir de arquivos de regras definidas pelo usuário e a geração de cartas temáticas derivadas, faz dos SIGs ferramentas potentes, cujas aplicações abrangem amplo espectro de disciplinas na áreas de cartografia aplicada, urbanismo, análise dos recursos naturais, avaliação de impacto ambiental e avaliação do uso das terras, entre outras, permitindo maior agilidade e otimizando ações que visem o melhor conhecimento dos vários elementos constitutivos dos ecossistemas e suas interações.

CÂMARA et al. (1996) relatam que SIGs comportam diferentes tipos de dados e aplicações, em várias áreas do conhecimento, sendo exemplos: otimização de tráfego, controle cadastral, cartografia, planejamento urbano, etc. Comentam, ainda, que a sua utilização facilita

a integração de dados coletados de forma transparente ao usuário final. ARONOFF (1995) relata diversas aplicações desses sistemas, como na agricultura e planificação de uso das terras, na área florestal e manejo de animais silvestres, na arqueologia e geologia, nas aplicações municipais e nas aplicações de escala global. Em todas as aplicações, os SIGs são de fundamental importância como ferramenta de manipulação e análise das informações.

Os SIGs são particularmente úteis quando se pretende analisar não apenas dados cartográficos, mas também numéricos, simultaneamente, sendo que a espacialização destes últimos implica numa série de dificuldades técnicas e operacionais (EGENHOFER e FRANK, 1990). Porém, alguns trabalhos demonstram a eficiência destes sistemas para a solução destes problemas, mostrando múltiplas potencialidades de reclassificação e cruzamento digital de informações numéricas e cartográficas, permitindo a espacialização de inúmeras variáveis, o que possibilita estudos das mais diversas naturezas (BATISTELLA et al., 1993).

SILVA (1999) ressalta que os sistemas de informações geográficas (SIGs) não garantem um produto final de boa qualidade, com certeza e segurança necessários. Se não houver controle de qualidade e se as informações forem imprecisas e contiverem erros, o resultado final será como que um “lixo organizado”. Assim, os SIGs representam tão somente uma possibilidade de manipular e analisar dados espaciais e tornar possível e mais eficiente o entendimento e caracterização do meio físico. LEES (2002) comenta que para a aplicação dos SIGs, é necessário o conhecimento do fenômeno geográfico estudado, de forma que o sucesso da utilização desses sistemas não está na habilidade de manuseá-los, mas sim no entendimento fundamental dos tipos e modelos de dados apropriados que consigam captar a essência particular do fenômeno geográfico. Porém, o autor ressalta que um bom manuseio dos SIGs aliado a um bom nível de entendimento do fenômeno físico é benéfico. Comenta, ainda, que a análise pelos SIGs, com base em dados espaciais corresponde à descrição dos fatos do mundo real, e somente a partir do momento que estes tomam significado para uso ou aplicação em particular, ou seja, após interpretação, é que eles passam a ser denominados “informações espaciais”, sendo essenciais na análise e são sempre relacionadas às superfícies contínuas, com localização determinada pelas coordenadas espaciais, cuja sua vizinhança pode influenciar.

SILVA (1999) relata que os SIGs, cuja base é a análise geográfica das informações, juntamente com a geoestatística, especialmente a krigagem, como base estatística, seriam

necessários para melhor análise, permitindo minimizar as incertezas na representação digital dos fenômenos que possam ser descritos espacialmente. Isto é reforçado por GOOVAERTS (1999), que comenta que as informações espaciais, especificamente sobre a espacialização da variabilidade dos solos, obtidas com técnicas da geoestatística, poderiam ser manejadas, tratadas e analisadas pelos sistemas de informações geográficas, possibilitando melhor entendimento da relação dependência-escala dos processos físicos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido como descreve o fluxograma apresentado na Figura 1. Inicialmente, foi selecionada a região e as áreas de estudo (uma com mata nativa e outra com pastagem cultivada). Posteriormente, foi realizado o levantamento e a caracterização dos atributos dos solos das áreas selecionadas para aquisição dos resultados analíticos, a partir dos quais foram obtidos o diagnóstico qualitativo com auxílio da estatística clássica, e o diagnóstico quantitativo com auxílio de técnicas da geoestatística e de recursos de geoprocessamento dos sistemas de informações geográficas (SIGs).

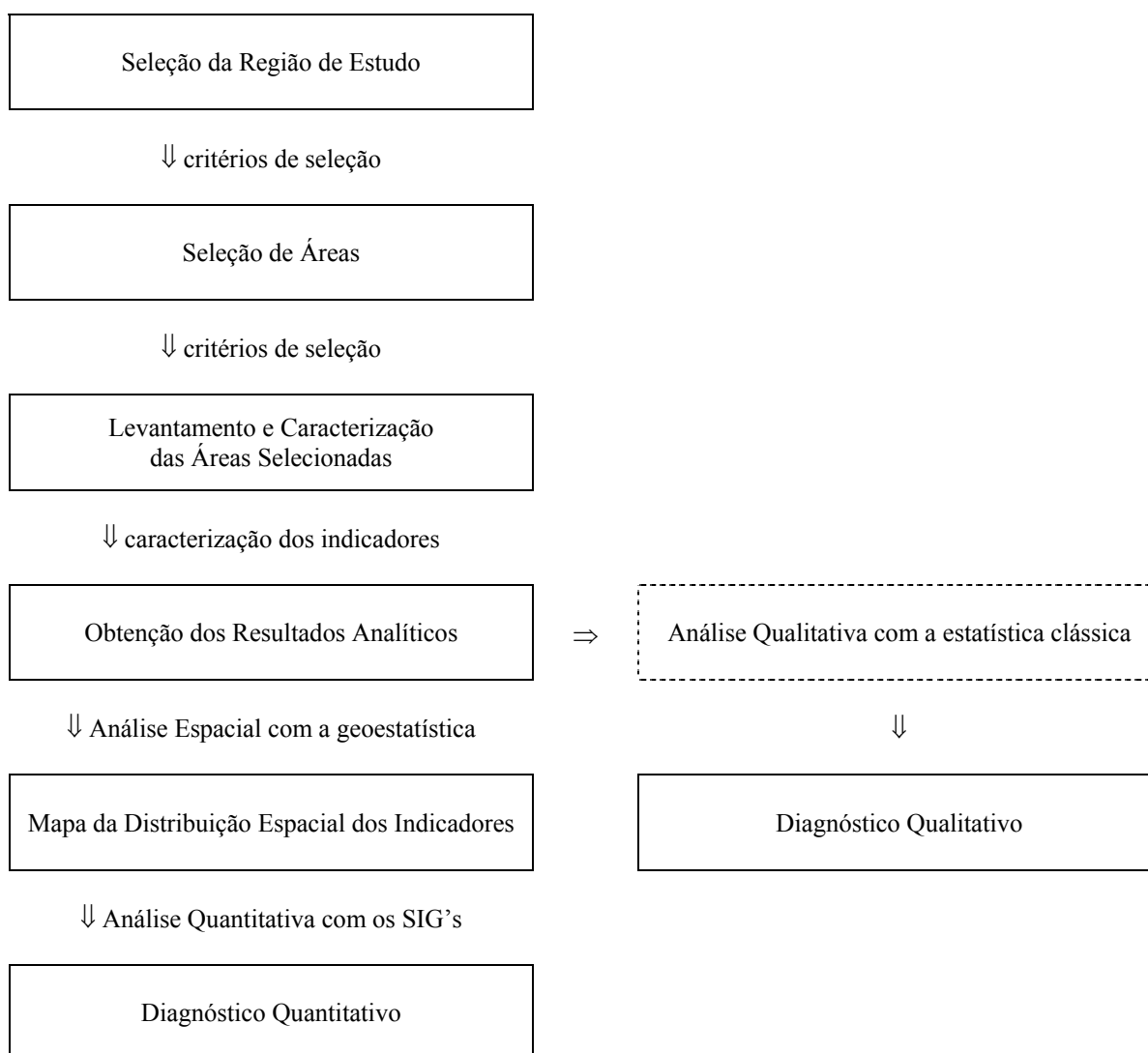


FIGURA 1 - Fluxograma metodológico.

3.1. Região e áreas de estudo

O estudo foi realizado na Fazenda Chuva da Mata, com área aproximada de 1.000 ha, cujas coordenadas são 15°42'43'' de latitude sul e 58°18'19'' de longitude oeste. Esta fazenda localiza-se no município de Glória D'Oeste-MT, cujas coordenadas geográficas são 15°46'28'' de latitude sul e 58°18'43'' de longitude oeste (Figura 2).

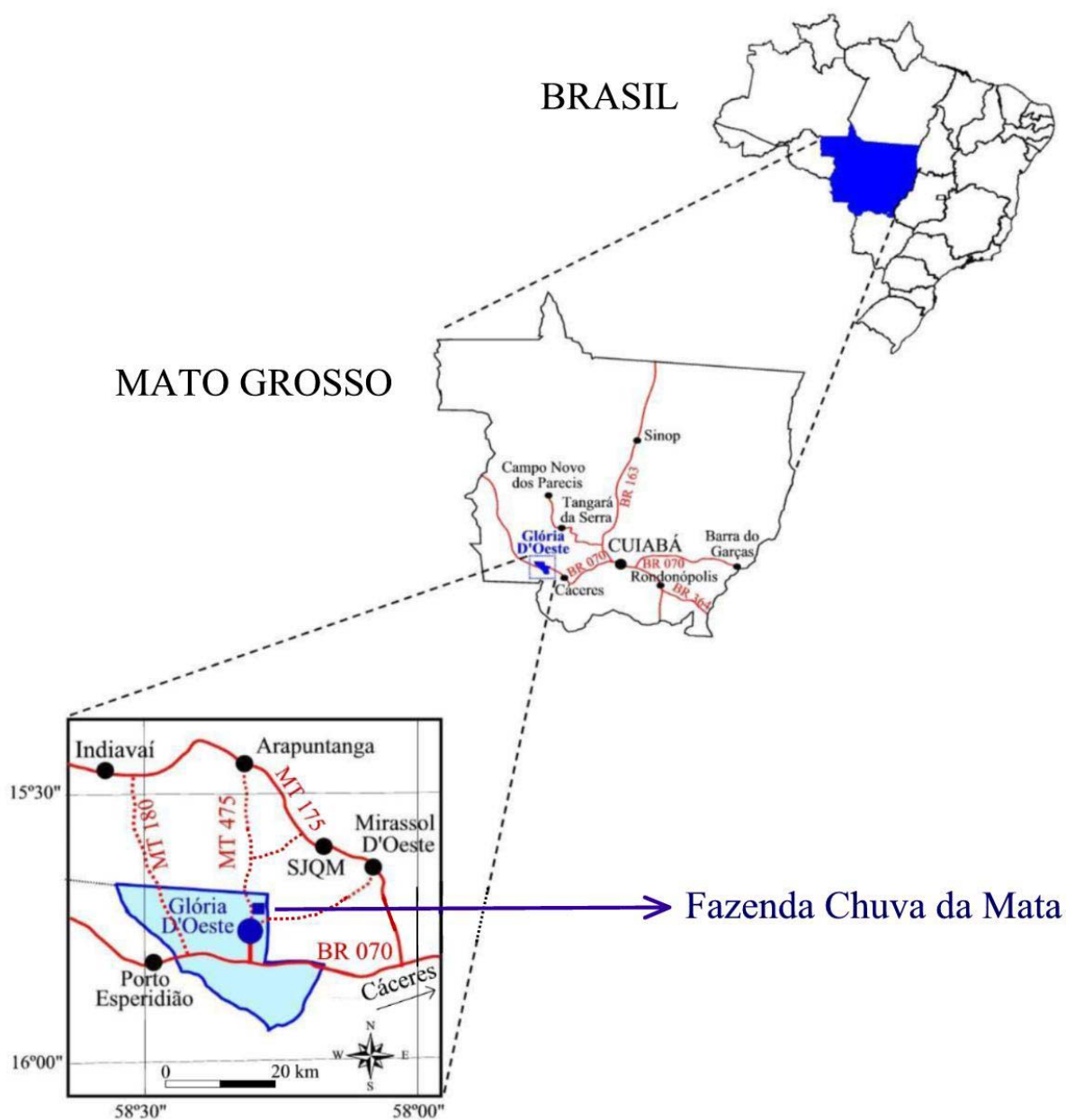


FIGURA 2 - Localização da Fazenda Chuva da Mata em Glória D'Oeste-MT.

Escolheu-se este município por estar localizado em uma região cuja criação de bovinos, solos e forrageiras são representativas da atividade pecuária. Foram vistoriadas várias fazendas no município, sendo que a Fazenda Chuva da Mata se enquadrava nos critérios de seleção previamente estabelecidos, que foram: a) conter áreas com mata e com pastagem, adjacentes, na mesma posição da paisagem e com semelhança de solos; b) conter áreas que apresentassem histórico de uso; e c) conter área com presença de solo degradado sob pastagem. Para o enquadramento no último critério, foi necessário levantamento expedito e rápido, mediante a vistoria prévia com o objetivo de auxiliar na seleção, uma vez que era necessário detectar área que apresentasse solo degradado sob pastagem. A área de mata foi utilizada como padrão de comparação no estudo.

3.1.1. Características da região e das áreas de estudo

O município de Glória D'Oeste, com área total de 941,95 km² e população de 3.361 habitantes, está localizado na região sudoeste do Estado de Mato Grosso, pertencente à Micro-Região do Vale do Jauru, cuja atividade pecuária é significativa para o Estado. Esta região é formada pelos municípios Araputanga, Figueiropolis D'Oeste, Glória D'Oeste, Índiavaí, Jauru, Lambari D'Oeste, Mirassol D'Oeste, Reserva do Cabaçal, Salto do Céu, São José dos Quatro Marcos, Rio Branco e Porto Esperidião.

O município de Glória D'Oeste é composto, em grande parte, por pequenos e médios produtores, com tamanho de propriedade variando entre 50 e 100 ha na sua maioria, porém, ocorrendo propriedades com tamanho superior a 1000 ha. A atividade predominante atualmente, é a pecuária, tanto de corte como de leite. Entretanto, nas décadas de 70 e 80, foi produtor de grãos e de algodão. Com o declínio da agricultura na região, a partir da década de 90, os produtores se voltaram para atividade pecuária. Neste mesmo período, o tamanho médio dos estabelecimentos rurais aumentou, em razão da agregação de propriedades menores.

A criação de bovinos de corte é predominante, realizada em regime extensivo nas fases de cria, recria e engorda, sendo utilizada, principalmente, a raça nelore. A criação de bovinos para a produção de leite é realizada em regime extensivo com suplementação na época da seca, estando presente em quase todas as propriedades, porém, em menor proporção que a pecuária de corte. Entretanto, a pecuária de leite exerce papel importante na propriedade rural, uma vez que serve como complementação da renda familiar para os pequenos

produtores e, em alguns casos, como uma alternativa para diminuir os custos de produção do rebanho de corte. A atividade leiteira utiliza, principalmente, animais mestiços oriundos do cruzamento entre as raças Gir e Holandês. A maior parte da produção de leite é destinada aos laticínios localizados na cidade de Mirassol D'Oeste, São José dos Quatro Marcos e Araputanga, e, em menor quantidade, ao laticínio localizado em Glória D'Oeste, onde é destinada exclusivamente para fabricação de queijo. A atividade é explorada predominantemente por pequenos e médios produtores e, em menor quantidade, por grandes pecuaristas.

O nível tecnológico, padrão racial do rebanho, sanidade animal, profilaxia e produtividade, variam em função das condições econômicas e do nível tecnológico do produtor.

Tanto a pecuária de corte como a de leite utilizam, atualmente, como forrageira principal, o capim braquiário (*Brachiaria brizantha* cv. Marandú), sendo que este ocupa praticamente 80% da totalidade das áreas com atividade pecuária. A maioria das propriedades tem problemas de degradação de solo e de pastagem, em razão do tempo de uso, com média de 20 anos, sem haver nenhuma recuperação, no sentido de manter a taxa de lotação em níveis econômicos adequados. Nestas propriedades, o fogo foi utilizado somente na abertura das áreas e normalmente não é empregado como forma de manejo da pastagem.

O município possui, em geral, solos férteis, predominantemente das classes Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico (Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico), Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico e Latossolo Vermelho-Escuro Eutrófico (Latossolo Vermelho Eutrófico). Possui também solos de menor fertilidade, das classes Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico (Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico) e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, porém em menor proporção (RADAMBRASIL, 1982; EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1999). Assim, a aptidão agrícola destes solos varia em função das suas características, sendo em sua maioria com aptidão para lavoura.

Geologicamente, o município apresenta rochas da Formação Complexo Xingu, pertencente ao período Pré-Cambriano Inferior e Médio, composta por biotita-gnaisses, hornblenda-gnaisses, migmatitos, granitos, xistos, filonitos e milonitos. Geomorfologicamente, está inserido na Depressão do Rio Paraguai, com altitude média de

220 metros. O relevo varia de plano a ondulado na sua maioria, apresentando tanto formas convexas com relevo de topo convexo, como formas tabulares com relevo de topo aplanado, ambos com diferentes ordens de grandeza de aprofundamento da drenagem, separados por vales de fundo plano (RADAMBRASIL, 1982).

Com relação a vegetação natural, os fitotipos mais comuns são o cerrado, o cerradão e a floresta tropical subcaducifolia. Porém, grande proporção da área do município encontra-se desmatada.

A classificação climática é do tipo Aw, segundo classificação de Köppen. O clima é tropical quente e sub-úmido, com precipitações anuais na ordem de 1.500 mm. O regime pluviométrico apresenta duas estações distintas: uma seca, que vai de maio a setembro, quando as chuvas reduzem ou são ausentes; e outra chuvosa, que vai de outubro a abril. Os meses mais chuvosos são dezembro, janeiro e fevereiro, apresentando, normalmente, totais acima de 300 mm. Os quatro meses mais secos compreendem os meses de junho, julho, agosto e setembro. A região apresenta temperatura média anual de 28°C, com temperaturas variando durante o ano de 18 a 38°C. A umidade relativa, nos meses de novembro a abril, chega a superar 80%, e no período de inverno normalmente são inferiores a 60% (EMPRESA MATOGROSSENSE DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA E EXTENSÃO RURAL - EMPAER, 2000).

As áreas para estudo, constando de uma área com solo sob mata e uma área com solo sob pastagem, estão localizadas em topografia com relevo plano, com declividade máxima de 3% e altitude aproximada de 220 metros. As áreas encontram-se separadas, uma da outra, por uma distância aproximada de 200 metros, com diferenças de cotas altimétricas entre elas de aproximadamente 1 metro, sendo que a área com mata se encontra em uma posição inferior na paisagem em relação a área com pastagem (Figura 3). A vegetação da área com mata nativa é a floresta tropical subcaducifolia, composta por 50% ou mais de espécies que apresentam decidualidade foliar dos indivíduos dominantes, com porte médio em torno de 20 metros de altura. Apresenta árvores emergentes decíduais, tais como peroba (*Aspidosperma* spp.), cedros (*Cedrela* spp.), ipê (*Tabebuia* spp.), aroeira (*Schinus* spp.) e angicos (*Piptadenia* spp.), entre outras. É comum encontrar grande quantidade de bacuris (*Platonia isignis*), sendo que nas áreas com pastagem, esses são mantidos como forma de fornecer sombra aos animais e indicar



(a)



(b)

FIGURA 3 - Aspecto das áreas de estudo. (a) Pastagem com *Brachiaria brizantha* cv. Marandú à frente e floresta tropical subcaducifólia ao fundo. (b) Floresta tropical subcaducifólia.

a boa fertilidade do solo (terra de bacuri). A forrageira, atualmente utilizada na área com pastagem, é o braquiário (*Brachiaria brizantha* cv. Marandú).

3.1.2. Histórico de uso da área com pastagem

A abertura da Fazenda Chuva da Mata foi iniciada em 1980 e finalizada em 1982, utilizando-se machado para derrubada da vegetação, seguindo a eliminação dos restos vegetais mediante o uso do fogo. Após a derrubada e limpeza inicial do terreno, a área foi cultivada por duas safras consecutivas (1982/1983 e 1983/1984) com banana e arroz ou milho, consorciados. No ano de 1984, foi feita nova limpeza da área, utilizando-se máquina de esteira para retirada dos tocos residuais, da soca da banana e da capoeira que por ventura tenha aparecido, sendo feito o enleiramento para posterior queima. Em seguida, foi feito o plantio de milho (safra 1984/1985). Posteriormente, foi plantado o capim-colonião por meio de mudas, que permaneceu durante os anos de 1985 a 1988. Em 1989 foi plantado o capim-braquiário (*Brachiaria brizantha* cv. Marandú), utilizando-se de 30 a 40 kg de semente/ha, sendo que esta permanece até os dias atuais como forrageira para o rebanho.

A fazenda tem como atividade principal, a criação de bovinos de corte em regime extensivo, fazendo-se mineralização e suplementação no cocho. A capacidade de suporte média utilizada, atualmente, é de 1,5 cabeça/ha, chegando algumas vezes, no período chuvoso, a 3 cabeças/ha. O manejo adotado consiste em deixar o rebanho no piquete enquanto houver disponibilidade de forragem e depois transferi-lo para outro pasto, propiciando um período de repouso para o restabelecimento da forrageira. A limpeza do pasto é feita de forma manual, com auxílio de foice. Durante todo o tempo de uso da área, nunca foi realizada qualquer forma de adubação ou recuperação de pastagem. Todas as vacinas e cuidados sanitários são seguidos normalmente, conforme recomendações técnicas do Instituto de Defesa Agropecuária de Mato Grosso (INDEA-MT).

3.1.3. Solos em estudo

Os solos presentes na área com mata e na área com pastagem são classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico Típico e Latossolo Vermelho Eutrófico Típico, respectivamente, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMPRESA

BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1999). Os Quadros 2 a 7 apresentam a descrição geral, a descrição morfológica e os resultados analíticos das amostras, e as Figuras 4 e 5, os perfis dos dois solos.

QUADRO 2 - Descrição geral do perfil do Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com mata (floresta tropical subcaducifólia).

DATA: 09/06/2002
CLASSIFICAÇÃO: Latossolo Vermelho Amarelo Eutrófico Típico textura argilosa.
LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: a 1.000 metros da margem direita da rodovia MT 475, sentido Glória D'Oeste – Araputanga, na Fazenda Chuva da Mata, localizada a 4 km do município de Glória D'Oeste. Glória D'Oeste-MT, coordenadas 15°42'22,9'' S e 58°18'03,1'' WGr.
SITUAÇÃO, DECLIVE, E COBERTURA VEGETAL: terço superior, com 3% declive, sob floresta.
ALTITUDE: 220 m.
LITOLOGIA: biotita-gnaisses, hornblenda-gnaisses, migmatitos, granitos, xistos, filonitos e milonitos.
FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Complexo Xingu.
PERÍODO: pré-cambriano inferior e médio.
MATERIAL ORIGINÁRIO: produtos da decomposição das litologias supracitadas.
RELEVO LOCAL: plano.
RELEVO REGIONAL: plano e suave ondulado
EROSÃO: não-aparente.
PEDREGOSIDADE E, OU, ROCHOSIDADE: não-pedregoso e não-rochoso.
DRENAGEM: bem drenado
VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: floresta tropical subcaducifólia.
USO ATUAL: nenhum.
CLIMA: Aw. tropical quente e sub-úmido.
RESPONSÁVEIS PELA DESCRIÇÃO: Virlei Álvaro de Oliveira, Eduardo Guimarães Couto e Emílio Carlos de Azevedo.

QUADRO 3 - Descrição morfológica do perfil do Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com mata (floresta tropical subcaducifólia).

A1	0-7 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR3/2); franco argilo-arenosa; moderada e forte, pequena a grande, granular; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica a plástica, ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição plana e clara.
A2	7-36 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR3/2); franco argilo-arenosa; moderada a forte, pequena, granular; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica a plástica, ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição plana e gradual.
AB	36-48 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR3/3); franco argilo-arenosa; moderada e forte, pequena, granular; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica a plástica, ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição plana e gradual.
BA	48-59 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR3/4); argilo-arenosa; moderada e forte, pequena, granular; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica a plástica; ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição plana e gradual.
BW1	59-76 cm; vermelho-amarelado (5YR4/6); argilo-arenosa; fraca, pequena a média, blocos subangulares; macia, friável, plástica, pegajosa; transição plana e difusa.
BW2	76-99 cm; vermelho-amarelado (5YR5/6); argila; moderada e forte, pequena, granular e fraca pequena blocos subangulares; macia, friável, plástica, pegajosa; transição plana e difusa.
BW3	99-138 cm; vermelho-amarelado (5YR5/6); argilo-arenosa; forte, pequena, granular; macia friável, plástica, pegajosa; transição plana e difusa.
BW4	138-190 cm; vermelho-amarelado (5YR5/6); argilo-arenosa; forte, pequena, granular; macia, friável, plástica, pegajosa; transição plana e abrupta.
2BW5	190-210 cm; vermelho-amarelado (5YR5/6); argilo-arenosa muito cascalhenta; granular; plástica, pegajosa; transição plana e abrupta.
2BW6	210 cm ⁺ ; vermelho-amarelado (5YR5/6); argilo-arenosa muito cascalhenta; granular; plástica, pegajosa.

Raízes: finas, médias, abundantes, grossas e comuns no A1; finas, médias e comuns até o topo de BW1; finas e comuns no restante dos horizontes.

QUADRO 4 - Resultados analíticos das amostras dos horizontes do perfil do Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com mata (floresta tropical subcaducifolia).

Horizonte		Frações da amostra total (%)			Composição granulométrica (g/kg)			Argila dispersa em água (g/kg)	Relação silte argila	Grau de floculação (%)	Densidade (kg/dm³)		Ma (%)	Mi (%)	PT (%)	Ks (mm/h)	
Símbolo	Prof. (cm)	Calhau	Cascalho	Terra fina	Areia	Silte	Argila				Ds	Dp					
A1	0-7	0,0	1,3	98,7	625	83	292	203	0,28	31,5	1,08	2,46	30,35	26,41	56,76	1011,22	
A2	7-36	0,0	2,4	97,6	625	66	309	270	0,21	12,7	1,30	2,54	24,61	23,79	48,40	107,35	
AB	36-48	0,0	2,8	97,2	608	66	326	270	0,20	17,2	1,36	2,64	21,44	22,88	44,32	110,87	
BA	48-59	0,0	2,8	97,2	558	67	375	286	0,18	23,7	1,35	2,61	18,14	26,14	44,28	87,29	
BW1	59-76	0,0	5,4	94,6	458	67	475	320	0,14	32,7	1,33	2,60	17,43	28,56	45,99	55,61	
BW2	76-99	0,0	4,0	96,0	425	83	492	420	0,17	14,7	1,34	2,66	13,74	32,38	46,12	20,41	
BW3	99-138	0,0	5,7	94,3	525	83	392	220	0,21	44,0	1,26	2,68	18,66	32,32	50,98	64,41	
BW4	138-190	0,0	7,0	93,0	508	83	409	286	0,20	30,0	1,36	2,70	15,44	32,81	48,25	35,20	
2BW5	190-210	1,7	69,4	28,9	525	66	409	153	0,16	62,6	1,64	2,73	17,60	23,40	41,00	84,47	
2BW6	210+	2,0	69,3	28,7	491	67	442	287	0,15	35,0	1,53	2,72	14,42	28,71	43,13	54,56	
Horizonte		pH (1:2,5)			Complexo sortivo (cmol _e /dm³)								V (%)	m (%)	P (mg/dm³)		
Símbolo	Prof. (cm)	água	KCl	CaCl ₂	Ca	Mg	K	Na	SB	Al	H	CTC					
A1	0-7	6,5	5,9	6,0	9,5	2,2	99	6	12,0	0,0	1,9	13,8	86,4	0,0	2,3		
A2	7-36	6,6	5,6	5,9	7,3	1,5	54	2	8,9	0,0	1,4	10,4	86,3	0,0	1,4		
AB	36-48	6,7	5,7	5,9	5,2	1,2	45	2	6,5	0,0	1,5	8,0	81,7	0,0	0,8		
BA	48-59	6,7	5,6	5,9	4,6	1,1	48	2	5,8	0,0	1,1	6,9	84,3	0,0	0,6		
BW1	59-76	6,6	5,6	5,9	4,0	1,0	39	1	5,1	0,0	0,7	5,8	88,3	0,0	0,6		
BW2	76-99	6,8	5,7	6,0	2,9	1,0	47	1	4,0	0,0	1,1	5,1	79,3	0,0	0,6		
BW3	99-138	6,8	5,9	6,2	2,0	0,8	83	1	3,0	0,0	0,7	3,7	80,9	0,0	0,3		
BW4	138-190	6,9	6,0	6,2	1,6	0,7	130	1	2,6	0,0	0,9	3,5	75,4	0,0	0,3		
2BW5	190-210	6,7	5,7	5,8	0,8	0,6	90	2	1,6	0,0	0,9	2,6	63,5	0,0	0,3		
2BW6	210+	6,5	5,7	5,8	0,9	0,7	67	3	1,8	0,0	0,7	2,5	71,3	0,0	0,3		
Horizonte		C (g/kg)	N (g/kg)	C/N	Ataque sulfúrico (g/kg)				Relações moleculares			Elementos (mg/dm³)					
Símbolo	Prof. (cm)				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Ki	Kr	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$	Zn	Cu	Fe	Mn	S	B
A1	0-7	31,8	2,66	12	48,2	70,2	29,1	6,8	0,69	0,49	2,41	6,5	0,4	11	165,3	5,0	0,65
A2	7-36	13,3	1,12	12	55,6	82,1	33,2	9,9	0,68	0,48	2,47	1,2	0,4	11	88,8	4,3	0,26
AB	36-48	7,9	0,84	9	62,0	86,7	35	10,3	0,72	0,51	2,48	0,5	0,6	16	48,5	4,9	0,14
BA	48-59	5,0	0,56	9	73,8	111,6	39,3	10,4	0,66	0,49	2,84	0,5	1,0	23	30,5	4,5	0,16
BW1	59-76	4,3	0,49	9	83,3	134,5	50,1	12,5	0,62	0,45	2,68	0,4	1,0	21	25,6	5,3	0,16
BW2	76-99	3,5	0,28	13	96,1	152,5	53,2	13,5	0,63	0,47	2,87	0,3	1,5	33	16,1	4,4	0,19
BW3	99-138	2,1	0,21	10	86,5	142,3	51,1	13,7	0,61	0,45	2,78	0,2	1,6	37	9,3	3,8	0,14
BW4	138-190	1,7	0,65	3	83,5	131,7	49,2	12,3	0,63	0,46	2,68	0,2	1,1	36	5,6	4,5	0,11
2BW5	190-210	1,5	0,28	5	95,0	149,1	56,3	13,9	0,64	0,46	2,65	0,3	0,6	43	2,8	5,1	0,12
2BW6	210+	1,0	0,28	4	93,6	143,7	58,1	14,3	0,65	0,46	2,47	0,4	0,7	49	2,2	5,3	0,12

Ma - macroporosidade; Mi - microporosidade; PT - porosidade total; Ks - condutividade hidráulica.

QUADRO 5 - Descrição geral do perfil do Latossolo Vermelho Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com pastagem (*Brachiaria brizantha* cv. Marandú).

DATA: 09/06/2002
CLASSIFICAÇÃO: LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico Típico textura argilosa
LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS: a 1.000 metros da margem direita da rodovia MT 475, sentido Glória D'Oeste – Araputanga, na Fazenda Chuva da Mata, localizada a 4 km do município de Glória D'Oeste. Glória D'Oeste-MT, coordenadas 15°42'29,8'' S e 58°17'56,4'' WGr.
SITUAÇÃO, DECLIVE, E COBERTURA VEGETAL: terço médio superior, com 3% de declive, sob pastagem.
ALTITUDE: 221 m.
LITOLOGIA: biotita-gnaisses, hornblenda-gnaisses, migmatitos, granitos, xistos, filonitos e milonitos.
FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Complexo Xingu.
PERÍODO: pré-cambriano inferior e médio.
MATERIAL ORIGINÁRIO: produtos da decomposição das litologias supracitadas.
RELEVO LOCAL: plano.
RELEVO REGIONAL: plano e suave ondulado.
EROSÃO: não-aparente e ligeira.
PEDREGOSIDADE E, OU, ROCHOSIDADE: não-pedregoso e não-rochoso.
DRENAGEM: bem drenado.
VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: floresta tropical subcaducifólia.
USO ATUAL: pastagem com <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú.
CLIMA: Aw. tropical quente e sub-úmido.
RESPONSÁVEIS PELA DESCRIÇÃO: Virlei Álvaro de Oliveira, Eduardo Guimarães Couto e Emílio Carlos de Azevedo.

QUADRO 6 - Descrição morfológica do perfil do Latossolo Vermelho Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com pastagem (*Brachiaria brizantha* cv. Marandú).

A1p	0-12 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR3/3); franco argilo-arenosa; moderada grande granular e forte média blocos subangulares; dura, friável, ligeiramente plástica, pegajosa; transição plana e gradual.
A2	12-36 cm; bruno-avermelhado-ecuro (5YR3/4); argilo-arenosa; maciça que se desfaz em fraca e moderada, pequena, granular; dura, friável, ligeiramente plástica, pegajosa; transição plana e gradual.
AB	26-46 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR3/4); argilo-arenosa; moderada, pequena a média, granular e fraca, pequena blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica, pegajosa; transição plana e difusa.
BA	46-82 cm; vermelho-escuro (2,5YR3/6); argila; fraca e moderada, pequena e média, blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, plástica, pegajosa; transição plana e difusa.
BW1	82-139 cm; vermelho (2,5YR4/8); argila; moderada, pequena, granular e fraca, pequena a média, blocos subangulares; macia a ligeiramente dura, friável, plástica, pegajosa; transição plana e difusa.
BW2	139-200 cm ⁺ ; vermelho (2,5YR4/8); argila; forte, pequena, granular; macia, friável, plástica, pegajosa.

Raízes: finas, médias e abundantes no Ap, e finas e comuns até o BW1.

Os solos presentes nas áreas de estudo são definidos como solos minerais não-hidromórficos, com sequência de horizontes A-Bw-C, horizonte B latossólico, profundos, bem drenados, friáveis, com baixa densidade e alta porosidade, indicando boas condições físicas em condições naturais (OLIVEIRA et al., 1992, JACOMINE et al., 1995). Apresentam estágio avançado de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações ocorridas no material de origem sendo desprovidos de material primário ou secundário menos resistentes ao intemperismo (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1999).

Na área com pastagem, devido ao maior teor de Fe₂O₂, o solo tem cor mais vermelha (matiz do horizonte B de 2,5 YR) do que na área com mata (matiz do horizonte B de 5YR).

QUADRO 7 - Resultados analíticos das amostras dos horizontes do perfil do Latossolo Vermelho Eutrófico Típico textura argilosa presente na área com pastagem (*Brachiaria brizantha* cv. Marandú).

Horizonte		Frações da amostra total (%)			Composição granulométrica (g/kg)			Argila dispersa em água (g/kg)	Relação <u>silte</u> argila	Grau de flocculação (%)	Densidade (kg/dm ³)		Ma (%)	Mi (%)	PT (%)	Ks (mm/h)
Símbolo	Prof. (cm)	Calhau	Cascalho	Terra fina	Areia	Silte	Argila				Ds	Dp				
A1p	0-12	0,0	1,1	98,9	591	67	342	270	0,20	21,2	1,50	2,46	8,63	29,80	38,43	10,21
A2	12-26	0,0	1,4	98,6	558	67	375	286	0,18	23,7	1,38	2,55	14,74	29,14	43,88	13,38
AB	26-46	0,0	2,5	97,5	525	66	409	353	0,16	13,7	1,32	2,66	19,34	27,53	46,87	44,00
BA	46-82	0,0	3,3	96,7	458	67	475	370	0,14	22,1	1,33	2,72	15,23	31,71	46,94	30,62
BW1	82-139	0,0	5,1	94,9	425	66	509	420	0,13	17,6	1,32	2,71	15,77	32,69	48,46	24,64
BW2	139-200+	0,0	3,3	96,7	458	67	475	403	0,14	15,2	1,25	2,73	21,50	30,48	51,98	48,22

Horizonte		pH (1:2,5)			Complexo sortivo (cmol _c /dm ³)								V (%)	m (%)	P (mg/dm ³)
Símbolo	Prof. (cm)	água	KCl	CaCl ₂	Ca	Mg	K	Na	SB	Al	H	CTC			
A1p	0-12	6,5	5,4	5,7	8,4	0,9	176	4	9,8	0,0	2,3	12,0	81,0	0,0	1,4
A2	12-26	6,6	5,6	5,8	7,9	0,7	63	5	8,8	0,0	2,1	10,9	80,4	0,0	1,1
AB	26-46	6,8	5,7	6,1	6,3	0,6	28	3	7,0	0,0	1,4	8,4	83,0	0,0	0,8
BA	46-82	7,0	5,9	6,3	4,8	0,5	18	4	5,3	0,0	1,2	6,5	82,1	0,0	0,6
BW1	82-139	7,2	6,3	6,5	3,3	0,3	19	3	3,6	0,0	0,6	4,2	86,6	0,0	0,6
BW2	139-200+	7,3	6,6	6,7	2,8	0,3	27	2	3,2	0,0	0,6	3,7	84,9	0,0	0,3

Horizonte		C (g/kg)	N (g/kg)	C/N	Ataque sulfúrico (g/kg)				Relações moleculares			Elementos (mg/dm ³)					
Símbolo	Prof. (cm)				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Ki	Kr	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$	Zn	Cu	Fe	Mn	S	B
A1p	0-12	18,7	1,40	13	70,5	95,9	49,0	13,1	0,74	0,49	1,96	1,2	0,5	20	100,1	6,6	0,34
A2	12-26	10,8	0,91	12	74,4	106,8	50,2	13,2	0,70	0,47	2,13	0,5	0,3	13	75,6	5,8	0,22
AB	26-46	7,0	0,70	10	79,5	118,6	55,3	13,4	0,67	0,46	2,14	0,4	0,7	22	38,8	4,5	0,18
BA	46-82	3,5	0,49	7	99,3	156,2	70,1	15,8	0,64	0,44	2,23	0,4	1,6	56	24,8	4,4	0,15
BW1	82-139	2,6	0,49	5	97,4	157,1	78,0	15,9	0,62	0,41	2,01	0,3	1,8	77	12,6	4,0	0,16
BW2	139-200+	1,9	0,21	9	90,8	142,9	64,1	15,1	0,64	0,44	2,23	0,2	1,3	77	8,9	4,0	0,19

Ma – macroporosidade; Mi – microporosidade; PT –porosidade total; Ks – condutividade hidráulica.

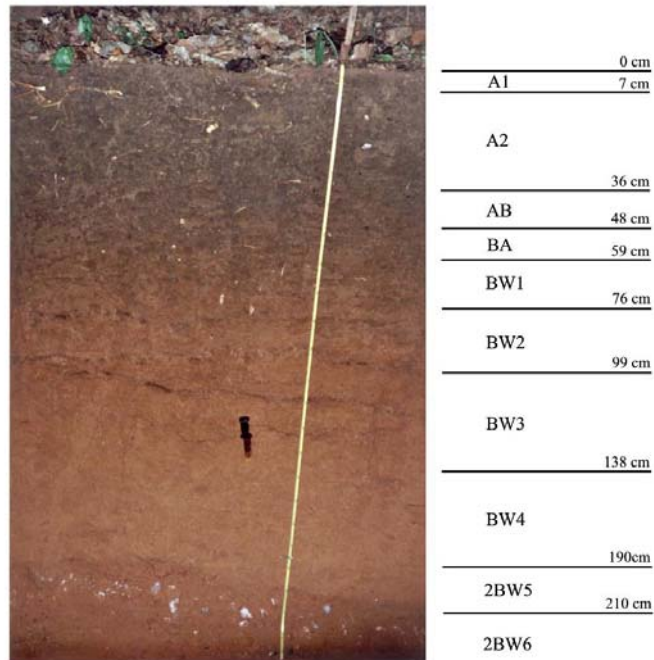


FIGURA 4 - Pefil do Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico Típico, presente na área com mata (floresta tropical subcaducifólia). Coordenadas 15°42'22,9''S e 58°18'03,1''WGr.

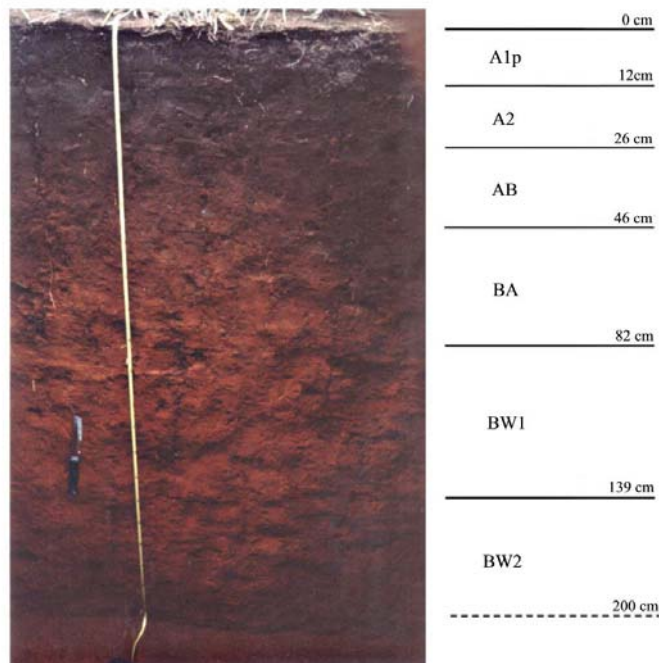


FIGURA 5 - Pefil do Latossolo Vermelho Eutrófico Típico, presente na área com pastagem (*Brachiaria brizantha* cv. Marandú). Coordenadas 15°42'29,8''S e 58°17'56,4''WGr.

Na mata, o solo tem textura argilo-arenosa e na pastagem a textura varia de argilo-arenosa a argila. Não apresentam gradiente textural em razão de serem relativamente pequenas as diferenças na quantidade de argila distribuídas no perfil, sendo que na mata a variação está entre 292 a 492 g/kg e na pastagem, entre 342 a 509 g/kg. Em termos médios, o solo sob pastagem apresentou 50 g/kg a mais de argila em relação ao solo sob mata.

A estrutura predominante é granular nos dois solos, propiciando boa infiltração de água em profundidade em condições naturais. Em alguns horizontes, apresentaram blocos subangulares.

São solos com alta riqueza de elementos nutrientes, com caráter eutrófico, evidenciado pelos elevados valores de elementos que compõem o complexo sortivo e pelos bons valores de micronutrientes, cujos níveis críticos encontram-se acima do exigido pelas culturas e, ou, para pastagens (NEVES, 1996; VILELA et al., 2000).

A relação silte/argila é baixa nos dois casos e as relações moleculares K_i e K_r são menores que 2,2 (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1999), mostrando que a intemperização destes solos é alta.

3.2. Amostragem e caracterização dos solos

Em cada área selecionada, estabeleceu-se um esquema de amostragem contendo um conjunto de 121 pontos amostrais, conforme mostra a Figura 6. Foi estabelecida uma área para amostragem, cujo limite foi delimitado considerando-se o raio máximo de 0,25 m a partir de cada ponto da malha amostral. Nessa área, foram retiradas amostras deformadas da camada de 0-20 cm para determinação dos atributos químicos, e amostras indeformadas da camada de 5-10 cm para determinação dos atributos físicos. Nesta última camada, foram também realizadas as determinações de campo para caracterização *in locus* dos atributos físicos do solo que se fizeram necessários. A escolha da camada de 5-10 cm para coleta de amostras indeformadas foi devido a detecção prévia da maior intensidade das alterações dos atributos físicos do solo.

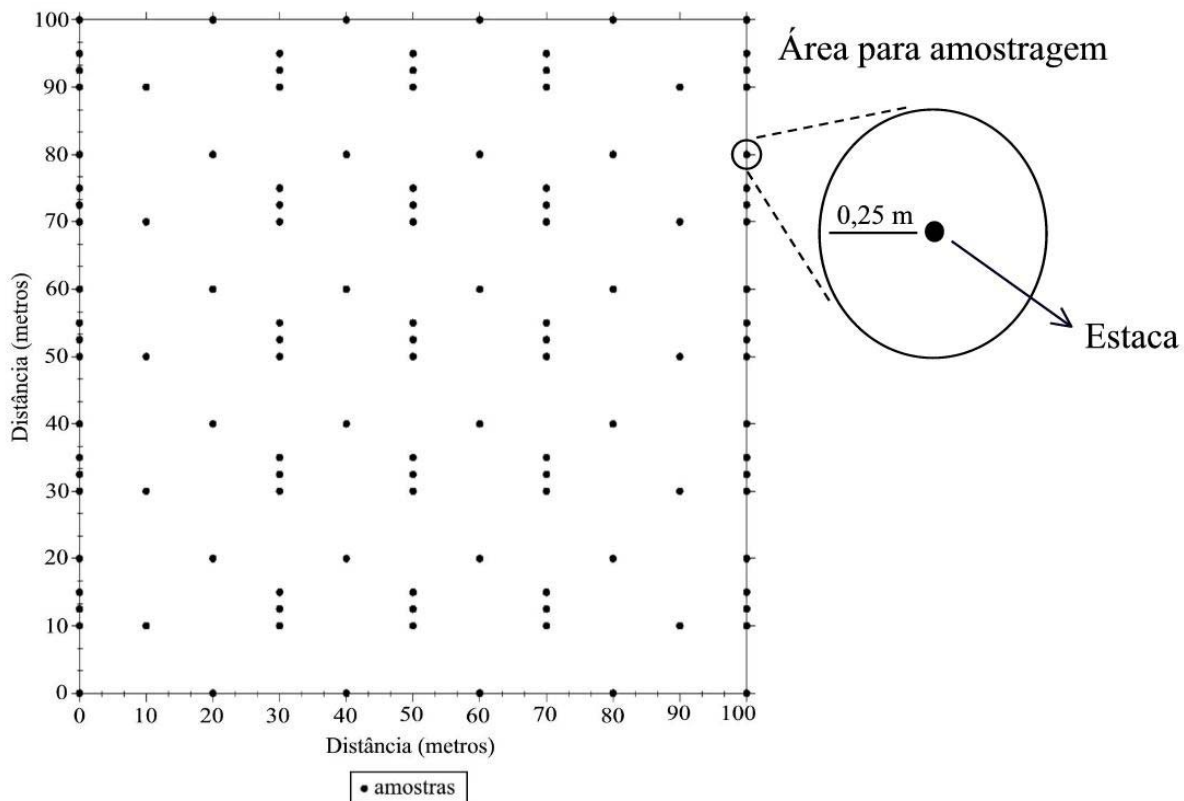


FIGURA 6 - Esquema de amostragem, contendo um conjunto de 121 pontos amostrais. Área total de 1ha.

Para a realização da análise espacial, foi necessária amostragem com maior densidade, que constou de quantidade elevada de pontos amostrais, sendo igualmente necessário que estes pontos estivessem em espaçamentos adequados, ou seja, dentro do alcance espacial, para que fosse possível obter o padrão espacial de distribuição. Assim, o esquema de amostragem (Figura 6) foi estabelecido em razão de que: a) permitiu avaliar a variabilidade espacial em curta distância, tendo como distância mínima 2,5 m, possibilitando que se conseguisse melhores modelos de distribuição espacial; b) foi retirada menor quantidade de amostras, comparativamente com amostragem sistemática com malha regular para a mesma distância mínima de 2,5 m, o que diminui os custos com amostragem e análises; e c) um conjunto de 121 pontos amostrais foi suficiente para se obter um número de pares de pontos que permitiram a confecção do semivariograma. A Figura 7 mostra o detalhe da malha amostral da mata e da pastagem.

Para o levantamento e caracterização de cada área selecionada, foram utilizados os seguintes atributos do solo:

- características químicas: pH, P, K, Ca, Mg, Al, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases, carbono orgânico, relação C/N, N, B, Cu, Fe, Mn, S e Zn;
- características físicas: granulometria, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, condutividade hidráulica e grau de flocculação; e
- resistência do solo à penetração, utilizando penetrógrafo eletrônico automático (Figura 8d), conforme BIANCHINI et al. (2002).

O pH em água foi determinado utilizando-se eletrodo de vidro em solução do solo, na proporção de 1:2,5. O cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e o manganês (Mn) foram extraídos com KCl 1M; o cobre (Cu) e o zinco (Zn), com HCl 0,1 M; e o ferro (Fe), com oxalato de amônio $((\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$, pH 3). Todos foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. O alumínio (Al) foi extraído com KCl 1M e determinado por titulação com NaOH. O fósforo (P) e o potássio (K) foram extraídos com solução Mehlich 1 (HCl 0,05 N + H_2SO_4 0,025 N), sendo o P determinado por colorimetria (complexo fosfomolibdico) e o K por fotometria de chama, de acordo com os procedimentos da EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA (1997).

O carbono orgânico foi determinado por colorimetria, após combustão úmida com dicromato de potássio e ácido sulfúrico. O boro (B) foi extraído com água quente e determinado por colorimetria. As determinações de nitrogênio (N) foram realizadas por meio de arraste de vapor semimicro Kjeldahl, sendo extraído por solução com KCl 1 M. O enxofre (S) foi determinado conforme metodologia de TEDESCO et al. (1995).

A argila dispersa em água, para o cálculo do grau de flocculação, e a análise granulométrica (argila, silte e areia), com dispersão com NaOH 0,1 N, foram realizadas pelo método do densímetro de Boyoucos. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, e a microporosidade, a macroporosiade e a porosidade total, determinados pela mesa de tensão. A condutividade hidráulica foi determinada conforme procedimentos da EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA (1997).

Para a retirada de amostras deformadas, utilizaram-se os trados de caneca (Figura 8a) e holandês (Figura 8c), e para a retirada de amostras indeformadas foi utilizado o amostrador de koppec (Figura 8b).

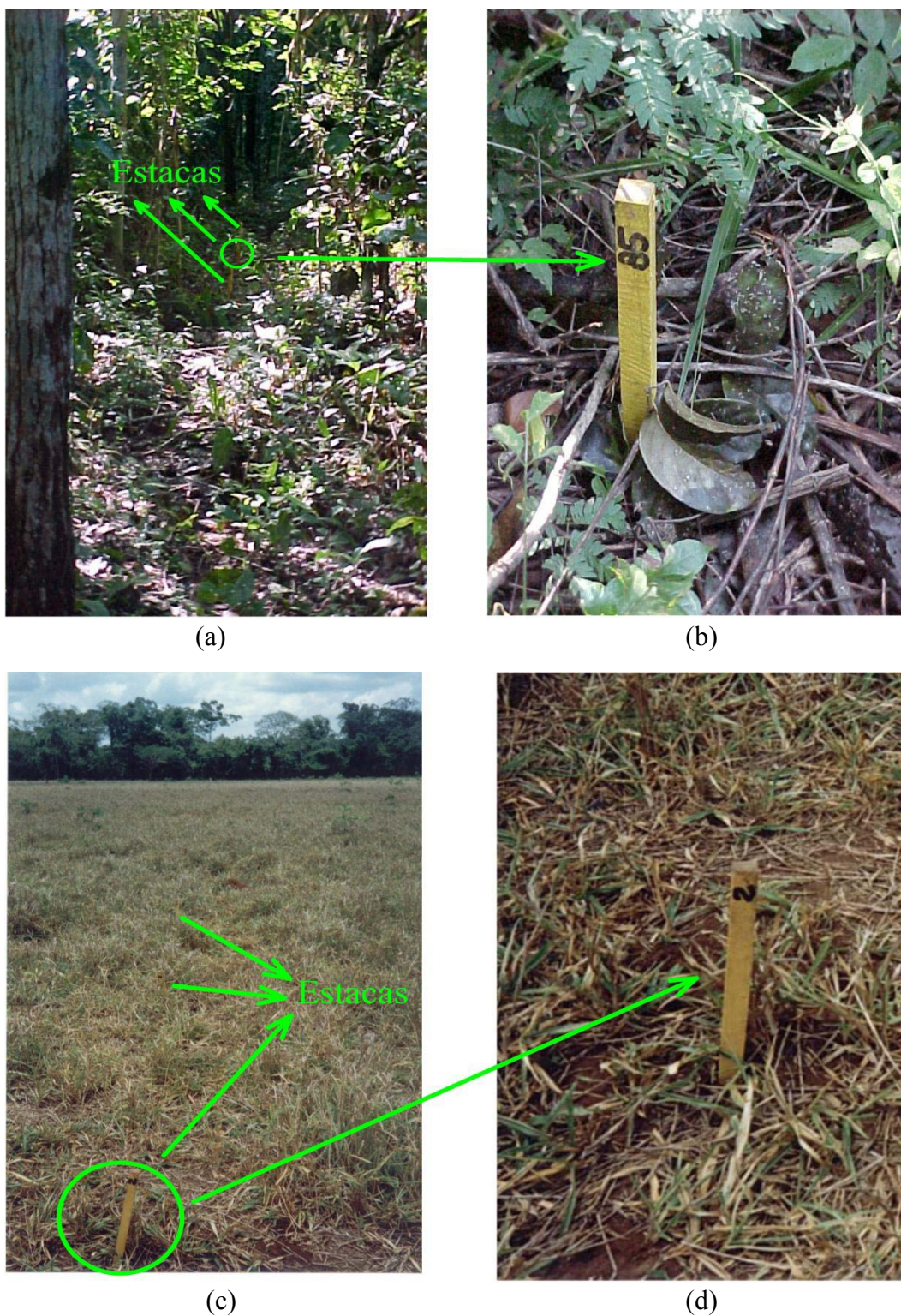


FIGURA 7 - Pontos e malha amostral demarcados nas área com mata (floresta tropical subcaducifólia) e na área com pastagem (*Brachairia brizantha* cv. Marandú). (a) pontos demarcados na área com mata; (b) estaca demarcando ponto amostral da área com mata; (c) pontos demarcados na área com pastagem; (d) estaca demarcando ponto amostral da área com pastagem.

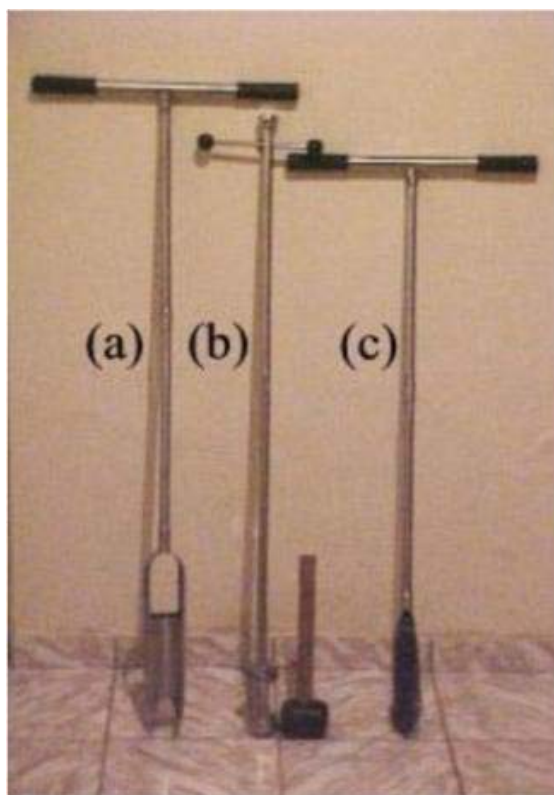


FIGURA 8 - Material utilizado para amostragem e caracterização dos solos. (a) trado de caneca; (b) amostrador de koppec; (c) trado holandês; (d) penetrógrafo eletrônico automático; e (e) anel de infiltração para determinação da curva de infiltração da água no solo.

Foi coletada uma amostra composta para cada área de estudo, da camada de 0-20 cm de profundidade, para determinação da curva de compactação do solo pela análise de Proctor Normal, conforme metodologia descrita na norma NBR 7182 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1986), e da densidade de partículas, pelo método do balão volumétrico, conforme metodologia descrita pela EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA (1997). As amostras compostas foram constituídas por 10 amostras simples, retiradas aleatoriamente em toda a extensão da área. O resultados destas determinações serviram para estabelecer os valores limites da densidade do solo e da porosidade total, que foram utilizados na análise quantitativa da degradação do solo sob pastagem.

Foram abertas duas trincheiras, localizadas em posição central de cada área de estudo, para a descrição completa do perfil do solo, conforme procedimentos descritos por LEMOS e SANTOS (1996). Próximo a cada trincheira, foi realizado um teste da curva de infiltração de água no solo (Figura 8e). Todas essas análises e determinações foram realizadas conforme procedimentos descritos pela EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA (1997).

As amostras deformadas de solo das malhas amostrais e dos perfis, foram analisadas pelo Laboratório Agroanálise localizado em Cuiabá/MT, e as amostras indeformadas, no Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade Federal de Mato Grosso. A determinação da curva de compactação, por meio da análise de Proctor Normal, foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso.

3.3. Procedimentos operacionais e estatísticos

Os procedimentos operacionais e estatísticos constaram de duas etapas, sendo uma para obtenção do diagnóstico qualitativo e outra para obtenção do diagnóstico quantitativo. Estes foram realizados após a obtenção dos resultados analíticos dos atributos do solo.

3.3.1. Diagnóstico qualitativo

O diagnóstico qualitativo constou da caracterização e análise qualitativas dos atributos do solo. Para isso, foram utilizados média, desvio-padrão, coeficiente de variação,

assimetria e curtose, e foram comparadas às médias dos valores dos atributos do solo da área com pastagem, com as médias dos valores dos atributos do solo da área com mata, pelo teste t-Student, em nível de 5% de probabilidade. Utilizou-se, para obtenção dos parâmetros estatísticos e realização do teste t, os programas MINITAB versão 13.0 (E-ACADEMY, 2000) e SPSS versão 10.0 (SPSS INC., 1999).

3.3.2. Diagnóstico quantitativo

Com os resultados obtidos da caracterização dos solos, foi realizada a sistematização das informações coletadas para posterior análise, utilizando-se técnicas da geoestatística, que permitiram analisar espacialmente o comportamento dos atributos do solo, obtendo-se como produto, o mapeamento da distribuição espacial de seus valores. Todos os procedimentos geoestatísticos, desde a variografia e posterior krigagem dos valores dos atributos, foram realizados com auxílio do programa GAMMA DESIGN versão 5.1.1 (GAMMA DESIGN, 2000), conforme procedimentos descritos por GUIMARÃES (2001). Os arquivos com os valores estimados dos atributos dos solos foram então exportados para o programa Surfer versão 7.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1999). Neste, foi realizado a conversão do formato de dados para se trabalhar no sistema de informação geográfica.

Para a confecção dos mapas da distribuição espacial dos atributos do solo, optou-se pela obtenção de imagens com alta resolução, com pixel de 0,5 metro, o que totalizou 40.000 pixels por arquivo imagem. Esta alta resolução foi utilizada com o objetivo de permitir maior precisão na análise quantitativa, aliado ao fato de que a área estabelecida para amostragem foi delimitada considerando-se o raio máximo de 0,25 m a partir de cada ponto da malha amostral.

Posteriormente, utilizando recursos de geoprocessamento do sistema de informação geográfica (SIG), foi possível analisar quantitativamente a degradação dos solos sob pastagem, comparativamente a área com mata, determinando-se o grau e a extensão das alterações ocorridas no solo sob pastagem, em comparação com a respectiva área com solo sob mata. A etapa de análise quantitativa por meio dos recursos de geoprocessamento dos SIGs, utilizando operações algébricas entre mapas (arquivo imagem), foi realizada com auxílio do programa IDRISI versão I32.11 (CLARK LABS, 2000).

Após as análises pelo SIG, foi realizada a exportação do arquivo imagem para o programa Surfer versão 7.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1999) para a confecção dos mapas finais.

3.3.2.1. Mapas da distribuição espacial dos atributos do solo

A obtenção dos mapas da distribuição espacial dos atributos do solo foi realizada por meio da análise espacial, utilizando técnicas da geoestatística. Estas permitiram identificar o padrão espacial de distribuição dos dados. Foram obtidos os mapas dos atributos: potencial hidrogeniônico (pH), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma por bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de bases trocáveis (V), matéria orgânica (MO), nitrogênio (N), relação carbono/nitrogênio (C/N), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), enxofre (S), zinco (Zn), densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RSP), condutividade hidráulica (Ks), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e grau de floclação (GF).

Inicialmente, foram realizados, para todos os atributos, as análises de tendência com os eixos x e y, por meio da análise de equações de regressões, até o nível quadrático e com todas as interações entre esses eixos. Para os atributos que não apresentaram tendência significativa em nível de 1% de probabilidade, foi realizada a análise geoestatística dos valores originais dos atributos. Da mesma forma, para os atributos que apresentaram tendência significativa, porém, apresentando parâmetros dentro dos critérios de seleção dos semivariogramas, também foi realizada a análise geoestatística dos valores originais. Nestes dois casos, obteve-se os mapas da distribuição espacial dos atributos do solo de forma direta.

Para os atributos que apresentaram tendência significativa e esta influenciou fortemente a variografia e a krigagem dos valores originais, optou-se por trabalhar com o resíduo da regressão na análise geoestatística. O resíduo foi obtido pela diferença entre os valores originais dos atributos e os estimados pela equação de regressão. Posteriormente, foi realizada a análise geoestatística do resíduo, sendo obtido o mapa da variabilidade espacial do resíduo. A seguir, para obtenção do mapa da distribuição espacial dos atributos do solo, foi adicionado ao mapa de resíduos a tendência da equação de regressão encontrada anteriormente. Desta forma, este procedimento foi realizado com o objetivo de se conseguir

modelos de semivariogramas com melhores ajustes e melhoria na obtenção dos mapas dos atributos do solo.

Para a realização das análises por meio da equação de regressão, foram utilizados os programas MINITAB versão 13.0 (E-ACADEMY, 2000) e SPSS versão 10.0 (SPSS INC, 1999).

A análise geoestatística foi realizada conforme procedimentos e técnicas descritas por ISAACS e SRIVASTAVA (1989) e WEBSTER e OLIVER (1990), por meio do semivariograma experimental, que permitiu avaliar a estrutura do padrão espacial de distribuição dos dados. Em caso positivo, indicou o modelo de distribuição dos mesmos (distribuição linear, esférica, exponencial gaussiana, etc.). O semivariograma estimou parâmetros importantes (efeito pepita, alcance da dependência espacial e patamar) para o programa interpolador, o qual, por sua vez, estimou valores para locais onde estes não foram determinados. Foi utilizada a interpolação por krigagem, onde cada valor representou a média ponderada dos valores observados na sua vizinhança, permitindo estimar valores para locais onde estes não foram determinados no campo de estudo, conforme descrito por VIEIRA et al (1983). Após a interpolação, como produto foi obtido o mapa da distribuição espacial dos atributos do solo, cuja representação foi uma imagem (raster) ou mapa da variabilidade espacial.

A escolha do método de interpolação por krigagem foi decorrência das seguintes vantagens: a) incorporar o modelo da variabilidade espacial dos dados, permitindo, assim, que os critérios de estimativa sejam baseados em condições estatísticas bem definidas, o que faz com que esta técnica seja mais eficiente em relação às outras técnicas de interpolação que adotaram critérios subjetivos (ROUHANI, 1996); e b) ser um interpolador estatístico sem tendência e com variância mínima (VIEIRA et al., 1983).

Para validação dos semivariogramas, foi utilizada a técnica da validação cruzada que forneceu valores dos coeficientes de determinação (R^2) entre os valores originais e os estimados pela krigagem. Com a finalidade de obter melhores resultados nesta técnica, optou-se pela eliminação de pontos amostrais que apresentassem resíduos padronizados inferiores a -2 ou superiores a 2, obtidos da regressão linear entre os valores observados e os estimados, o que possibilitou a identificação e exclusão das amostras com valores discrepantes, cujo resíduo estivesse fora do intervalo de confiança da média com 95% de probabilidade,

conforme procedimentos descritos por SGUAREZI (2002). Essa eliminação foi realizada até o ponto em que não se obtivesse mais pontos fora desse limite ou até o ponto em que se tivesse uma eliminação máxima de 30% dos pontos amostrais. Este procedimento somente foi possível em razão de se ter utilizado uma malha de amostragem com grande quantidade de pontos.

Para aceitação dos modelos ajustados de semivariograma e com a finalidade de obter resultados confiáveis de krigagem, utilizou-se como critérios: a) semivariograma que apresentasse R^2 igual ou maior que 0,5; e b) R^2 significativo na técnica da validação cruzada, em nível de 5% de probabilidade. Nos casos em que tanto a variografia dos valores originais dos atributos como a variografia do resíduo não forneceu parâmetros enquadrados dentro destes critérios, optou-se pela interpolação com inverso da distância (IDW). Ressalta-se que foi limitante a utilização deste processo de interpolação, porém, justificável em decorrência de que a metodologia necessitou dos mapas de cada atributo e pelo fato de se estar testando novas formas de estudo da degradação do solo.

3.3.2.2. Análise quantitativa

A análise quantitativa foi realizada conforme mostra o fluxograma apresentado na Figura 9. Esta permitiu o diagnóstico quantitativo de degradação dos solos, sendo feita com auxílio dos recursos de geoprocessamento do sistema de informação geográfica, e somente foi possível depois da obtenção dos mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo. Para isso, foi necessário exportar os arquivos com as estimativas dos valores dos atributos geradas no programa GAMMA DESIGN versão 5.1.1 (GAMMA DESIGN, 2000) para o programa SURFER versão 7.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1999), o qual fez a conversão dos arquivos imagens (mapas) que continham as informações sobre a distribuição espacial dos atributos, para um formato compatível com o programa IDRISI versão I32.11 (E-ACADEMY, 2000).

A partir dos mapas de variabilidade espacial dos atributos do solo, foram obtidos os mapas de perdas individuais, os quais representaram a proporção da diferença entre os valores dos atributos entre o solo sob mata e o solo sob pastagem, conforme mostra o Quadro 8. De acordo com este quadro, utilizando operações algébricas, realizou-se a subtração dos valores dos atributos do solo sob pastagem dos valores dos atributos do solo sob mata, para

posteriormente se calcular a porcentagem desta diferença em relação ao solo sob mata, encontrando os mapas de perdas individuais.

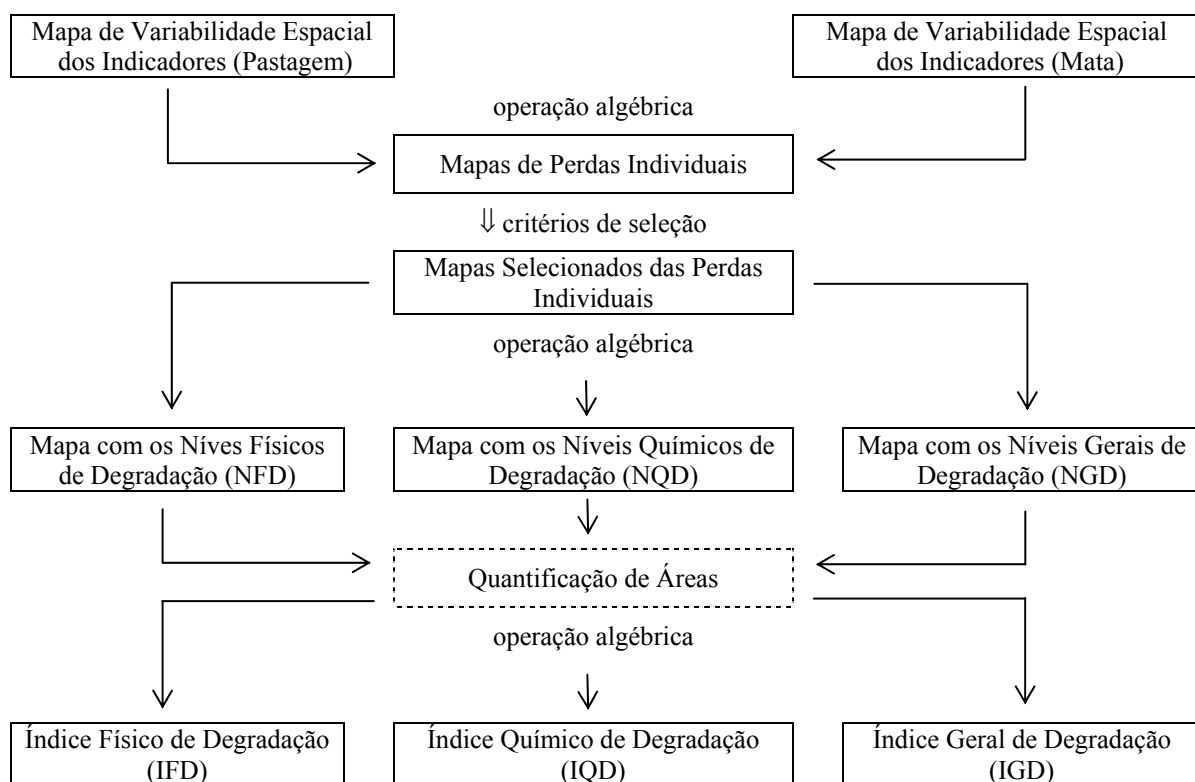


FIGURA 9 - Fluxograma de procedimentos e operações da análise quantitativa.

QUADRO 8 - Equações utilizadas nas operações algébricas para obtenção dos mapas de perdas individuais dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob pastagem.

Equação (operação algébrica)	Atributo do solo
$MPI = [100 \cdot (MVEIM - MVEIP)] / MVEIM$	pH, P, K, Ca, Mg, SB, CTC, V, MO, N, B, Cu, Fe, Mn, S, Zn, Ks, Mi, Ma e GF
$MPI = [100 \cdot (MVEIP - MVEIM)] / MVEIM$	C/N
$MPI = [100 \cdot (MVEIM - MVEIP)] / (MVEIM - VL)$	PT
$MPI = [100 \cdot (MVEIP - MVEIM)] / (VL - MVEIM)$	Ds e RSP

MPI - mapa de perdas individuais dos atributos do solo; MVEIM - mapa de variabilidade espacial dos atributos do solo sob mata; MVEIP - mapa de variabilidade espacial dos atributos do solo sob pastagem; VL - valor limite.

No caso dos atributos densidade do solo (Ds), porosidade total (PT) e resistência do solo à penetração (RSP), foi necessário estabelecer um valor que representasse o limite máximo ao qual fosse atribuída perda de 100%. Assim, foram adotados os seguintes procedimentos para obtenção dos valores limites para esses atributos:

a) para a Ds: foi realizada a análise do Proctor Normal, sendo estabelecido como seu valor limite, o valor correspondente ao ponto imediatamente anterior ao máximo da curva de compactação. O valor limite da densidade do solo determinado por este procedimento foi de 1,618 kg/dm³.

b) para a PT, uma vez estabelecido o valor limite da Ds, foi realizado a determinação da densidade de partículas (Dp), e a partir daí, seu valor limite foi estabelecido pela seguinte equação: $PT\% = [100 \cdot (Dp - Ds)] / Dp$ (KIEHL, 1979). O valor limite da PT determinado por este procedimento foi de 35,28%.

c) para a RSP foi estabelecido o valor limite de 2.500 kPa. Este foi superior ao valor crítico de 2000 kPa estabelecido pela pesquisa, segundo TORMENA (2002), como impeditivo ao crescimento de raízes e da parte aérea das plantas. Isto se justificou porque as pastagens são constituídas por espécies de plantas mais tolerantes à compactação e às condições adversas de solos para seu desenvolvimento.

A seguir, foi realizada a seleção dos mapas de perdas individuais, conforme mostra a Figura 9. Esta seleção foi necessária para se escolher os atributos que melhor representaram o conjunto daqueles estudados em termos da degradação. Para isto, foram selecionados os atributos que melhor se enquadraram nos seguintes critérios: a) atributos com melhor representatividade das condições físicas e, ou, químicas do solo; e b) atributos cujos mapas não apresentassem áreas com perdas negativas ou que as tivessem em pequena proporção. Desta forma, dos 24 atributos estudados, optou-se por selecionar os 10 que melhor se enquadraram nestes critérios, sendo selecionados 5 atributos químicos e 5 atributos físicos.

A próxima etapa foi agrupar as informações dos mapas de perdas individuais dos atributos selecionados em três mapas. Para tanto, foram utilizadas operações algébricas, conforme mostra o Quadro 9, que constou da média dos valores contidos nos mapas de perdas individuais selecionados. Foram, então, obtidos os mapas com os níveis físicos de degradação (NFD), níveis químicos de degradação (NQD) e níveis gerais de degradação (NGD), conforme mostra o fluxograma da Figura 9. O mapa com os níveis físicos de degradação foi obtido pela

média dos mapas de perdas individuais dos atributos físicos selecionados; o mapa com os níveis químicos de degradação, pela média dos mapas de perdas individuais dos atributos químicos selecionados; e o mapa com os níveis gerais de degradação, pela média dos mapas de perdas individuais dos atributos totais selecionados. Estes mapas mostraram a intensidade com que os valores dos indicadores da área com solo sob pastagem, estavam afastados dos valores dos indicadores da área com solo sob mata e, desta forma, estes representaram a tendência média das informações em termos de degradação física, química e geral, considerando as suas distribuições espaciais.

QUADRO 9 - Equações utilizadas nas operações algébricas para obtenção dos mapas com os níveis físicos (NFD), químicos (NQD) e gerais (NGD) de degradação do solo sob pastagem.

Equação (operação algébrica)	Mapa
$NFD = \Sigma MPIFS / n^{\circ} MPIFS$	NFD
$NQD = \Sigma MPIQS / n^{\circ} MPIQS$	NQD
$NGD = \Sigma MPIFQS / n^{\circ} MPIFQS$	NGD

MPIFS - mapas de perdas individuais dos atributos físicos selecionados; MPIQS - mapas de perdas dos individuais dos atributos químicos selecionados; MPIFQS - mapa de perdas individuais dos atributos físicos e químicos selecionados.

A partir dos mapas com os níveis de degradação (NFD, NQD e NGD), foi possível obter índices para representar o estado de degradação do solo sob pastagem em termos físicos, químicos e gerais, denominados Índice Físico de Degradação (IFD), Índice Químico de Degradação (IQD) e Índice Geral de Degradação (IGD), respectivamente, conforme mostra a Figura 9. Eles foram obtidos pela média ponderada dos níveis de degradação, onde o ponderador foi a extensão de área do respectivo nível, sendo para isto utilizado as operações algébricas contidas no Quadro 10.

QUADRO 10 - Equações utilizadas para obtenção dos índices físico (IFD), químico (IQD) e geral (IGD) de degradação do solo sob pastagem.

Equação (operação algébrica)	Índice de Degradação
$IFD = \sum(A_{NFD} \cdot V_{NFD}) / \sum A_{NFD}$	IFD
$IQD = \sum(A_{NQD} \cdot V_{NQD}) / \sum A_{NQD}$	IQD
$IGD = \sum(A_{NGD} \cdot V_{NGD}) / \sum A_{NGD}$	IGD

A_{NFD} , A_{NQD} e A_{NGD} - área com determinado nível físico, químico ou geral de gradação, respectivamente; V_{NFD} , V_{NQD} e V_{NGD} - valor do nível físico, químico e geral de degradação, respectivamente.

Os índices físico (IFD), químico (IQD) e geral (IGD) de degradação foram uma síntese do grau de degradação dos solos sob pastagem, uma vez que representaram o resumo da intensidade com que o conjunto dos valores dos indicadores das áreas com solo sob pastagem, estavam afastados dos valores dos indicadores do solo sob mata. Desta forma, foi possível estabelecer a intensidade de degradação dos solos sob pastagem.

Posteriormente foi realizada a classificação dos índices físico (IFD), químico (IQD) e geral (IGD), conforme a seguir:

- nulo: quando o valor do índice de degradação foi igual a zero;
- baixo: quando o índice de degradação foi superior a zero e igual ou inferior a 25%;
- moderadamente baixo: quando o valor do índice de degradação foi superior a 25% e igual ou inferior a 50%;
- moderadamente alto: quando o índice de degradação foi superior a 50% e igual ou inferior a 75%; e
- alto: quando o índice de degradação foi superior a 75% e igual ou inferior a 100%.

Resumindo-se os critérios descritos, tem-se:

$ID = 0 \rightarrow$ nulo

$0 < ID \leq 25\% \rightarrow$ baixo

$25\% < ID \leq 50\% \rightarrow$ moderadamente baixo

$50\% < ID \leq 75\% \rightarrow$ moderadamente alto

$75\% < ID \leq 100\% \rightarrow$ alto

Assim, foi possível estabelecer a intensidade de degradação do solo sob pastagem em relação ao solo sob mata.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Diagnóstico qualitativo da degradação do solo sob pastagem

Informa-se, inicialmente, que dois pontos da malha amostral da pastagem foram previamente eliminados, por terem apresentado valores extremamente discrepantes em relação ao restante. Também foram eliminados os respectivos pontos da malha amostral da mata, objetivando, inicialmente, se trabalhar na análise dos resultados com uma malha com mesmo número de pontos nas duas áreas selecionadas. Assim, tanto na análise com a estatística clássica, utilizando o teste t-Student, como na análise geoestatística, estes pontos não foram considerados, trabalhando-se, desta forma, com 119 pontos amostrais.

A maioria dos atributos apresentou distribuição de frequência com assimetria positiva, verificada pelo fato da mediana, nestes casos, apresentar valor menor que a média, mostrando assim, a tendência para concentração de valores menores que a média (Quadros 11 e 12). Porém, estas tendências para a maioria dos atributos foram, em geral, pequenas, uma vez que os valores das médias e das medianas foram próximos, com exceção do pH, P, K, Fe, Zn e Ks, que apresentaram distribuição de frequência com altos valores de assimetria positiva, mostrando uma forte tendência para concentração de valores menores que a média. Os atributos CTC, C/N, B, Ma, RSP e GF no solo sob mata, e os atributos CTC, Mg, Cu, S, Ma e PT no solo sob pastagem, apresentaram distribuição de frequência com assimetria negativa, mostrando que, nestes casos, houve tendência para concentração de valores maiores que a média, uma vez que a mediana foi maior que a média.

A maioria dos atributos apresentou distribuição de frequência leptocurtica, ou seja, com curtose maior que zero, o que denotou a tendência de maior homogeneidade dos dados, com maior concentração em torno da média. Somente os atributos CTC, C/N, B, Ma, RSP e GF no solo sob mata, e os atributos Mg, CTC, Cu, S, Ma e PT no solo sob pastagem, apresentaram distribuição de frequência planicúrtica, ou seja, com curtose menor que zero, denotando, nestes casos, a tendência desses atributos apresentarem maior variabilidade, uma vez que os valores encontrados foram mais distribuídos ao longo do eixo x no gráfico de distribuição de frequências. Ressalta-se que o programa MINITAB (E-ACADEMY, 2000), utilizado na realização da estatística descritiva, tem como padrão o valor zero para a

QUADRO 11 - Estatística descritiva dos resultados analíticos das amostras coletadas dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm), na área com solo sob mata.

Atrib.	Unidade	NA	Média	Min.	Max.	Ampl.	Mediana	Variância	Desvio	Erro	CV	Assim.	Curt.	TN
pH	-	119	6,95	6,10	8,10	2,00	6,90	0,1600	0,4000	0,0367	5,75	0,73	0,42	p>0,15
P	mg/dm ³	119	2,03	0,80	7,90	7,10	1,70	1,2892	1,1354	0,1041	55,95	3,07	11,46	p<0,01
K	mg/dm ³	119	184,87	56,00	900,00	844,00	144,00	17221,6000	131,2310	12,0299	70,98	2,72	8,97	p<0,01
Ca	cmol _c /dm ³	119	8,28	5,30	8,50	3,20	8,20	1,4507	1,4507	0,1330	17,51	0,44	0,33	p>0,15
Mg	cmol _c /dm ³	119	1,89	1,40	2,70	1,30	1,80	0,0686	0,2619	0,0240	13,87	1,02	1,48	p=0,031
SB	cmol _c /dm ³	119	10,65	8,00	14,60	6,60	10,70	2,0771	1,4412	0,1321	13,53	0,65	0,16	p=0,106
CTC	cmol _c /dm ³	119	12,41	9,70	15,10	5,40	12,50	1,6362	1,2791	0,1173	10,31	-0,01	-0,50	p>0,15
V	%	119	85,83	65,00	98,70	33,70	85,70	43,6851	6,6095	0,6059	7,70	-0,37	0,21	p>0,15
MO	g/kg	119	45,03	35,90	53,30	17,40	44,80	9,6021	3,0987	0,2841	6,88	-0,38	0,95	p>0,15
N	g/kg	119	1,91	1,30	2,70	1,40	1,90	0,0603	0,2456	0,0225	12,85	0,69	0,71	p>0,15
C/N	-	119	13,75	11,00	17,00	6,00	14,00	1,8342	1,3543	0,1241	9,85	0,03	-0,29	p>0,15
B	mg/dm ³	119	0,37	0,20	0,64	0,44	0,37	0,0103	0,1016	0,0093	27,28	0,61	-0,16	p=0,025
Cu	mg/dm ³	119	0,38	0,10	0,80	0,70	0,30	0,0266	0,1632	0,0150	43,16	0,69	0,16	p>0,15
Fe	mg/dm ³	119	16,92	11,00	47,00	36,00	16,00	23,8064	4,8792	0,4473	28,84	2,94	14,36	p<0,01
Mn	mg/dm ³	119	137,54	92,20	230,60	138,40	134,90	519,3020	22,7880	2,0890	16,57	1,15	2,91	p<0,01
S	mg/dm ³	119	6,85	4,40	11,30	6,90	6,80	1,8710	1,3678	0,1254	19,97	0,75	0,74	p>0,15
Zn	mg/dm ³	119	2,33	0,90	9,50	8,60	2,00	1,8119	1,3461	0,1234	57,79	2,65	9,14	p<0,01
Ds	kg/dm ³	119	1,20	0,92	1,35	0,43	1,20	0,0054	0,0731	0,0067	6,09	-0,54	0,94	p>0,15
RSP	kPa	119	547,09	247,04	814,04	567,00	556,02	9295,9800	96,4160	8,8384	17,62	-0,15	-0,03	p>0,15
Ks	mm/h	119	357,62	13,38	1737,70	1724,32	261,52	98177,5000	313,3330	28,7232	87,62	2,27	6,11	p<0,01
Ma	%	119	23,54	14,35	32,10	17,75	22,89	13,0413	3,6113	0,3310	15,34	-0,16	-0,24	p>0,15
Mi	%	119	26,40	15,14	34,62	19,48	26,55	4,8218	2,1959	0,2013	8,32	-1,03	6,82	p<0,01
PT	%	119	49,94	41,86	59,82	17,96	49,79	8,5158	2,9182	0,2675	5,84	0,02	0,68	p>0,15
GF	%	119	35,51	6,07	55,93	49,86	36,88	211,6040	14,5466	1,3335	40,97	-0,37	-1,04	p<0,01

Atrib. - atributo do solo; NA = número de amostras, Min. = mínimo; Max. = máximo; Ampl. = amplitude; Desvio = desvio-padrão; Erro = erro-padrão da média; CV = coeficiente de variação; Assim. = assimetria; Curt. = curtose; TN = resultado do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov.

QUADRO 12 – Estatística descritiva dos resultados analíticos das amostras coletadas dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm), na área com solo sob pastagem.

Atrib.	Unidade	NA	Média	Min.	Max.	Ampl.	Mediana	Variância	Desvio	Erro	CV	Assim.	Curt.	TN
pH	-	119	6,56	6,30	7,40	1,10	6,50	0,0326	0,1805	0,0166	2,75	2,17	7,17	p<0,01
P	mg/dm ³	119	0,98	0,30	9,40	9,10	0,80	1,1994	1,0952	0,1004	111,77	5,76	37,19	p<0,01
K	mg/dm ³	119	153,93	68,00	570,00	502,00	138,00	6990,4900	83,6090	7,6644	54,32	2,98	9,66	p<0,01
Ca	cmol/dm ³	119	7,71	5,60	12,10	6,50	7,60	1,1947	1,0930	0,1002	14,18	0,63	1,11	p=0,137
Mg	cmol/dm ³	119	1,42	1,20	1,80	0,60	1,40	0,0281	0,1676	0,0154	11,84	0,47	-0,69	p=0,079
SB	cmol/dm ³	119	9,52	7,00	14,30	7,30	9,30	1,6067	1,2676	0,1162	13,31	0,56	0,60	p=0,131
CTC	cmol/dm ³	119	12,30	9,70	15,50	5,80	12,10	1,5763	1,2555	0,1151	10,21	0,35	-0,49	p=0,048
V	%	119	77,28	67,90	92,00	24,10	77,00	16,4317	4,0536	0,3716	5,25	0,81	2,41	p=0,027
MO	g/kg	119	45,09	36,90	53,30	16,40	44,80	6,5450	2,5583	0,2345	5,67	-0,24	1,17	p>0,15
N	g/kg	119	1,82	1,30	2,30	1,00	1,80	0,0343	0,1852	0,0170	10,19	0,02	0,09	p>0,15
C/N	-	119	14,45	12,00	19,00	7,00	14,00	1,6050	1,2669	0,1161	8,77	0,79	0,79	p>0,15
B	mg/dm ³	119	0,29	0,16	0,58	0,42	0,27	0,0052	0,0723	0,0066	25,26	1,54	4,73	p<0,01
Cu	mg/dm ³	119	0,49	0,20	0,90	0,70	0,50	0,0274	0,1656	0,0152	33,46	0,45	-0,31	p>0,15
Fe	mg/dm ³	119	36,87	20,00	74,00	54,00	34,00	115,7440	10,7585	0,9862	29,18	1,46	2,53	p<0,01
Mn	mg/dm ³	119	104,48	62,50	197,90	135,40	105,20	355,0590	18,8430	1,7273	18,04	0,70	4,20	p=0,061
S	mg/dm ³	119	6,65	4,00	10,00	6,00	6,50	1,5401	1,2410	0,1138	18,67	0,40	-0,11	p>0,15
Zn	mg/dm ³	119	1,87	0,80	5,30	4,50	1,80	0,4645	0,6816	0,0625	36,39	1,69	5,28	p=0,027
Ds	kg/dm ³	119	1,47	1,33	1,55	0,22	1,48	0,0016	0,0393	0,0036	2,67	-0,95	1,69	p>0,15
RSP	kPa	119	2105,19	1601,13	2875,68	1274,55	2098,05	57360,2000	239,5000	21,9549	11,38	0,66	1,06	p=0,029
Ks	mm/h	119	9,78	0,00	207,67	207,67	4,22	488,5360	22,1028	2,0262	226,10	6,75	56,11	p<0,01
Ma	%	119	8,14	4,29	12,57	8,28	7,88	2,8720	1,6947	0,1554	20,82	2,87	-0,01	p=0,05
Mi	%	119	31,06	28,16	36,53	8,37	30,61	3,3736	1,8367	0,1684	5,91	1,29	1,47	p<0,01
PT	%	119	39,20	35,99	43,36	7,37	39,01	2,5791	1,6059	0,1472	4,10	0,43	-0,21	p=0,095
GF	%	119	44,72	25,97	54,76	28,79	45,53	30,2723	5,5020	0,5044	12,30	-0,88	0,53	p<0,01

Atrib. - atributo do solo; NA = número de amostras; Min. = mínimo; Max. = máximo; Ampl. = amplitude; Desvio = desvio-padrão; Erro = erro-padrão da média; CV = coeficiente de variação; Assim. = assimetria; Curt. = curtose; TN = resultado do teste de normalidade de Kolmogorv-Smorniv.

curtose. Assim, se a distribuição de frequência teve curtose com valor igual a zero, foi mesocúrtica, se o valor foi negativo, foi planicúrtica e se o valor foi positivo, foi leptocúrtica.

Desta forma, no presente estudo houve grande variação na distribuição de frequência dos atributos do solo, concordando com os resultados encontrados por VIEIRA et al. (1992), que encontraram valores de assimetria entre $-1,3370$ a $2,3880$, e de curtose entre $0,794$ a $9,032$, mostrando a grande variação na distribuição de frequência das variáveis.

Com a finalidade de se verificar a aceitação ou não da distribuição normal dos valores dos atributos do solo, realizou-se o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, cujos resultados encontram-se nos Quadros 11 e 12. Os resultados mostram que, tanto na área com solo sob mata como na área com solo sob pastagem, aproximadamente 50% dos atributos apresentaram distribuição normal. Para os atributos que apresentaram distribuição de frequência com pequenos desvios da assimetria e da curtose em relação à distribuição normal, o teste de normalidade acusou a aceitação desta. Porém, nos casos onde distribuição de frequência teve assimetria e a curtose com grande desvio em relação à distribuição normal, o teste de normalidade acusou a não-aceitação desta. Estes comportamentos são caracterizados nos histogramas contidos nas Figuras 10 a 15.

Analisando e comparando-se os histogramas dos mesmos atributos nas duas áreas, foram observadas pequenas alterações nos valores da assimetria e da curtose, sendo que a distribuição de frequências praticamente não foi modificada. Isto pode ser observado pelo resultado do teste de normalidade realizado, em que os resultados foram os mesmos, tanto para distribuição normal como para distribuição não-normal, com exceção somente do pH, Mg, CTC, V, Mn e RSP (Quadros 11 e 12), que modificaram significativamente suas distribuições de frequência. Assim, a análise dos dados demonstra que não houve grandes modificações da distribuição de frequências quando se considera o conjunto dos atributos estudados. Por outro lado, apesar de não terem ocorrido alterações significativas nas distribuições de frequências dos valores para a maioria dos atributos, as alterações dos valores de curtose e de assimetria mostram que houve homogeneização, como no caso do C/N, B, Cu e GF; aumento da variabilidade, como no caso do Mg, S, PT e RSP; concentração de valores abaixo da média, como no caso da CTC, V, Ma e Mi; e concentração de valores acima da média, como no caso da RSP. Estas modificações podem ser observadas comparando-se os valores de curtose e de

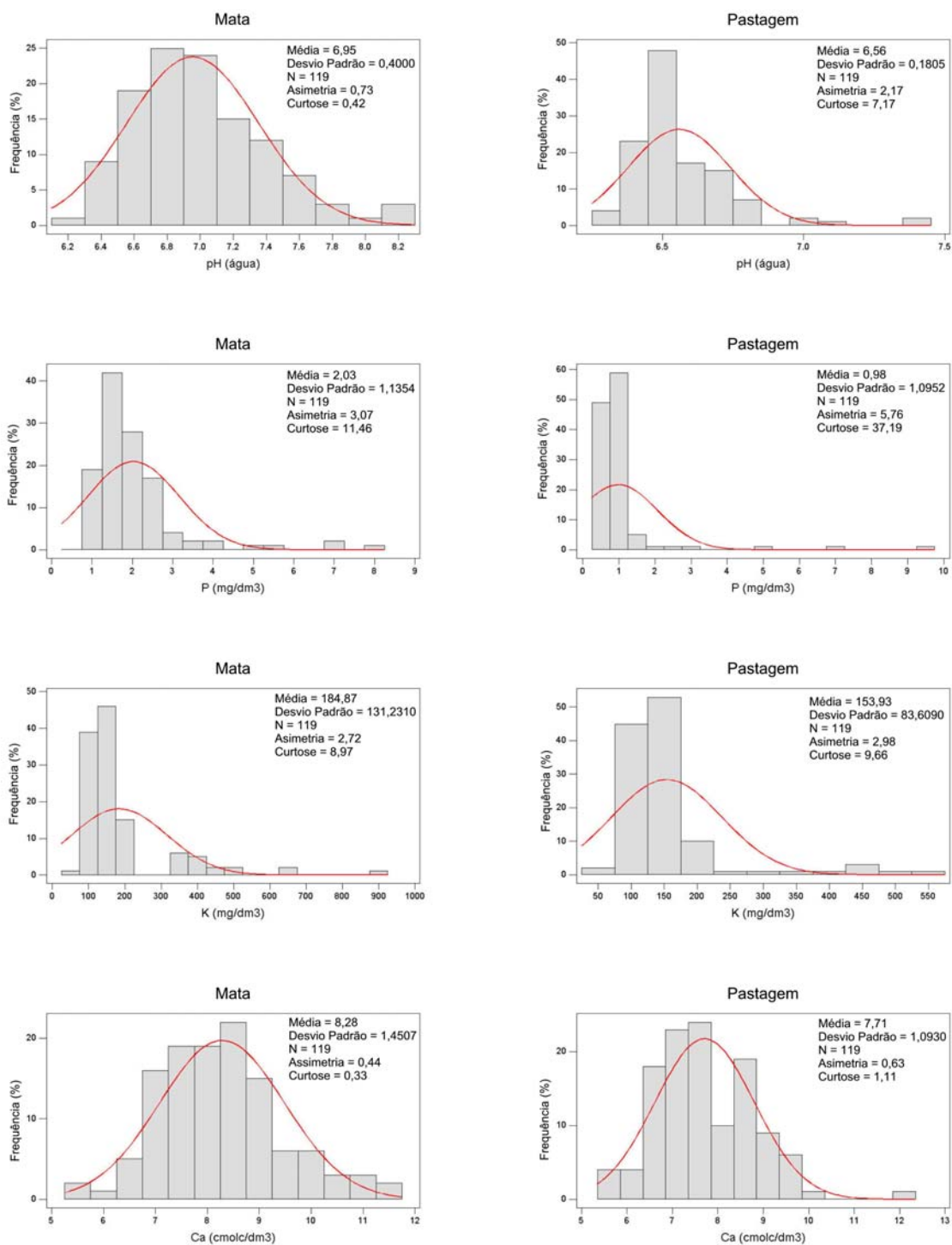


FIGURA 10 - Histogramas de frequências dos atributos pH, P, K e Ca da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

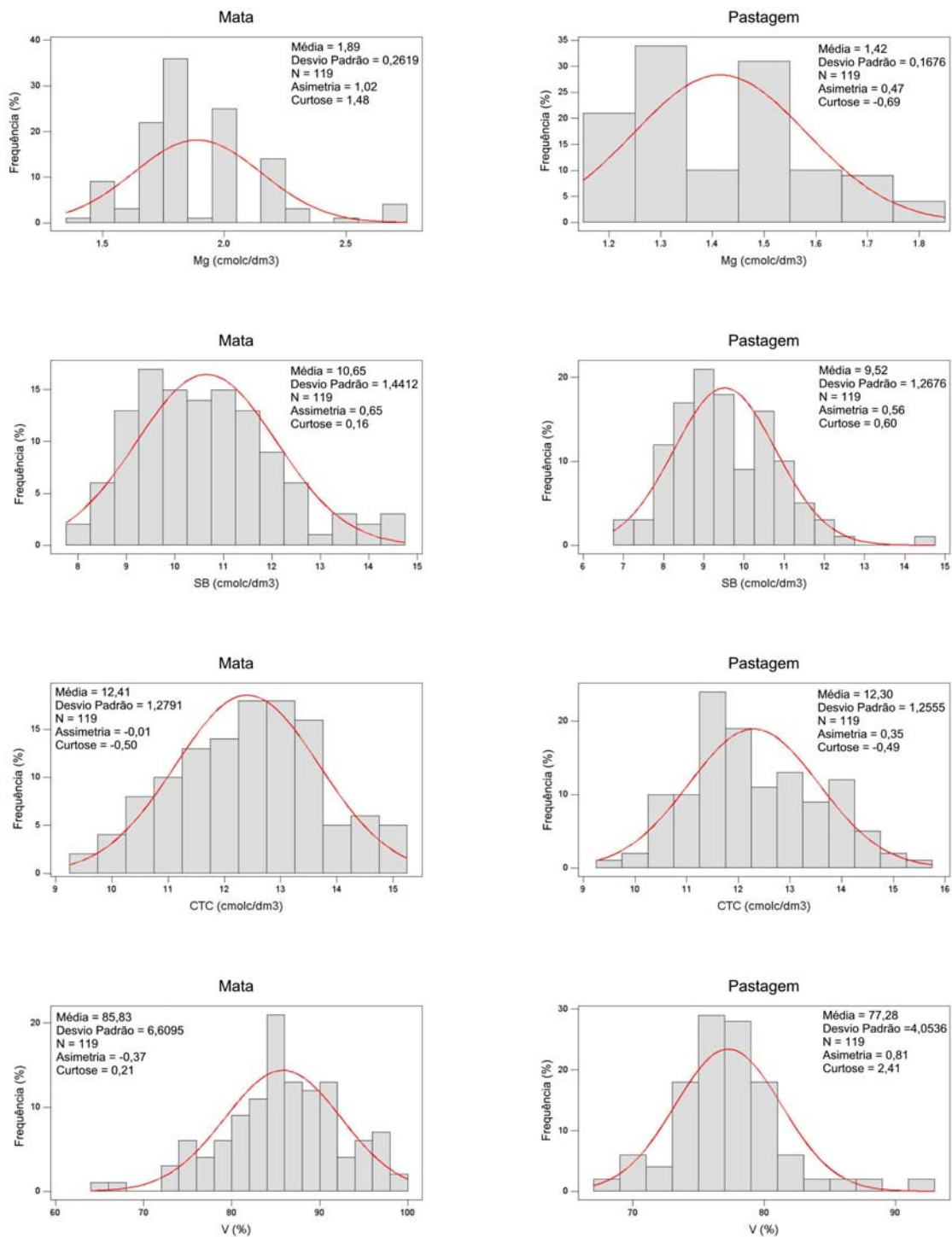


FIGURA 11 - Histogramas de frequências dos atributos Mg, SB, CTC e V da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

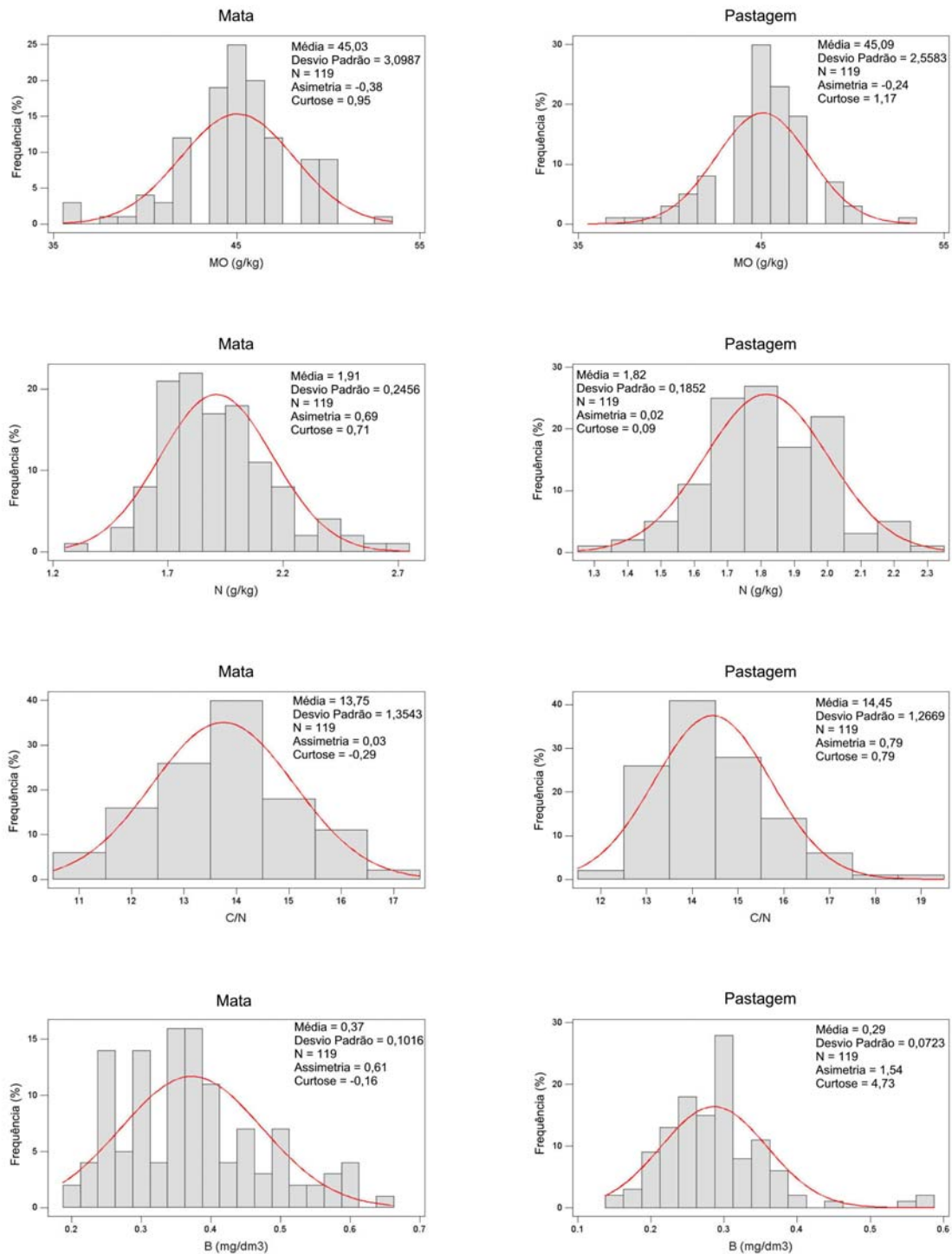


FIGURA 12 - Histogramas de frequências dos atributos MO, N, C/N e B da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

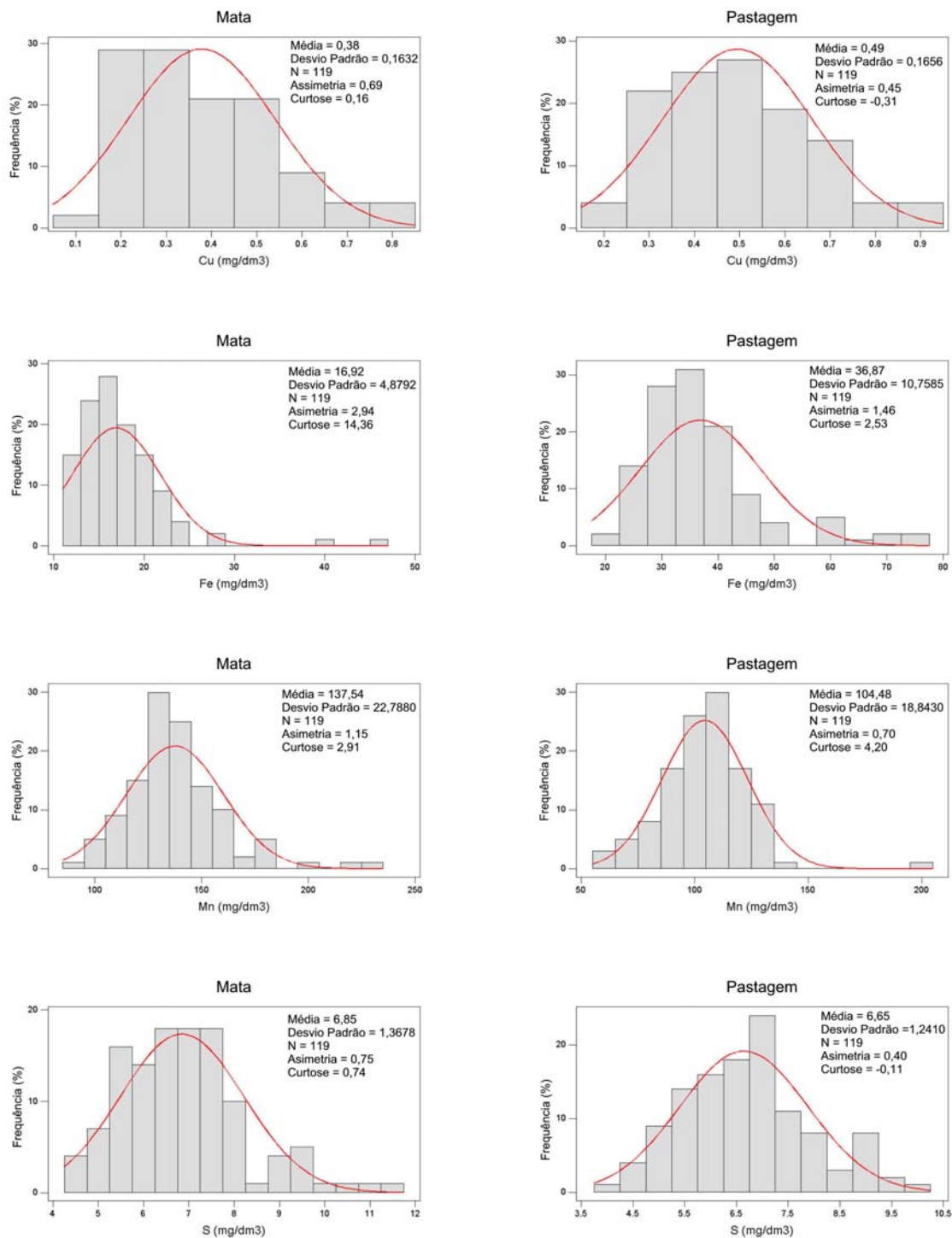


FIGURA 13 - Histogramas de freqüências dos atributos Cu, Fe, Mn e S da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

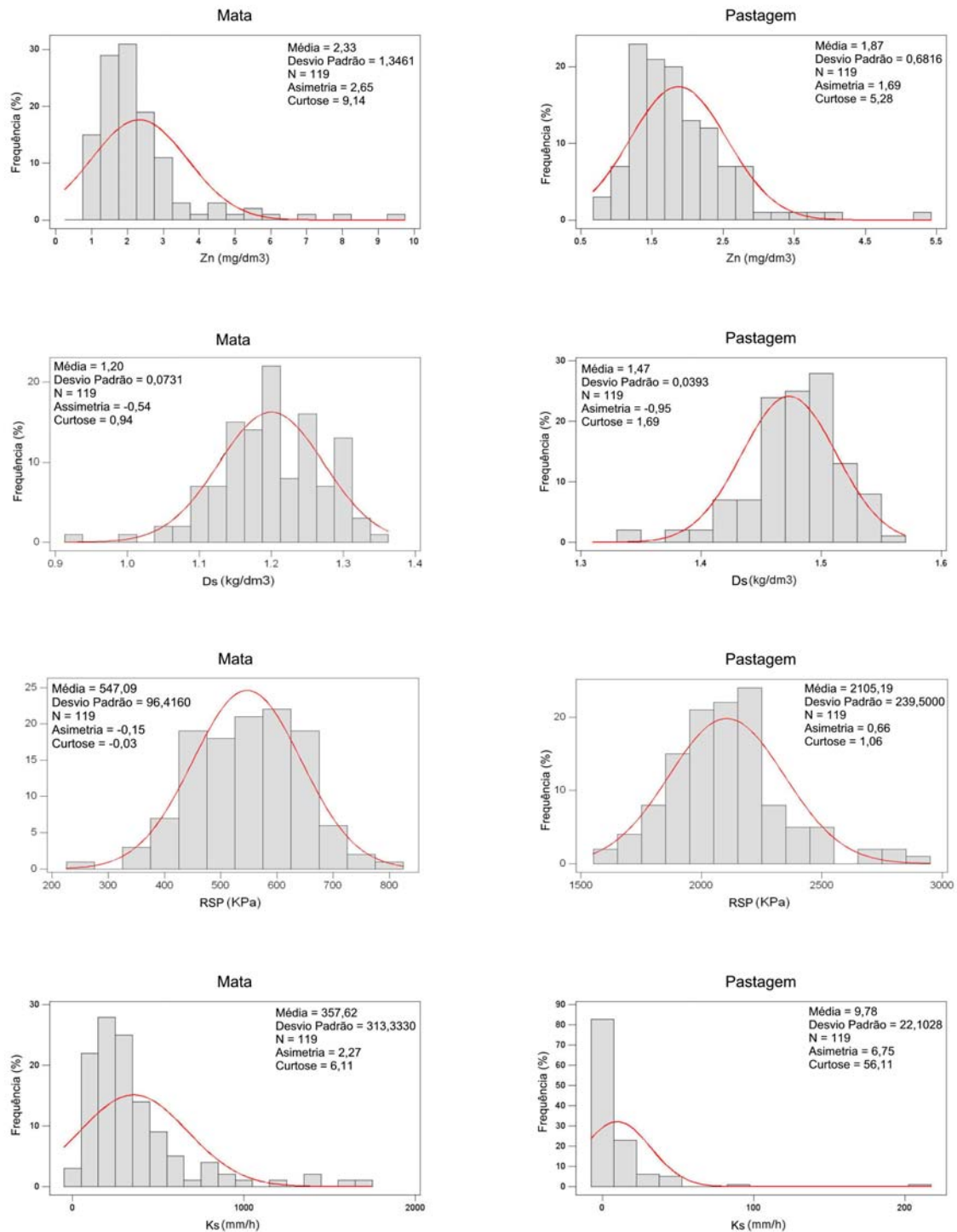


FIGURA 14 - Histogramas de frequências dos atributos Zn da camada de 0-20 cm e Ds, RSP e Ks da camada de 5-10 cm, do solo sob mata e do solo sob pastagem.

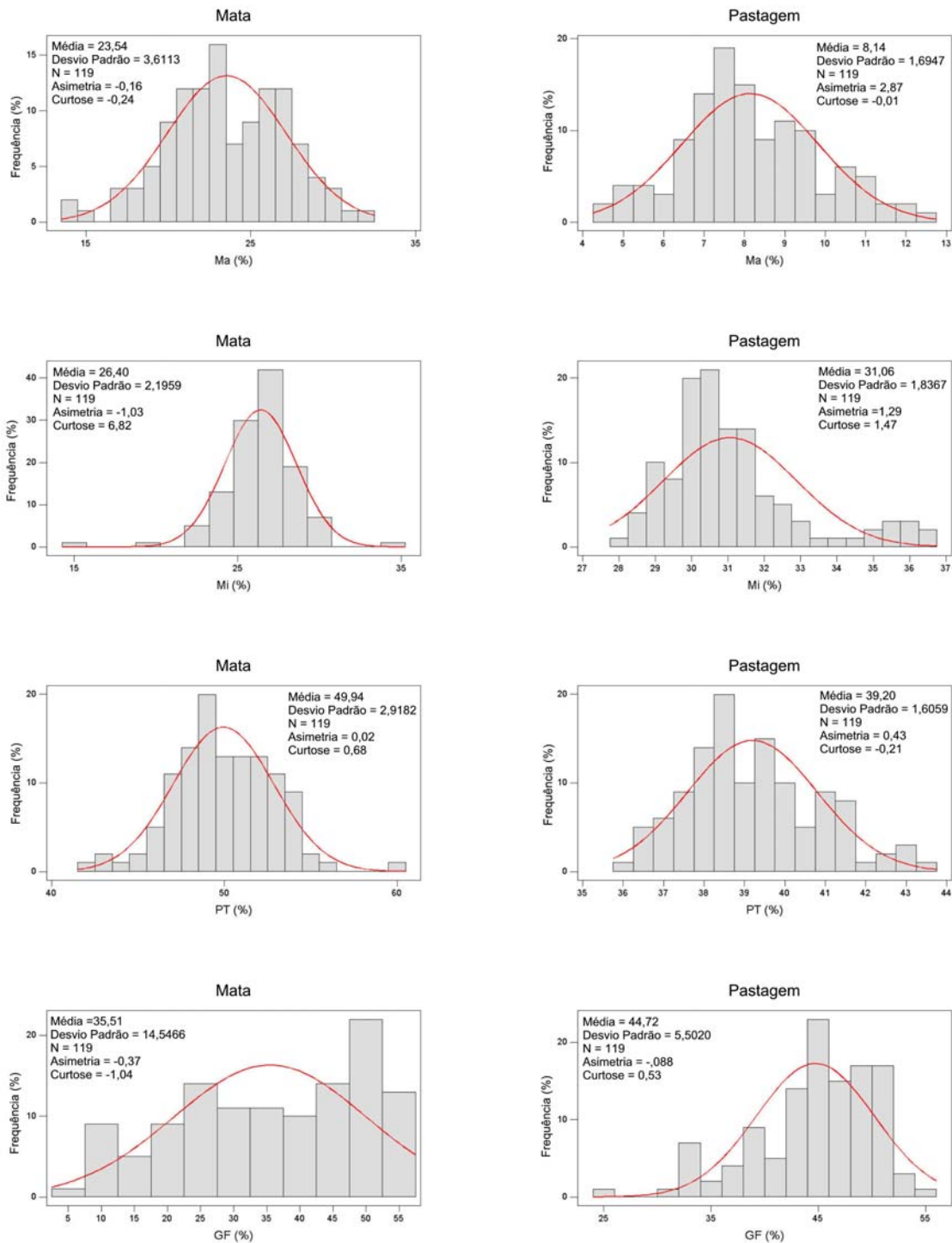


FIGURA 15 - Histogramas de frequências dos atributos Ma, Mi, PT e GF da camada de 5-10 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

assimetria das distribuições de freqüência destes atributos do solo sob mata com o solo sob pastagem, mostradas nos Quadros 11 e 12.

Alguns atributos apesar de apresentarem, no solo sob pastagem, valores das médias inferiores, apresentaram mínimos e máximos superiores na área com solo sob mata, como no caso do pH, K, Ca, V e MO. O mesmo ocorreu com a amplitude, no caso do Ca, CTC e P, que foram maiores que na área com solo sob mata. Isto mostra, inicialmente que, nestes casos, a utilização da média mascara os sítios com valores relativamente altos na área com pastagem. Desta forma, apesar da utilização da média ser um procedimento clássico de análise, deixa de mostrar informações importantes, quando se deseja analisar detalhadamente o comportamento dos atributos. Isto se deve ao fato de que a média é uma medida de posição que representa o conjunto de dados dos valores de determinado atributo, e é tanto menos representativa quanto maior for a variação em torno dela, medido pelo coeficiente de variação.

Com base nos resultados estatísticos dos Quadros 11 e 12, pode-se verificar que na área com mata, os coeficientes de variação dos atributos foram quase sempre superiores em relação à área com pastagem, com exceção do Fe, Ks, Ma e P. Pode-se afirmar, desta forma, que as médias na pastagem representam melhor o conjunto de dados do que na mata. Isto também demonstra, na área com pastagem, a maior tendência à homogeneização dos dados em torno da média. Este fato poderia ser devido a utilização da área durante os anos, em que se tem sob o solo uma única espécie vegetal, imprimindo desta forma, uma exploração mais homogênea nas camadas mais superficiais, ou seja, uma única forma de reciclagem de elementos ao longo dos anos.

A análise dos coeficientes de variação mostra que estes apresentaram grande amplitude para o presente estudo, com valor mínimo encontrado de 2,67% para a Ds e de 226,10% para o Ks, ambos na área com pastagem. Cerca de 32% dos atributos apresentaram valores de coeficiente de variação entre 0 e 10%; 36% entre 10 e 20%; 10% entre 20 e 30%; 2% entre 30 e 40%; 6% entre 40 e 50%; 6% entre 50 e 60%; 2% entre 70 e 80%; 2% entre 80 e 90%; 2% entre 110 e 120%; e 2% entre 220 e 230%. Desta forma, 78% dos atributos apresentaram coeficiente de variação máximo de 30% e somente 14% apresentaram coeficientes de variação superior a 50%. Isto mostra que, em geral, a dispersão de valores em torno da média foi relativamente baixa.

Os valores dos coeficientes de variação relativamente altos, foram encontrados por diversos estudos (VIEIRA et al., 1992; TSEGAYE e HILL, 1998a; TSEGAYE e HILL, 1998b; CASTRIGNANO et al., 2000; MOUSTAFA, 2000), sendo que para os atributos diretamente relacionados ao fluxo de água no solo, como a condutividade hidráulica, os coeficientes foram elevados, com valores superiores a 100%, chegando algumas vezes a 231%. TSEGAYE e HILL (1998a) afirmam que diversos estudos têm mostrado que a K_s é um dos atributos que maior coeficiente de variação tem apresentado e que esta variação seria função da macroporosidade, distribuição de partículas e da D_s . LIMA e SILANS (1999), encontraram valor do coeficiente de variação de 41,23% para a condutividade hidráulica e atribuíra-no às variáveis relacionadas à dinâmica da água, devido a existência de infiltrações preferenciais em macroporos ou ao longo das raízes.

No presente estudo, a existência de infiltrações preferenciais pôde ser evidenciada em duas amostras analisadas do solo sob pastagem e em cinco amostras do solo sob mata. Na pastagem, as duas amostras apresentaram valores bem mais elevados em relação a média (9,78 mm/h), ou seja, valores de 91,51 e 207,67 mm/h, e na mata, as cinco amostras apresentaram valores de 1.008,41, 1.228,74, 1.386,08, 1.427,26 e 1.624,36 mm/h, ou seja, bem mais elevado que a média (357,62 mm/h). A maior quantidade de amostras com valores elevados da K_s em relação à média, na área com solo sob mata, deveu-se ao fato de que neste ambiente existiu maior quantidade de raízes. Acredita-se que além dos fatores expostos responsáveis pelo maior coeficiente de variação da K_s , a orientação geométrica e a conectividade dos poros presentes nas amostras tenham contribuído neste sentido. Desta forma, o K_s foi o atributo que apresentou mais alto coeficiente de variação.

A D_s foi o atributo com menor coeficiente de variação, o que está de acordo com WARRICK e NIELSEN (1980), que apontam que esta é considerada a propriedade física que menor variação tem apresentado. UTSET et al. (2000) e UTSET e CID (2001), encontraram coeficientes de variação da D_s entre 7,16 e 12,64%, sendo, desta forma, ainda considerados relativamente baixos. Já CASTRIGNANO et al. (2000) encontraram menor coeficiente de variação para o pH. Segundo DAVIS et al. (1995), o menor coeficiente de variação encontrado para o pH é devido ser este uma função logarítmica e, assim, apresenta naturalmente pequena variação.

Com a finalidade de se comparar as médias dos valores dos atributos do solo sob mata com os do solo sob pastagem, realizou-se o teste t-Student, cujo resultado encontra-se no Quadro 13. Ressalta-se que para este teste existe a pressuposição de distribuição normal das variáveis. Porém, nenhum erro grave estaria sendo introduzido pela não-normalidade dos dados. De qualquer forma, foi realizado teste não-paramétrico para os atributos que não apresentaram distribuição normal e os resultados foram similares aos encontrados no teste t. Desta forma, optou-se por apresentar os resultados deste último, uma vez que as violações não foram drásticas e os resultados finais não foram alterados.

QUADRO 13 – Médias dos valores dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob mata e do solo sob pastagem.

Atributo	Unidade	Média*	
		Mata	Pastagem
pH	-	6,95 a	6,56 b
P	mg/dm ³	2,03 a	0,98 b
K	mg/dm ³	184,87 a	153,93 b
Ca	cmol _c /dm ³	8,28 a	7,71 b
Mg	cmol _c /dm ³	1,89 a	1,42 b
SB	cmol _c /dm ³	10,65 a	9,52 b
CTC	cmol _c /dm ³	12,41 a	12,30 a
V	%	85,83 a	77,28 b
MO	g/kg	45,03 a	45,09 a
N	g/kg	1,91 a	1,82 b
C/N	-	13,75 a	14,45 b
B	mg/dm ³	0,37 a	0,29 b
Cu	mg/dm ³	0,38 a	0,49 b
Fe	mg/dm ³	16,92 a	36,87 b
Mn	mg/dm ³	137,54 a	104,48 b
S	mg/dm ³	6,85 a	6,65 a
Zn	mg/dm ³	2,33 a	1,87 b
Ds	kg/dm ³	1,20 a	1,47 b
RSP	kPa	547,09 a	2105,19 b
Ks	mm/h	357,62 a	9,78 b
Ma	%	23,54 a	8,14 b
Mi	%	26,40 a	31,06 b
PT	%	49,94 a	39,20 b
GF	%	35,51 a	44,72 b

* Médias seguidas da mesma letra na mesma linha, não diferem significativamente entre si pelo teste t, em nível de 5% de probabilidade.

Conforme mostra o Quadro 13, houve diferença significativa entre os valores das médias do solo sob mata e do solo sob pastagem para quase todos os atributos, exceto para a CTC, MO e S. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por CORREA e REICHARDT (1995), MORAES et al. (1996) e SELVA et al. (2003), uma vez que também não encontraram diferença significativa entre o teor de matéria orgânica do solo sob pastagem com o solo sob floresta. Daí, pode-se concluir que não é raro encontrar áreas com solo sob pastagem com teor similar de carbono orgânico ao solo sob mata, chegando algumas vezes a ser superior, como nos estudos realizados por MORAES et al. (1996).

As médias dos atributos químicos do solo sob mata foram superiores aos do solo sob pastagem, com exceção do Cu, Fe e GF. Tanto o Fe como o GF apresentaram valores maiores no solo sob pastagem, em razão do maior teor de ferro total, confirmado pelos resultados analíticos das amostras coletadas dos perfis dos solos em estudo.

Os resultados mostram que a utilização da área com pastagem reduziu os teores de fósforo, nitrogênio, bases trocáveis e alguns micronutrientes (B, Mn, S e Zn) no solo em relação à área com mata, em razão da exportação de nutrientes, estando de acordo com os resultados encontrados por CORREA e REICHARDT (1995) e SOUZA e ALVES (2003). Segundo os primeiros autores, com o tempo de pastejo há uma redução nos teores de bases trocáveis. Porém, ressalta-se que na área com pastagem, com exceção do fósforo, apesar de valores inferiores ao da mata, as propriedades químicas do solo apresentaram valores superiores aos níveis críticos para os macronutrientes, conforme VILELA et al. (2000), e aos micronutrientes, conforme NEVES (1996). Por outro lado, DIAS-FILHO (1998) apresentou resultados de diversos estudos que mostraram que em áreas com pastagem o pH, a SB, a CTC efetiva e a V% da camada superficial do solo permaneceram elevados, sugerindo que, sendo evitado a erosão mais intensa por meio do manejo adequado da pastagem, as perdas de cátions são mínimas.

Desta forma, no presente caso, a grande quantidade de cátions no solo e suas boas condições químicas foram devidas ao tipo de solo em estudo, que se apresentou muito fértil, em razão da riqueza do material de origem e, mesmo a sua utilização ao longo de muitos anos seguidos sem a reposição de nutrientes, ainda se encontrava com altos valores de elementos nutrientes.

Segundo BODDEY et al. (1998), a exportação de nutrientes em áreas com pastagem é baixa, sendo que 80 a 90% dos nutrientes consumidos pelos animais são devolvidos na forma de fezes e urina. Esses autores estimam que para uma produção de 300 kg/ha.ano de peso vivo, o solo perderia 7,5 kg de N, 2,4 kg de P e 0,6 kg de K, considerando-se que a carne contém cerca de 2,5% de N, 0,8% de de P e 0,2% de K. SERRÃO e TOLEDO (1990) comentam que os resultados, baseados em vários estudos, mostram que a exportação de nutrientes em pastagem é pequena, sendo mais limitada a produção de leite e carne. Desta forma, os resultados encontrados estão de acordo com os apontamentos desses autores, pois, apesar da diferença significativa entre os valores dos atributos químicos do solo sob mata em relação ao solo sob pastagem, os resultados sugerem que a exportação de nutrientes foi mínima, evidenciada pela pequena diferença entre os valores do solo sob mata e o solo sob pastagem.

O fósforo, em ambas as áreas, apresentou nível crítico muito baixo (VILELA et al., 2000). Resultados similares foram encontrados por CORREA e REICHARDT (1995), que concluíram que a baixa disponibilidade de fósforo no solo sob pastagem foi a mais relevante limitação química no seu desenvolvimento. TIESEN et al. (1994), NOVAIS et al. (1996) e LOPES (1998), comentam que em áreas tropicais, na maioria dos casos, os solos são pobres e deficientes em fósforo disponível para as plantas, fazendo com que a deficiência de fósforo seja a mais limitante para a produção das plantas. Para SARAIVA e CARVALHO (1991), CARVALHO et al. (1994), DIAS-FILHO (1998) e VILELA et al. (2000), o fósforo é um dos fatores que mais limitam o estabelecimento das forrageiras, o que tem justificado sua alta resposta à aplicação de fertilizantes fosfatados, mais que qualquer outro nutriente, sugerindo que sua disponibilidade seria o principal fator de limitação para a produtividade da pastagem.

Assim, no presente caso, apesar da alta fertilidade do solo, a elevação dos níveis de fósforo com certeza aumenta a produção da pastagem e, com isso, é esperado que seus efeitos sejam benéficos, aumentando a produtividade e, a partir daí, permitindo melhor cobertura do solo, o que contribui para a melhoria das condições do solo, gerando como consequência, menor degradação física. Isso representa um desafio, uma vez que a manutenção dos níveis de fósforo no solo imprime custos relativamente altos para os pecuaristas. Ressalta-se que apesar do nível de fósforo no solo ter sido muito baixo, houve exportação significativa, sendo que o solo sob mata apresentou 2,03 mg/dm³ e o solo sob pastagem, 0,98 mg/dm³. Esta diferença

representa uma exportação de 3,09 kg/ha, sugerindo que foi baixa, o que está de acordo com diversos estudos (SERRÃO e TOLEDO, 1990; BODDEY et al., 1998).

DIAS-FILHO (1998) estimou que quantidades relativamente baixas de fósforo foram exportadas para a produção de carne. Esse autor estimou que com uma capacidade de suporte de 0,8 UA/ha, com peso vivo de 450 kg sob pastagem de *Brachiaria brizantha* com média produtividade, a quantidade de fósforo para a produção de carne foi de aproximadamente 2,5kg/ha.ano. A diferença entre a exportação e o consumido pelos animais faz parte da reciclagem de elementos, devido ao retorno no solo pelas fezes e urina. Porém, a eficiência dessa reciclagem pode ser grandemente questionada, em razão das fezes e urina serem distribuídas de forma não-uniforme na pastagem, mas sim depositadas em grande parte em áreas específicas, em geral, próximas a cochos, bebedouros ou sombras. Considerando-se que esses locais são os mais freqüentados pelos animais, onde existe grande intensidade de pisoteio, é de se esperar que a compactação seja maior, o que imprime menor taxa de infiltração, e assim, suas perdas por erosão sejam maiores, uma vez que é um elemento pouco móvel no solo e se perde facilmente por esse processo. Essa perda é intensificada pelo aumento da compactação em toda a área, devido ao pisoteio do gado e degradação das condições físicas do solo.

A relação C/N no solo sob pastagem foi mais alta que no solo sob mata (Quadro 13). Resultados similares foram encontrados por MORAES et al. (1996), os quais encontraram uma relação C/N entre 12 e 16 para pastagem com tempo de uso de 20 anos. Eles atribuíram o aumento dessa relação ao acúmulo relativo de carbono no solo sob pastagem em relação ao solo sob mata. Por outro lado, o aumento da relação C/N poderia ser devido ao menor teor de N no solo sob pastagem, o que está de acordo com os resultados encontrados por SELVA et al. (2003). Esses autores atribuíram o menor teor de N no solo sob pastagem em relação à mata nativa, devido a queima da cobertura vegetal e posterior lixiviação e erosão. Para BODDEY et al. (1998), o aumento da relação C/N na pastagem faz com que a massa microbiana do solo seja competidora com a pastagem pelo N mineral disponível, uma vez que a pastagem deposita material orgânico rico em carbono e pobre em N, o que poderia ser um fator limitante a produtividade da pastagem.

Já para os atributos físicos do solo, as médias do solo sob mata foram inferiores ao do solo sob pastagem, como no caso da densidade, microporosidade e resistência à penetração, e

foram superiores, como no caso da porosidade total, macroporosidade e condutividade hidráulica, conforme mostra o Quadro 13. Estes resultados estão de acordo com os encontrados nos estudos realizados por CORREA e REICHARDT (1995), CHAUVEL et al. (1999) e MULLER et al. (2001), que constataram que em solos sob pastagens houve aumento da densidade, diminuição da porosidade e da taxa de infiltração, e concluíram que o aumento da compactação da camada superficial em relação à mata, foi um fator impeditivo à penetração de raízes da pastagem. Desta forma, no presente estudo, os resultados mostraram que a utilização da área com pastagem propiciou, ao longo dos anos, a degradação dos atributos físicos da camada superficial do solo, evidenciado pela compactação intensa ocorrida.

A explicação para a degradação das propriedades físicas do solo sob pastagem seria em razão do tráfego e pisoteio de animais na área, confirmado por HOLT et al. (1996), MORAES e LUSTOSA (1997), SOUZA et al. (1998), MULLER et al. (2001), CARDOSO JÚNIOR et al. (2002). Assim os resultados evidenciaram sintomas claros de degradação física conforme REINERT (1998), ou seja, as perdas das condições ligadas à forma, como densidade, porosidade e infiltração, dentre outros.

Analisando-se os valores médios da macroporosidade (8,14%) e da resistência à penetração (2105,19 kPa) do solo sob pastagem (Quadro 13), verificou-se, conforme TORMENA (2002), a presença de compactação neste solo, uma vez que os valores desses atributos físicos, de acordo com os critérios estabelecidos pela pesquisa como limite de compactação, que são de 10% para a macroporosidade e de 2000 kPa para a resistência à penetração, encontram-se, respectivamente, abaixo e acima desses limites. Segundo o autor é necessário manter o solo longe desses limites para garantir as boas condições para as plantas, pois, uma macroporosidade inferior a 10% imprime uma inadequada difusão de oxigênio para atender a respiração das raízes e o crescimento da atividade de microorganismos, e uma resistência à penetração superior a 2000 kPa tem sido associada ao impedimento para o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas. Porém, o autor ressalta que esses valores limites são muito sensíveis à textura e condição estrutural do solo. Reforçando esta colocação, MANTOVANI (2002) comenta que é difícil estabelecer limites de compactação para as propriedades do solo, como densidade, porosidade, penetrabilidade e infiltração, uma vez que estas dependem das condições presentes em cada local.

Com relação a RSP, seus valores foram obtidos com alta umidade no solo, por volta de 30%, uma vez que na pastagem foi praticamente impossível obter seus valores com umidade baixa. Mesmo assim, com umidade alta, foram obtidos valores elevados da RSP para a pastagem, cuja média foi de 2105,19 kPa (Quadro 13), sendo superior ao limite de 2000 kPa, estabelecido como critério para solo compactado, conforme TORMENA (2002). CORREA e REICHARDT (1995), comentam que esses valores serão bem mais elevados nos períodos secos do ano ou quando houver longos intervalos sem chuva, representando, desta forma, um impedimento mecânico cada vez maior ao desenvolvimento das raízes. Na mata, o valor da RSP foi menor, com média de 547,09 kPa (Quadro 13), o que, segundo MARTINELLI et al. (2002), é devido a camada de serrapilheira, que mantém a umidade do solo, possibilitando melhor estruturação, imprimindo, desta forma, menor resistência à penetração.

No presente estudo, a degradação das propriedades físicas se deu em maior intensidade, devido às condições de solos presente na área, ou seja, foi consequência do manejo da área aliado ao teor elevado de argila, com presença de solos argilosos, que promoveu a compactação, observado pelo aumento da Ds e da resistência à penetração, e diminuição da porosidade total, da macroporosidade e da condutividade hidráulica. Isto é reforçado por PINZÓN e AMÉSQUITA (1991) e CORREA e REICHARDT (1995), quando afirmam que, solos argilosos com umidade elevada tornam-se plásticos e, com a compressão causada pelo pisoteio dos animais, há aumento da compactação, impresso pelo aumento da Ds, sendo que esta compactação é maximizada quando o solo estiver com teor de água inadequado para o pisoteio de animais. STREIN et al. (1991) relatam que o tráfego intenso de animais, especialmente em dias úmidos em solos argilosos, causou compactação, aumentando a densidade, reduzindo severamente a porosidade de aeração e a infiltração de água. DIAS-FILHO (1998) comenta que no período chuvoso, as fortes chuvas em áreas com pastagem com cobertura vegetal inadequada contribui para a compactação do solo, fazendo com que se tenha perda de fertilidade devido ao aumento da erosão. HUMPHREYS (1994) relata que a compactação se pronuncia mais na estação chuvosa, devido a maior lotação animal, em razão da maior disponibilidade de forragem, sendo esse efeito mais intenso em solos argilosos.

Desta forma, sendo o solo argiloso, no presente caso, é de se esperar que quando a umidade estiver alta ocorra a maximização da compactação, o que coincidiria com a época chuvosa. É justamente nesta época que existe maior disponibilidade de forragem, onde sua

utilização é mais intensa, com elevação da taxa de lotação. Informações do gerente da fazenda apontam que, no período chuvoso, de maior oferta de pastagem, a taxa de lotação pode chegar a 3 UA/ha, sendo superior ao do restante do ano, que é de 1,5 UA /ha. Assim, o super-pastejo, além de provocar a compactação, estaria contribuindo na eliminação da vegetação e, assim, diminuindo a cobertura do solo. CARVALHO (1998) mostra resultados de diversos estudos que indicam que à medida que se aumentou a taxa de lotação animal também se elevou a degradação da mesma.

A degradação das propriedades químicas, com redução dos teores de elementos no solo, não se pronunciou muito em razão da alta fertilidade, dispensando, neste caso, cuidados especiais e não sendo limitante para a produção da forragem. Por outro lado, a degradação das propriedades físicas deve ser vista com maior atenção, uma vez que os valores médios encontrados na pastagem, além de mostrar modificações intensas voltadas para condições inadequadas das condições de solo, acusam alta deterioração dos atributos físicos. Assim, o fator limitante estaria sendo a degradação física do solo. Isto está de acordo com CORREA e REICHARDT (1995), que comentam que a degradação física é limitante, em razão de a produtividade do solo não depender somente da quantidade suficiente de nutrientes, mas também do sistema poroso adequado nas camadas onde se desenvolvem as raízes das plantas. Entretanto, a alteração do sistema poroso por meio da compactação poderia alterar a dinâmica de nutrientes, que, por sua vez, pode influenciar negativamente na produção da forragem. Já PAPENDICK (1994) coloca que as condições físicas do solo controlam e desempenham papel importante nos seus processos biológicos e químicos, controlando e influenciando-os, uma vez que condicionam a retenção e movimentação da água.

Neste contexto, no presente caso, são preocupantes as condições físicas do solo, pois, todos esses fatores em conjunto mostraram alterações nas condições hidrológicas da área, em razão da compactação, fazendo com que a água não infiltrasse adequadamente e, desta maneira, aumentando o escoamento superficial, acentuando os problemas relacionados à erosão.

Para verificar o comportamento hidrológico, realizou-se a análise da curva de infiltração de água no solo para os solos das duas áreas, conforme mostra a Figura 16, onde é perceptível a diferença entre o comportamento da infiltração da água no solo sob mata em

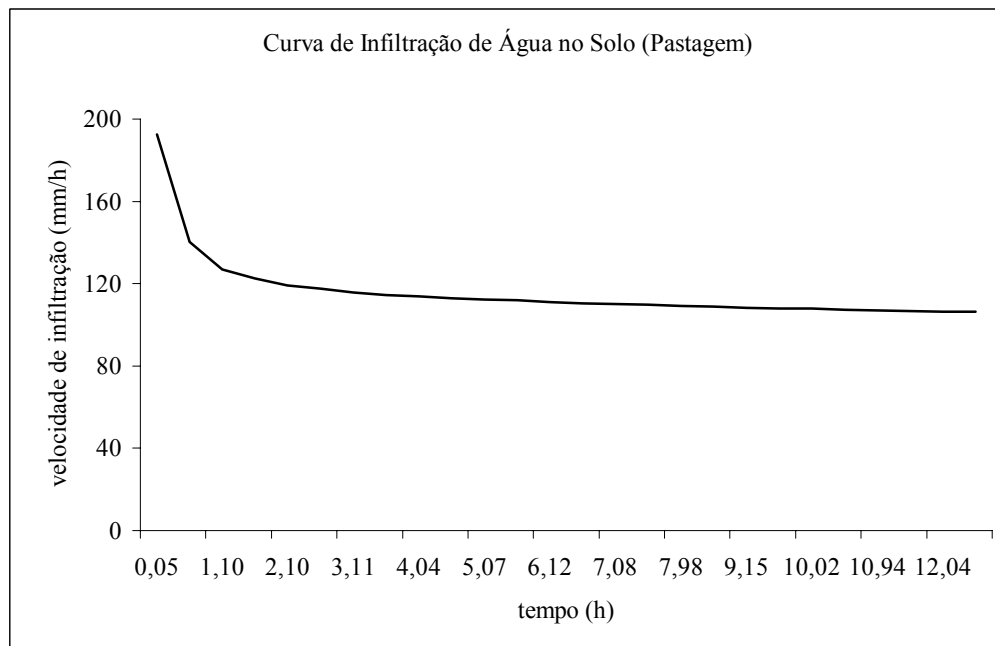
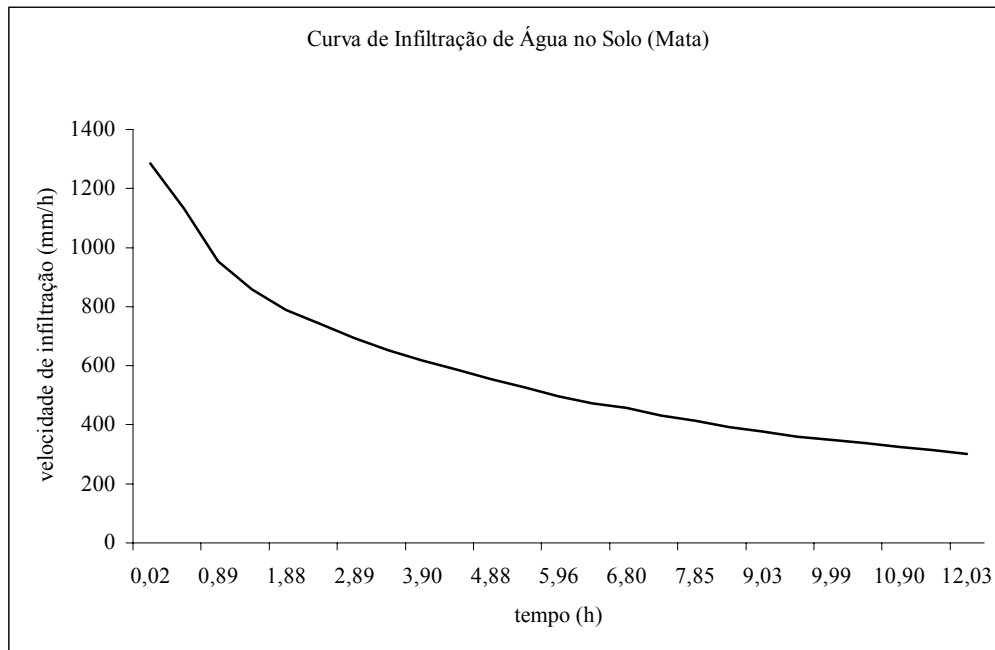


FIGURA 16 - Curvas de infiltração de água do solo sob mata e do solo sob pastagem.

relação ao solo sob pastagem. No solo sob mata, a velocidade de infiltração começa com valores próximos a 1.400 mm/h e se estabiliza, após 12 horas, com valores aproximados de 300 mm/h. Já no solo sob pastagem, a velocidade de infiltração inicia com valores próximos a 200 mm/h e se estabiliza, após 12 horas, com valores em torno de 100 mm/h. Isto mostra a degradação intensa ocorrida nas propriedades físicas do solo sob pastagem, evidenciada pelo aumento da D_s , da microporosidade e da resistência à penetração, e pela redução da porosidade total, da macroporosidade e da condutividade hidráulica, conforme mostra o Quadro 13.

CORREA e RECHARDT (1995) ressaltam que a degradação do solo sob pastagem faz com que a porosidade total da camada superficial seja reduzida, tornando seus valores similares as camadas subsuperficiais, que naturalmente são menores, o que resulta em menor capacidade de infiltração da água e maior exposição à erosão. Já COSTA e MATOS (1997) colocam que em latossolos, como no presente caso, apesar de apresentarem boas condições naturais das propriedades físicas, podem apresentar-se suscetíveis à erosão, especialmente quando apresentam camadas subsuperficiais compactadas, devido ao uso. Assim, esses autores comentam que, embora esses sejam profundos, passam a funcionar como solos rasos e, a partir do momento em que a infiltração de água passa a se restringir na camada abaixo da superfície é comum observar que não há restrição do movimento abaixo desta, embora o fluxo de água seja todo controlado pela camada que restringe sua movimentação. Desta forma, é de se esperar que o escoamento de água superficial torne-se crítico, causando erosão acima dos limites toleráveis, podendo-se concluir que o uso da pastagem, no presente caso, propiciou o aumento dos riscos a erosão.

Por outro lado, LOMBARDI NETO (1993) considera as pastagens como umas das formas mais eficientes de controle da erosão. Porém, segundo SERRÃO e TOLEDO (1990), BODDEY et al. (1998) e CARVALHO (1998), essa eficiência no controle da erosão somente poderá ser conseguida se as pastagens forem bem formadas e manejadas, de modo que se mantenha uma adequada cobertura do solo.

Desta forma, permanecendo tais condições na área com solo sob pastagem, qualquer chuva, mesmo que de menor intensidade, propiciará menor infiltração de água no solo e maior escoamento superficial, indesejável para as boas condições de pastagem e para menores impactos no ambiente, principalmente relacionados à erosão.

Assim, objetivando corrigir os problemas decorrentes da degradação das propriedades físicas é recomendável a descompactação do solo aliado ao manejo do gado e da pastagem que propicie minimizar, ao longo do tempo, a deterioração de tais propriedades. Neste sentido, HARRISON et al. (1994) comentam que pode ser realizada a descompactação ou reversão dos efeitos do pisoteio no solo mediante a subsolagem. Esta foi uma medida alternativa para a recuperação de pastagens perenes na Nova Zelândia. Esses autores observaram que a subsolagem feita a 47 e a 27 cm de profundidade, permitiram um melhor desenvolvimento do sistema radicular bem como um incremento na produção da pastagem nos meses subseqüentes à aplicação dos tratamentos, sendo atribuído a melhor resposta a redução da densidade do solo e aumento da Ma e da Ks. MACEDO et al. (2003) encontraram que a subsolagem de um solo sob pastagem teve efeito significativo na resistência à penetração e na velocidade de infiltração, favorecendo a resposta da planta à maior produção de forragem, o que permitiu afirmar que essas propriedades do solo podem ser alteradas positivamente por equipamentos descompactadores em solos argilosos.

Neste sentido, a descompactação do solo pode ser realizada pelo método da recuperação direta com destruição da vegetação, conforme descrevem MACEDO et al. (2000), que consiste inicialmente na possibilidade de se aplicar ou não um dessecante na pastagem, em doses que permitam o retorno da vegetação, para facilitar as operações mecânicas e a introdução de consórcios, quando for o caso, utilizando-se em seguida um subsolador ou escarificador, com ou sem dessecação, sendo feito, a seguir, uma adubação, se for o caso, ressemeadura da forrageira e introdução de milheto, para pastejo imediato e amortização dos custos até retorno da pastagem recuperada.

MORAES e LUSTOSA (1997) acrescentam que a descompactação do solo também pode ser obtida biologicamente pela ação do sistema radicular da própria pastagem e pela atividade da mesofauna, sendo possível quando a pastagem for submetida a períodos de descanso suficiente para promover um bom acúmulo de fitomassa aérea, que servirá como suporte para o melhor desenvolvimento radicular. Segundo esses autores, uma outra forma de descompactação, é a rotação da pastagem com cultivos agrícolas, representando um período de descanso, no qual o efeito regenerador do solo pode ser realizado por ação do crescimento de cultivos anuais, desde que a rotação seja estabelecida em condições de semeadura direta. GREENWOOD et al. (1998) estudando as mudanças das propriedades físicas de áreas em

pousio, encontrou que após três anos, a condutividade hidráulica não-saturada se elevou significativamente em relação às áreas de pastejo contínuo e também houve diminuição da densidade do solo até 6 cm de profundidade.

Com relação à descompactação pela subsolagem, deve ser vista como medida emergencial, de efeito temporário e de curto prazo, pois, permanecendo as mesmas condições de manejo da área, os problemas com a degradação física do solo retornarão. Com relação às outras formas de descompactação, são morosas e algumas vezes difíceis ou mesmo impossíveis de serem implementadas. Deve-se optar por um sistema de manejo que resulte em menor degradação física do solo e, conseqüentemente, menor degradação da pastagem.

Isto vem ao encontro de SILVA et al. (2003), quando comentam que a compactação do solo depende da intensidade de pastejo e influencia diretamente na produção da pastagem, devendo-se então, utilizar uma taxa de lotação que permita elevada produtividade associada à longevidade de sua utilização, uma vez que a resistência da degradação depende, entre muitas variáveis, da adequação do manejo do solo, notadamente do manejo físico.

4.2. Distribuição espacial dos atributos do solo

Inicialmente, para todos os atributos, a análise de tendência com os eixos x e y foram realizadas, e praticamente todas apresentaram tendência significativa, com exceção do K e do pH do solo sob mata. A análise de tendência foi realizada até o nível quadrático e com todas as interações entre os eixos x e y. Na mata, essas tendências se deram predominantemente ao nível quadrático da interação entre os eixos x e y e, na pastagem essa interação ocorreu predominantemente com o eixo x ou com a interação xy. Para os atributos Ca, SB, CTC, V, MO, B, Cu, Fe, S, Zn, Ds, RSP, Ks, Ma, Mi e PT, na mata, e pH, C/N, V, B, Cu, Fe, Ds, Ks, RSP e Ma, na pastagem, apesar da ocorrência de tendência significativa com os eixos x e y e, ou, com suas interações, a modelagem dos semivariogramas dos valores originais dos atributos forneceram parâmetros geoestatísticos que se enquadraram dentro dos critérios de seleção, que foram R^2 do semivariograma igual ou maior que 0,5 e R^2 significativo na validação cruzada em nível de 5% de probabilidade e, assim, optou-se, nestes casos, pela não utilização da modelagem do resíduo.

Para o restante dos atributos, em que apresentaram tendência significativa e esta influenciou fortemente a variografia e a krigagem, optou-se pela modelagem do resíduo. As

equações de regressão utilizadas para estes casos encontram-se no Quadro 14. Percebe-se, pelos resultados, que na mata os atributos que foram modelados por este procedimento apresentaram tendência predominantemente com o eixo y. Verificou-se também que na maioria das vezes o R^2 ajustado foi baixo, como por exemplo para o Mg, com valor de 2,7%, porém sendo este significativo, em nível de 1% de probabilidade. Conforme mostra o Quadro 14, o solo sob pastagem teve maior quantidade de atributos com tendência significativa com o eixo x, exceto para o K, que apresentou tendência significativa com as interações entre eixos x e y, inclusive em nível quadrático. Da mesma forma que na mata, o solo sob pastagem apresentou algumas vezes atributos com valores muito baixos de R^2 ajustado para a equação de regressão, como no caso do P, que foi de 3,9%. Porém, ressalta-se que tanto no caso da mata como no caso da pastagem, para os casos citados, com valor muito baixo de R^2 ajustado, que o procedimento de modelagem do resíduo possibilitou obter melhor ajuste do semivariograma em relação aos valores originais, permitindo a obtenção de mapas destes atributos com melhores resultados.

O procedimento de retirada de tendência foi eficiente por possibilitar modelos de semivariogramas com melhores ajustes e melhoria na obtenção dos mapas dos atributos. Este procedimento foi utilizado por OLIVER e KHAYRAT (2001) ao evidenciarem tendência na distribuição espacial da altitude, optando por removê-la a partir de uma função linear com as coordenadas, trabalhando com a variografia e krigagem do resíduo. Posteriormente, a tendência foi adicionada as estimativas no mapa do resíduo, obtendo-se, desta forma, o mapa da variável original. Procedimento similar foi proposto por GOOVAERTS (1999), que comenta que se pode subtrair a média local da concentração de Cd, estimar os resíduos, modelá-los e variografá-los; no final, a concentração de Cd pode ser obtida adicionando-se a média retirada. Segundo ele, neste caso, a variografia do resíduo pode ser utilizada com a finalidade de se reduzir a variância das estimativas.

A utilização deste procedimento é reforçada por OVALLES e COLLINS (1998), sugerem que para propriedades que apresentam tendência, esta pode ser removida para se trabalhar com o semivariograma do resíduo. Porém, neste caso, a tendência ainda pode estar presente, mas de uma forma reduzida. Por outro lado, TSEGAYE e HILL (1998a) ressaltam que a comparação nestes casos fica prejudicada, uma vez o efeito pepita e o patamar dos

QUADRO 14 - Parâmetros da regressão entre os eixos x e y com os atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob mata e do solo sob pastagem.

SOLO SOB MATA					
Atrib.	Nº Obs.	Equação de Regressão	R ² (%)	R ² Ajust. (%)	p
P	119	$P \text{ (mg/dm}^3\text{)} = 1,8081 + 0,00008761 \text{ xy}$	3,80	3,00	0,034
Mg	119	$Mg \text{ (cmol}_e\text{/dm}^3\text{)} = 1,97182 - 0,0016102 \text{ y}$	3,50	2,70	0,042
N	119	$N \text{ (g/kg)} = 2,09423 - 0,0035671 \text{ y}$	19,40	18,70	0,000
C/N	119	$C/N = 13,1930 + 0,00021968 \text{ xy}$	16,70	16,00	0,000
Mn	119	$Mn \text{ (mg/dm}^3\text{)} = 123,611 + 0,27111 \text{ y}$	13,00	12,30	0,000
GF	119	$GF \text{ (}\%\text{)} = 49,844 - 0,29017 \text{ x}$	47,90	47,50	0,000
SOLO SOB PASTAGEM					
Atrib.	Nº Obs.	Equação de Regressão	R ² (%)	R ² Ajust. (%)	p
P	119	$P \text{ (mg/dm}^3\text{)} = 0,6398 + 0,006882 \text{ x}$	4,80	3,90	0,017
K	119	$K \text{ (mg/dm}^3\text{)} = 121,11 + 0,024735 \text{ xy} - 0,00000234 \text{ x}^2 \text{ y}^2$	8,40	6,80	0,006
Ca	119	$Ca \text{ (cmol}_e\text{/dm}^3\text{)} = 6,6873 + 0,020665 \text{ x}$	43,00	42,50	0,000
Mg	119	$Mg \text{ (cmol}_e\text{/dm}^3\text{)} = 1,27911 + 0,0027528 \text{ x}$	32,50	31,90	0,000
SB	119	$SB \text{ (cmol}_e\text{/dm}^3\text{)} = 8,2929 + 0,024888 \text{ x}$	46,40	46,00	0,000
CTC	119	$CTC \text{ (cmol}_e\text{/dm}^3\text{)} = 11,0503 + 0,025292 \text{ x}$	48,90	48,40	0,000
MO	119	$MO \text{ (g/kg)} = 43,0414 + 0,041406 \text{ x}$	31,50	31,00	0,000
N	119	$N \text{ (g/kg)} = 1,70440 + 0,0022749 \text{ x}$	18,20	17,50	0,000
Mn	119	$Mn \text{ (mg/dm}^3\text{)} = 86,567 + 0,36252 \text{ x}$	44,60	44,10	0,000
S	119	$S \text{ (mg/dm}^3\text{)} = 7,1733 - 0,010684 \text{ x}$	8,90	8,10	0,001
Zn	119	$Zn \text{ (mg/dm}^3\text{)} = 1,27863 + 0,012031 \text{ x}$	37,50	37,00	0,000
Mi	119	$Mi \text{ (}\%\text{)} = 29,2504 + 0,036557 \text{ x}$	47,70	47,20	0,000
PT	119	$PT \text{ (}\%\text{)} = 38,3795 + 0,00022516 \text{ x}^2$	25,60	25,00	0,000
GF	119	$GF \text{ (}\%\text{)} = 47,0794 - 0,04774 \text{ x}$	9,10	8,30	0,001

Atrib. - atributo do solo; Nº Obs. - número de observações; R² - coeficiente de determinação; R² Ajust. - coeficiente de determinação ajustado; p - significância (probabilidade).

resíduos não são comparáveis com os das variáveis que forem modeladas por seus valores originais. Assim, quando se deseja uma análise comparativa destes parâmetros, é recomendável a análise geoestatística da variável original. Como no presente caso o objetivo foi a obtenção dos mapas dos atributos do solo com melhores parâmetros geoestatísticos, de forma que os resultados fossem confiáveis, não houve preocupação em realizar a comparação dos parâmetros do semivariograma dos atributos do solo sob mata com os do solo sob pastagem.

A presença de tendência significativa com os eixos x e y significou que os fatores de influência na distribuição espacial das propriedades estudadas não agiram de forma similar em toda a área, ou seja, existiu a predominância de um processo não-estacionário, conforme

ANDRIOTTI (1998). Nestes casos, essa tendência implica em uma variação espacial anisotrópica, segundo TRANGMAR et al. (1985), que está relacionada às propriedades não variarem de forma igual em todas as direções, devendo ser computado no semivariograma a direção de máxima e de mínima variação, que representam as atividades anisotrópicas ou os processos de formação do solo, também anisotrópicos. DAVIS et al. (1995) ressaltam que variogramas direcionais podem ser utilizados e que a direção de maior variação pode sofrer maior intensificação de coleta de amostras, de forma a se planejar a amostragem para obtenção da maximização da informação. Por outro lado, VALERIANO e PRADO (2000) comentam que, no caso de se estar ignorando os efeitos anisotrópicos, pode-se estar imprimindo erros na descrição da variabilidade espacial nestes casos.

Com a utilização do procedimento de retirada da tendência, ao se trabalhar com a modelagem do resíduo, o fenômeno tendeu a se tornar estacionário, sendo possível a obtenção de melhores ajustes de semivariogramas. Porém, para os atributos que apresentaram tendência significativa e que não se utilizou o procedimento de modelagem do resíduo, não implicou em um processo estritamente não-estacionário. Esta tendência, nestes casos, mostrou somente que existiu uma influência anisotrópica dos fatores que agiram sobre distribuição espacial de tais atributos e que, segundo MOOLMAN e VANHUYSSTEEN (1989), fazem com que as estimativas dos valores das propriedades com tendência significativa com os eixos, tivessem maior erro na krigagem. Nos casos que a modelagem do resíduo foi utilizada, implicou no fato de que esses mesmos fatores agiram mais intensivamente na anisotropia e assim, imprimiram um processo não-estacionário. Isto pode ser verificado nos semivariogramas ajustados das variáveis, que se encontram nas Figuras 17 a 22.

Como exemplo, a CTC no solo sob mata, com tendência significativa com os eixos x e y, apresentou ótimos valores dos parâmetros do semivariograma dos valores originais, dentro dos critérios de seleção estabelecidos e, desta forma, não se utilizou a modelagem do resíduo. Por outro lado, a CTC no solo sob pastagem apresentou tendência significativa com o eixo x e péssimos valores dos parâmetros do semivariograma dos valores originais, fora dos critérios de seleção e, assim, foi utilizado o procedimento de modelagem do resíduo e posterior adição da tendência para obtenção do mapa da variável original. Neste caso, a modelagem do resíduo forneceu parâmetros geoestatísticos dentro dos critérios de seleção, produzindo, um mapa com melhores resultados.

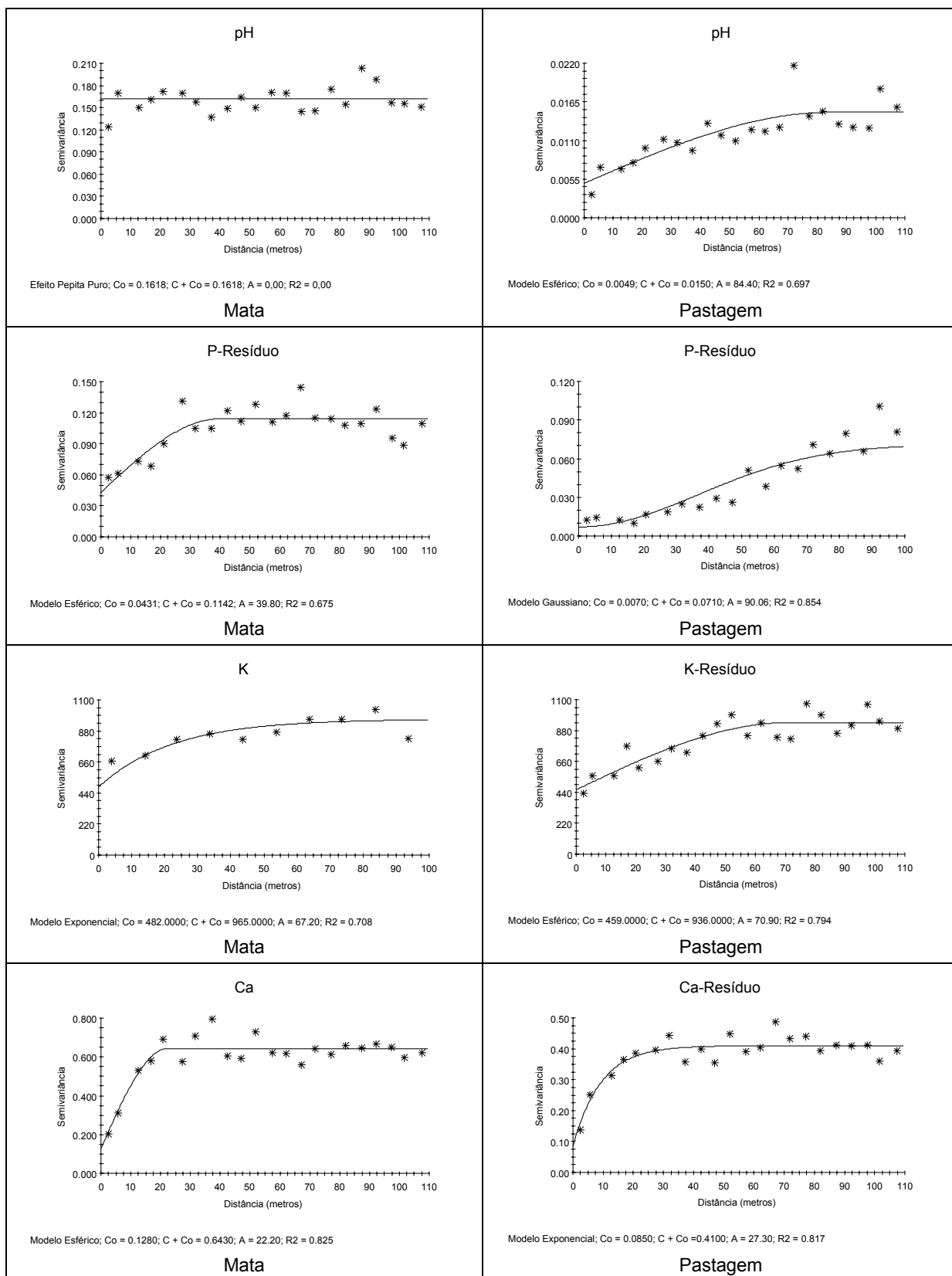


FIGURA 17 - Semivariogramas ajustados do pH, P-Resíduo, K e Ca do solo sob mata, e do pH, P-Resíduo, Ca-Resíduo e Ca-Resíduo do solo sob pastagem.

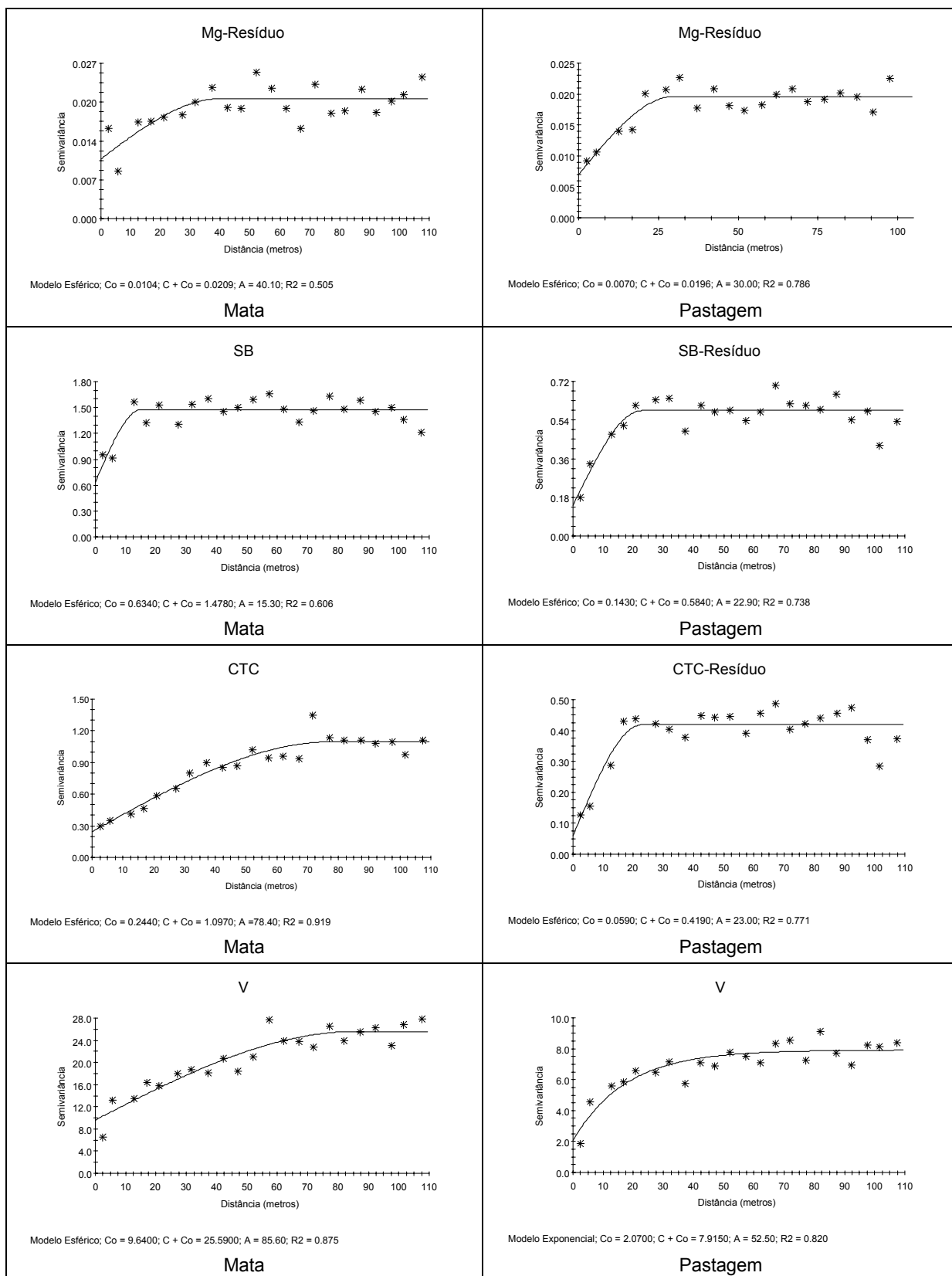


FIGURA 18 - Semivariogramas ajustados do Mg-Resíduo, SB, CTC e V do solo sob mata, e do Mg-Resíduo, SB-Resíduo, CTC-Resíduo e V do solo sob pastagem.

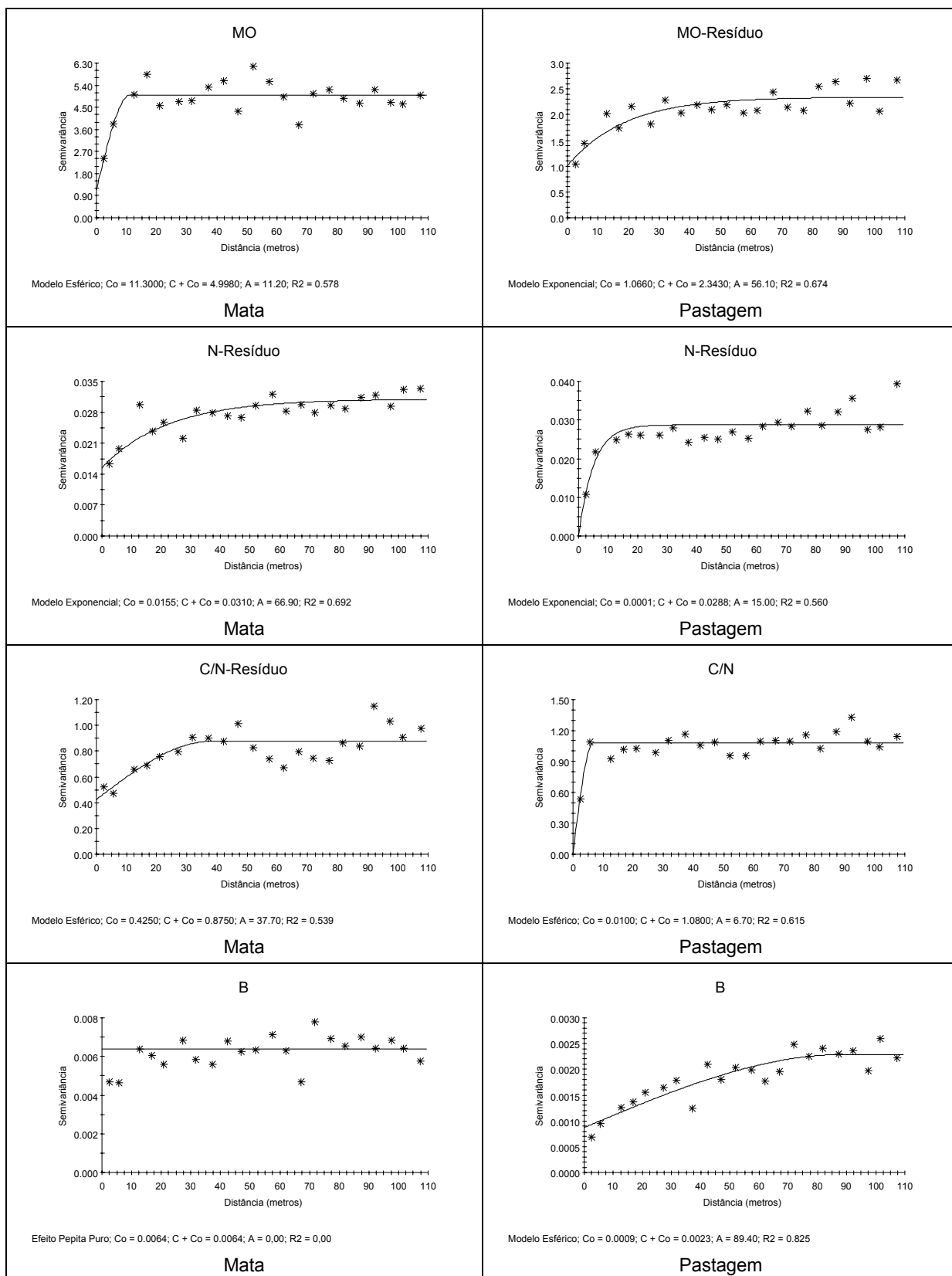


FIGURA 19 - Semivariogramas ajustados do MO, N-Resíduo, C/N-Resíduo e B do solo sob mata, e do MO-Resíduo, N-Resíduo, C/N e B do solo sob pastagem.

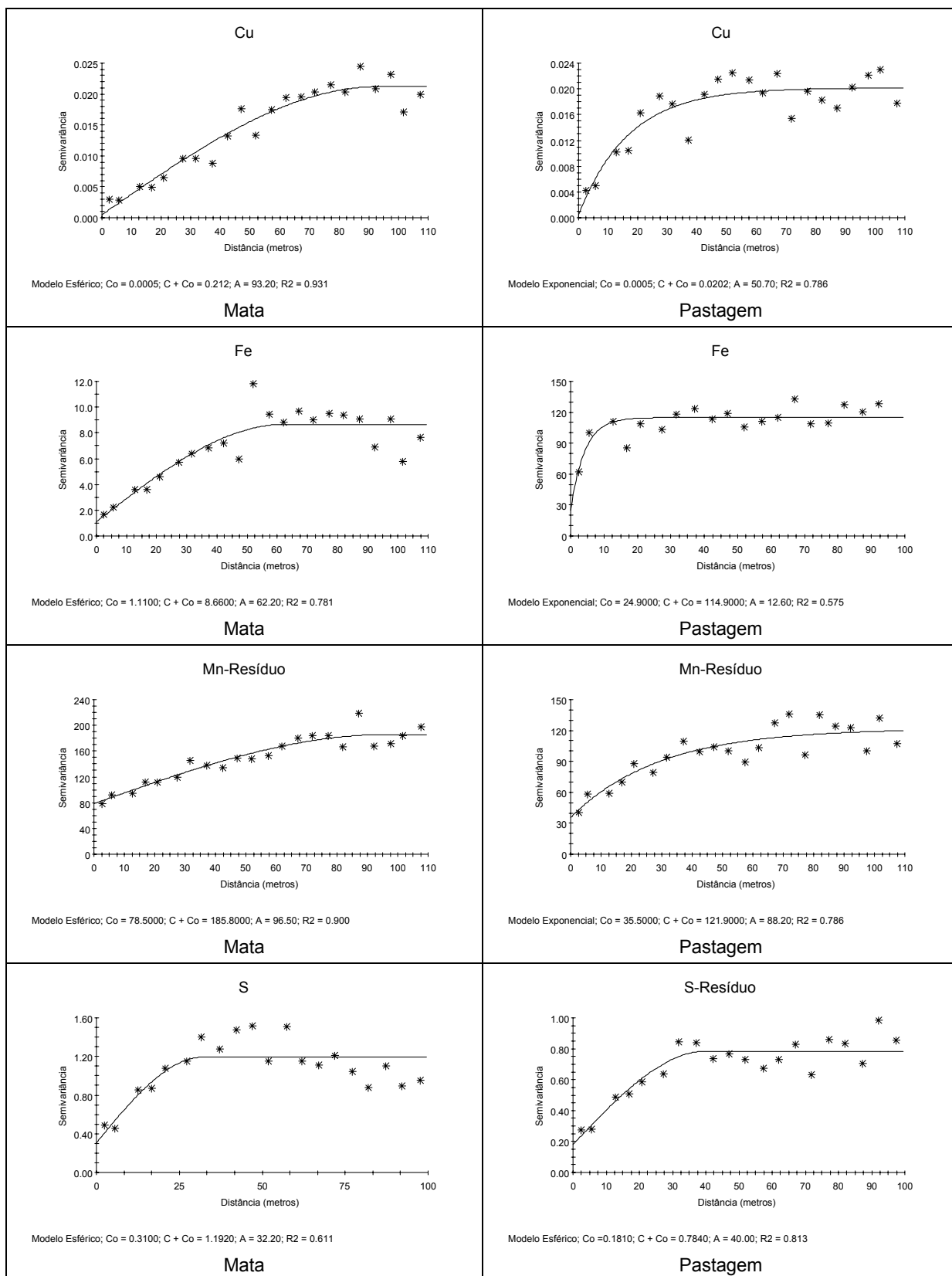


FIGURA 20 - Semivariogramas ajustados do Cu, Fe, Mn-Resíduo e S do solo sob mata, e do Cu, Fe, Mn-Resíduo e S-Resíduo do solo sob pastagem.

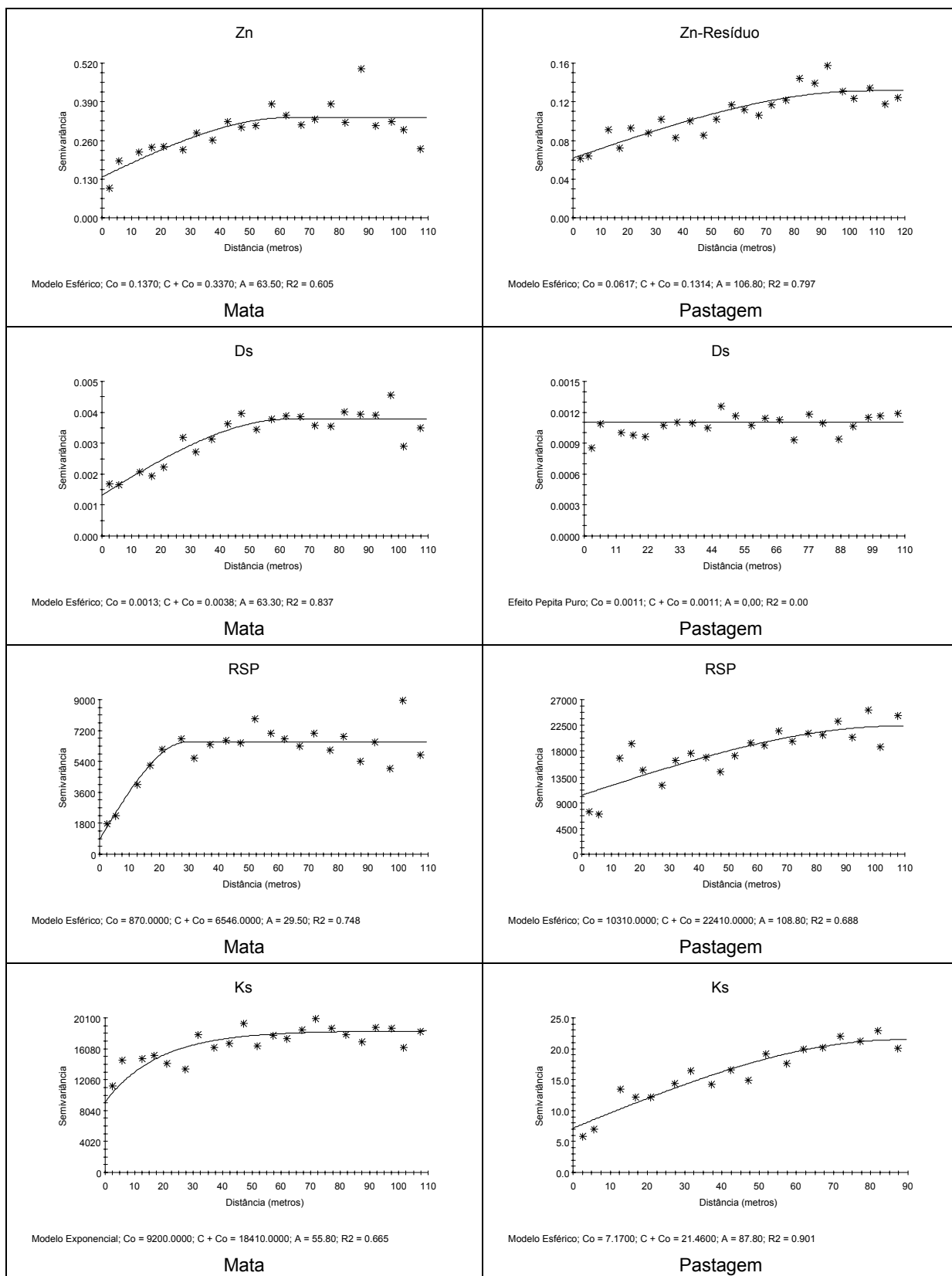


FIGURA 21 - Semivariogramas ajustados do Zn, Ds, RSP e Ks do solo sob mata, e do Zn-Resíduo, Ds, RSP e Ks do solo sob pastagem.

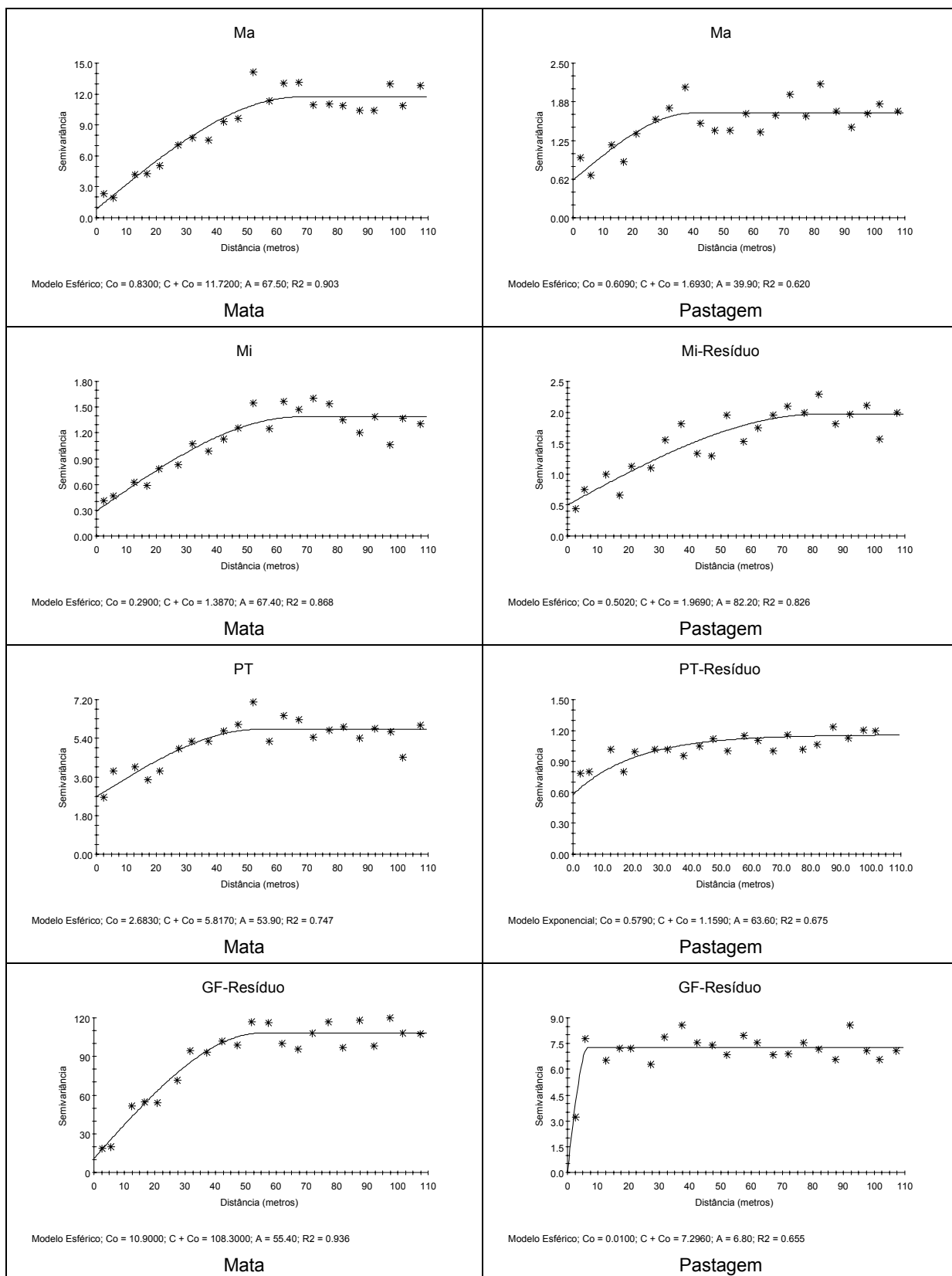


FIGURA 22 - Semivariogramas ajustados do Ma, Mi, PT e GF-Resíduo do solo sob mata, e do Ma, Mi-Resíduo, PT-Resíduo e GF-Resíduo do solo sob pastagem.

A presença de tendência significativa dos atributos com os eixos x e y, sugerem que as estimativas dos valores das propriedades apresentam maior erro na krigagem, ou seja, devido a anisotropia, as estimativas devem sofrer compensações quando da interpolação. Porém, esses erros podem ser minimizados ou compensados à medida em que se possa utilizar uma quantidade elevada de pontos amostrais e os mais próximos possíveis, como foi o caso do presente estudo, em que se utilizou uma grade com 121 pontos amostrais e distância mínima entre eles de 2,5 metros. A utilização desta escala esteve de acordo com HOOSBBEK (1998), quando comenta que a escala é função do tipo de estudo e que por sua vez, a variabilidade é função da escala utilizada. Desta forma, a grande quantidade de pontos por si só pode compensar os erros de estimativas dos valores na krigagem. Com a finalidade de se observar a variabilidade espacial em pequena escala, foi utilizada a distância mínima de 2,5 metros entre pontos amostrais, na tentativa de se detectar as diferenças que o uso do solo sob pastagem teve em relação ao solo sob mata. COUTO e KLAMT (1999) também trabalharam com pequena distância entre pontos, quando utilizaram esquema de amostragem constando de uma malha de 132 pontos com pequeno espaçamento, na tentativa de captar a variabilidade espacial em distância até 1 metro entre pontos.

Observando-se os Quadros 15 e 16, que mostram os parâmetros dos semivariogramas ajustados contidos nas Figuras 17 a 22, percebe-se que quase todos os modelos foram enquadrados nos critérios de aceitação, que foram R^2 do semivariograma igual ou maior que 0,5 e R^2 significativo na validação cruzada em nível de 5% de probabilidade. Somente os atributos B e pH do solo sob mata e Ds do solo sob pastagem não apresentaram modelos de distribuição espacial, em razão de apresentarem efeito pepita puro.

Predominantemente, os modelos de semivariograma foram esféricos, com exceção do K, N-Resíduo e Ks na mata, e do Ca-Resíduo, V, MO-Resíduo, N-Resíduo, Cu, Fe, Mn-Resíduo e PT-Resíduo na pastagem, que foram exponenciais, e do P-Resíduo na pastagem que foi gaussiano.

O alcance, para os modelos de semivariogramas aceitos, variou no solo sob mata, de 11,2 metros para a MO a 96,5 metros para o Mn-Resíduo (Quadro 15) e, no solo sob pastagem, de 6,7 metros para o C/N a 108,80 metros para a RSP (Quadro 16), mostrando, assim, variação de escala conforme o atributo estudado. Resultados similares foram

QUADRO 15 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob mata.

Atrib.	Modelo	Co	C + Co	C	VDE	Alcance	SSD/SST	R ² Sem.	RSS Sem.	R ² VC	R ² Aj. VC	signific.
pH	efeito pepita	0,1618	0,1618	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	6,2960E-03	0,00	0,00	0,900
P-Resíduo	esférico	0,0431	0,1142	0,0711	62,26	39,80	0,3250	0,6750	3,5670E-03	31,80	31,10	0,000
K	exponencial	482,0000	965,0000	483,0000	50,05	67,20	0,2920	0,7080	4,4902E+04	10,10	9,10	0,002
Ca	esférico	0,1280	0,6430	0,5150	80,09	22,20	0,1750	0,8250	5,9700E-02	39,10	38,40	0,000
Mg-Resíduo	esférico	0,0104	0,0209	0,0105	50,24	40,10	0,4950	0,5050	1,4390E-04	16,90	16,00	0,000
SB	esférico	0,6340	1,4780	0,8440	57,10	15,30	0,3940	0,6060	3,2100E-01	7,20	6,30	0,004
CTC	esférico	0,2440	1,0970	0,8530	77,76	78,40	0,0810	0,9190	1,4000E-01	55,60	55,60	0,000
V	esférico	9,6400	25,5900	15,9500	62,33	85,60	0,1250	0,8750	8,0600E+01	40,00	39,30	0,000
MO	esférico	1,1300	4,9980	3,8680	77,39	11,20	0,4220	0,5780	5,4000E+00	17,40	16,60	0,000
N-Resíduo	exponencial	0,0155	0,0310	0,0155	50,00	66,90	0,3080	0,6920	1,2030E-04	6,90	6,10	0,006
C/N-Resíduo	esférico	0,4250	0,8750	0,4500	51,43	37,70	0,4610	0,5390	2,5300E-01	19,70	18,90	0,000
B	efeito pepita	0,0064	0,0064	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,4910E-05	2,50	1,60	0,103
Cu	esférico	0,0005	0,0212	0,0207	97,64	93,20	0,0690	0,9310	7,1030E-05	71,40	71,10	0,000
Fe	esférico	1,1100	8,6600	7,5500	87,18	62,20	0,2190	0,7810	3,2700E+01	63,20	62,80	0,000
Mn-Resíduo	esférico	78,5000	185,8000	107,3000	57,75	96,50	0,1000	0,9000	2,8550E+03	28,60	27,80	0,000
S	esférico	0,3100	1,1920	0,8820	73,99	32,20	0,3890	0,6110	6,3900E-01	41,10	40,50	0,000
Zn	esférico	0,1370	0,3370	0,2000	59,35	63,50	0,3950	0,6050	5,3100E-02	33,50	32,80	0,000
Ds	esférico	0,0013	0,0038	0,0025	65,79	63,30	0,1630	0,8370	2,4100E-06	40,30	39,70	0,000
RSP	esférico	870,0000	6546,0000	5676,0000	86,71	29,50	0,2520	0,74800	1,3940E+07	60,90	60,40	0,000
Ks	exponencial	9200,0000	18410,0000	9210,0000	50,03	55,80	0,3350	0,6650	3,8840E+07	13,70	12,80	0,000
Ma	esférico	0,8300	11,7200	10,8900	92,92	67,50	0,0970	0,9030	2,7000E+01	67,30	66,90	0,000
Mi	esférico	0,2900	1,3870	1,0970	79,09	67,40	0,1320	0,8680	3,7900E-01	54,50	54,00	0,000
PT	esférico	2,6830	5,8170	3,1340	53,88	53,90	0,2530	0,7470	6,1500E+00	27,30	26,70	0,000
GF-Resíduo	esférico	10,9000	108,3000	97,4000	89,94	55,40	0,0640	0,9360	1,2520E+03	67,10	66,80	0,000

Atrib. - atributo do solo; efeito pepita - efeito pepita puro; Co - efeito pepita; C + Co - patamar; VDE - variabilidade com dependência espacial; SSD/SST - soma dos quadrados dos desvios/soma dos quadrados totais; R² Sem. - R² do semivariograma; RSS Sem. - RSS do semivariograma; R² VC - R² da validação cruzada; R² Aj. VC - R² ajustado da validação cruzada; signific. - significância.

QUADRO 16 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob pastagem.

Atrib.	Modelo	Co	C + Co	C	VDE	Alcance	SSD/SST	R ² Sem.	RSS Sem.	R ² VC	R ² Aj. VC	signific.
pH	esférico	0,0049	0,0150	0,0101	67,33	84,40	0,3030	0,6970	9,8710E-05	48,50	48,10	0,000
P-Resíduo	gaussiano	0,0070	0,0710	0,0640	90,14	90,06	0,1460	0,8540	2,2800E-03	75,60	75,40	0,000
K-Resíduo	esférico	459,0000	936,0000	477,0000	50,96	70,90	0,2060	0,7940	1,2550E+05	27,00	26,30	0,000
Ca-Resíduo	exponencial	0,0850	0,4100	0,3250	79,27	27,30	0,1830	0,8170	2,07E-02	36,90	36,30	0,000
Mg-Resíduo	esférico	0,0070	0,0196	0,0126	64,29	30,00	0,2140	0,7860	5,3190E-05	31,00	30,40	0,000
SB-Resíduo	esférico	0,1430	0,5840	0,4410	75,51	22,90	0,2620	0,7380	7,3900E-02	36,20	35,60	0,000
CTC-Resíduo	esférico	0,0590	0,4190	0,3600	85,92	23,00	0,2290	0,7710	4,3600E-02	47,80	47,30	0,000
V	exponencial	2,0700	7,9150	5,8450	73,85	52,50	0,1800	0,8200	9,4900E+00	32,20	31,60	0,000
MO-Resíduo	exponencial	1,0660	2,3430	1,2770	54,50	56,10	0,3260	0,6740	1,0400E+00	13,00	12,20	0,000
N-Resíduo	exponencial	0,0001	0,0288	0,0287	99,65	15,00	0,4400	0,5600	2,6960E-04	28,10	27,50	0,000
C/N	esférico	0,0010	1,0800	1,0790	99,91	6,70	0,3850	0,6150	1,7600E-01	19,20	18,40	0,000
B	esférico	0,0009	0,0023	0,0014	60,87	89,40	0,1750	0,8250	9,5120E-07	43,30	42,70	0,000
Cu	exponencial	0,0005	0,0202	0,0197	97,52	50,70	0,2140	0,7860	1,3330E-04	60,70	60,70	0,000
Fe	exponencial	24,9000	114,9000	90,0000	78,33	12,60	0,4250	0,5750	1,9730E+03	5,40	4,60	0,011
Mn-Resíduo	exponencial	35,5000	121,9000	86,4000	70,88	88,20	0,2140	0,7860	3,0260E+03	43,20	42,60	0,000
S-Resíduo	esférico	0,1810	0,7840	0,6030	76,91	40,00	0,1870	0,8130	1,2600E-01	50,00	49,50	0,000
Zn-Resíduo	esférico	0,0617	0,1314	0,0697	53,04	106,80	0,2030	0,7970	2,9590E-03	21,50	20,70	0,000
Ds	efeito pepita	0,0011	0,0011	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,1540E-07	4,20	3,40	0,027
RSP	esférico	10310,0000	22410,0000	12100,0000	53,99	108,80	0,3120	0,6880	1,4340E+08	25,40	24,50	0,000
Ks	esférico	7,1700	21,4600	14,2900	66,59	87,80	0,0990	0,9010	4,0100E+01	34,10	33,50	0,000
Ma	esférico	0,6090	1,6930	1,0840	64,03	39,90	0,3800	0,6200	1,1000E+00	30,40	29,70	0,000
Mi-Resíduo	esférico	0,5020	1,9690	1,4670	74,50	82,20	0,1740	0,8260	9,9200E-01	55,60	55,20	0,000
PT-Resíduo	exponencial	0,5790	1,1590	0,5800	50,04	63,60	0,3250	0,6750	1,4800E-01	5,30	4,40	0,018
GF-Resíduo	esférico	0,0100	7,2960	7,2860	99,86	6,80	0,3450	0,6550	8,4200E+00	33,20	32,40	0,000

Atrib. - atributo do solo; efeito pepita - efeito pepita puro; Co - efeito pepita; C + Co - patamar; VDE - variabilidade com dependência espacial; SSD/SST - soma dos quadrados dos desvios/soma dos quadrados totais; R² Sem. - R² do semivariograma; RSS Sem. - RSS do semivariograma; R² VC - R² da validação cruzada; R² Aj. VC - R² ajustado da validação cruzada; signific. - significância.

encontrados em diversos estudos (VIEIRA et al., 1992; ROBERTSON et al., 1993; TSEGAYE e HILL, 1998a; TSEGAYE e HILL, 1988b), mostrando que a escala de variação pode mudar conforme a variável e o uso da terra. Segundo CASTRIGNANO et al. (2000), a variação espacial das propriedades físicas e químicas do solo é imposta por processos que diferem espacialmente em escala e ao longo do tempo, sendo que uns dependem do manejo e uso do solo e outros, dependem de fenômenos naturais relacionados à estrutura e textura do solo. Em razão do exposto por estes autores, é possível explicar a grande variação no alcance da dependência espacial das variáveis estudadas, onde foram várias as fontes de variação, como o tempo e intensidade de uso do solo sob pastagem ou mesmo das condições naturais atuantes no solo sob mata.

A VDE, que mede a variabilidade com dependência espacial, para os modelos de semivariogramas aceitos, apresentou no solo sob mata, 13 variáveis com valores entre 50 e 75% e nove variáveis com valores acima de 75%, e no solo sob pastagem, 13 variáveis com valores entre 50 e 75% e 10 variáveis com valores acima de 75%, conforme mostram os Quadros 15 e 16. De acordo com CAMBARDELA et al. (1994), a VDE entre 25 e 75% significa moderada dependência espacial e VDE acima de 75%, significa alta dependência espacial. Desta forma, os resultados mostraram que, em geral, os valores de dependências espaciais das variáveis do solo possibilitaram, segundo GUTJAHR (1985), melhores estimativas pela krigagem.

Com relação aos valores de R^2 dos semivariogramas na mata, duas variáveis apresentaram valores inferiores a 0,50, 12 variáveis com valores entre 0,50 e 0,75, e 10 variáveis com valores acima de 0,75. Na pastagem, uma variável apresentou R^2 inferior a 0,50, 10 variáveis entre 0,50 e 0,75, e 13 variáveis acima de 0,75. Estes resultados mostram, em geral, ajustes dos semivariogramas que possibilitaram a obtenção dos mapas da distribuição espacial das variáveis de forma confiável.

Quanto à validação cruzada, em geral, as variáveis apresentaram o R^2 ajustado significativo, com exceção do pH e B no solo sob mata, e da Ds no solo sob pastagem. Na mata, nove variáveis apresentaram R^2 ajustados entre 0 e 25%, oito entre 25 e 50%, e sete entre 50 e 75%. Na pastagem, seis variáveis apresentaram R^2 ajustados entre 0 e 25%, 15 entre 25 e 50%, e três entre 50 e 75%. Em alguns casos, como a SB e o N-Resíduo na mata e o Fe e a PT na pastagem, apesar de apresentarem modelos de semivariogramas aceitos, os valores de

R^2 ajustados na validação cruzada foram muito baixos, próximos a 5%, porém, todos apresentando significância em nível de 5% de probabilidade, em razão do número elevado de observações. Nestes casos, conforme GOOVAERTS (1999), os semivariogramas não foram capazes de captar e analisar de forma eficiente a estrutura espacial dessas variáveis.

O procedimento de eliminação de pontos amostrais na validação cruzada que apresentaram resíduos padronizados inferior a -2 ou superior a 2, obtidos da regressão linear entre os valores observados e estimados, possibilitou a identificação e exclusão das amostras com valores discrepantes, cujo resíduo estivesse fora do intervalo de confiança da média com 95% de probabilidade, como descrito por SGUAREZI (2002). Esta eliminação foi realizada até o ponto em que não se obtivesse valores fora desses limites ou até o ponto em que se tivesse uma eliminação máxima de 30% dos pontos amostrais. Desta forma, este procedimento, apesar de ter produzido sítios com valores maiores na variância da krigagem, propiciou melhores ajustes dos semivariogramas e melhores valores do R^2 da validação cruzada, favorecendo assim, a obtenção de mapas com melhores resultados. Ressalta-se que este procedimento somente foi possível em razão de se ter utilizado uma malha de amostragem com grande quantidade de pontos.

A partir dos modelos aceitos, realizou-se a krigagem dos dados para a obtenção dos mapas de cada variável, que se encontram nas Figuras de 23 a 30. Nos mapas, percebe-se a tendência com os eixos x e, ou, y para vários casos, além de se poder localizar sítios específicos de maiores ou de menores valores dos atributos estudados. Neste sentido, BIBLIO et al. (2003) comentam que os mapas de variabilidade espacial permitem localizar as áreas com problemas e testar a eficiência das práticas utilizadas em solucioná-los, indicando que podem eficientemente ajudar na identificação e estabelecimento de zonas de manejo de áreas agrícolas, que possibilitem a adoção de tratamentos diferenciados, de acordo com as necessidades específicas do solo.

A partir dos mapas foi possível localizar geograficamente as áreas mais problemáticas, o que não ocorreu nos procedimentos clássicos, quando se utilizou a média do conjunto de dados de cada variável para análise. Isto é corroborado por CASTRIGNANO et al. (2000), que afirmam que a estatística clássica não pode separar as diferentes fontes de variação espacial que estariam influenciando as propriedades do solo. LIMA e SILANS

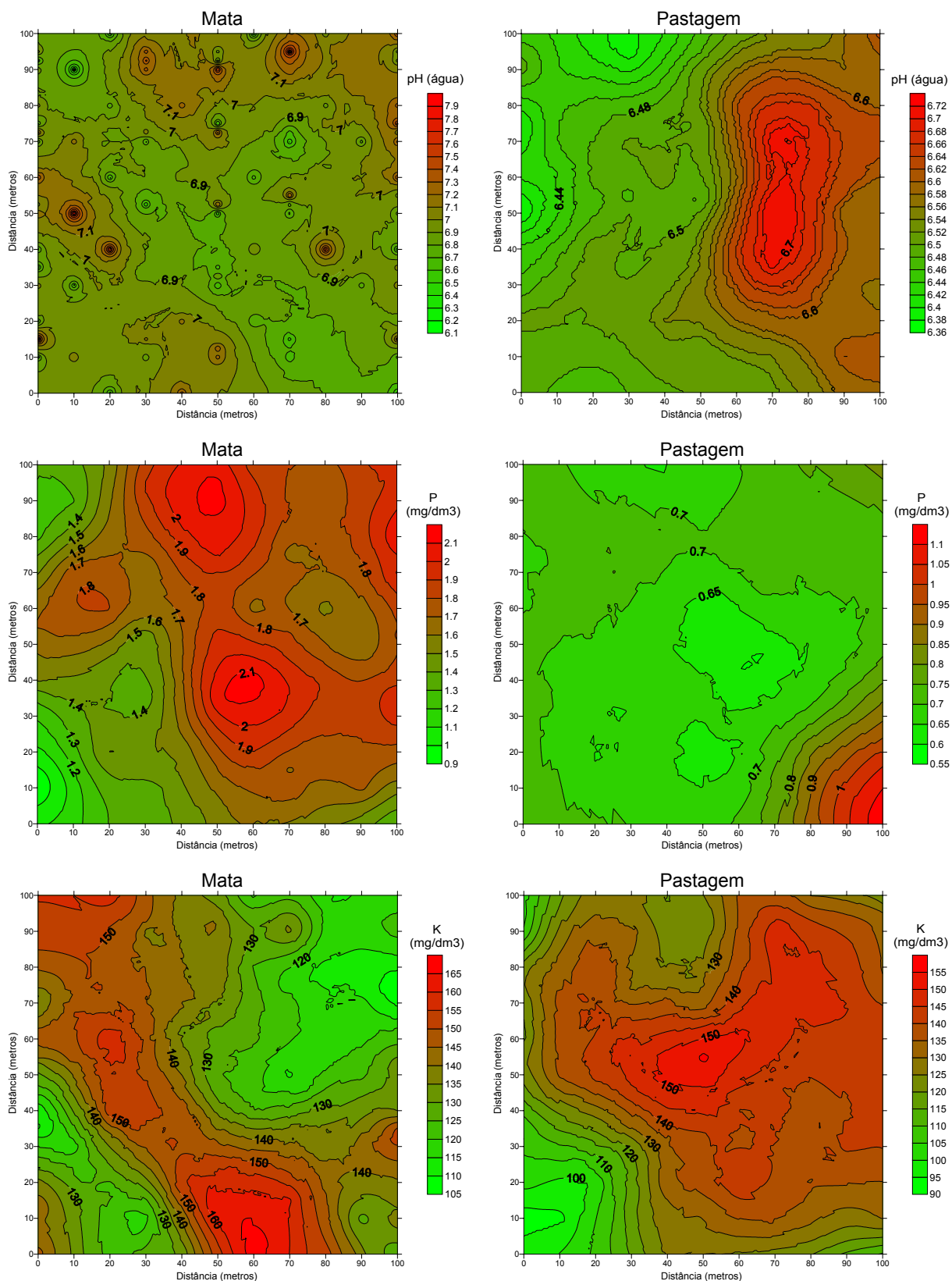


FIGURA 23 - Mapas da distribuição espacial dos atributos pH, P e K da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

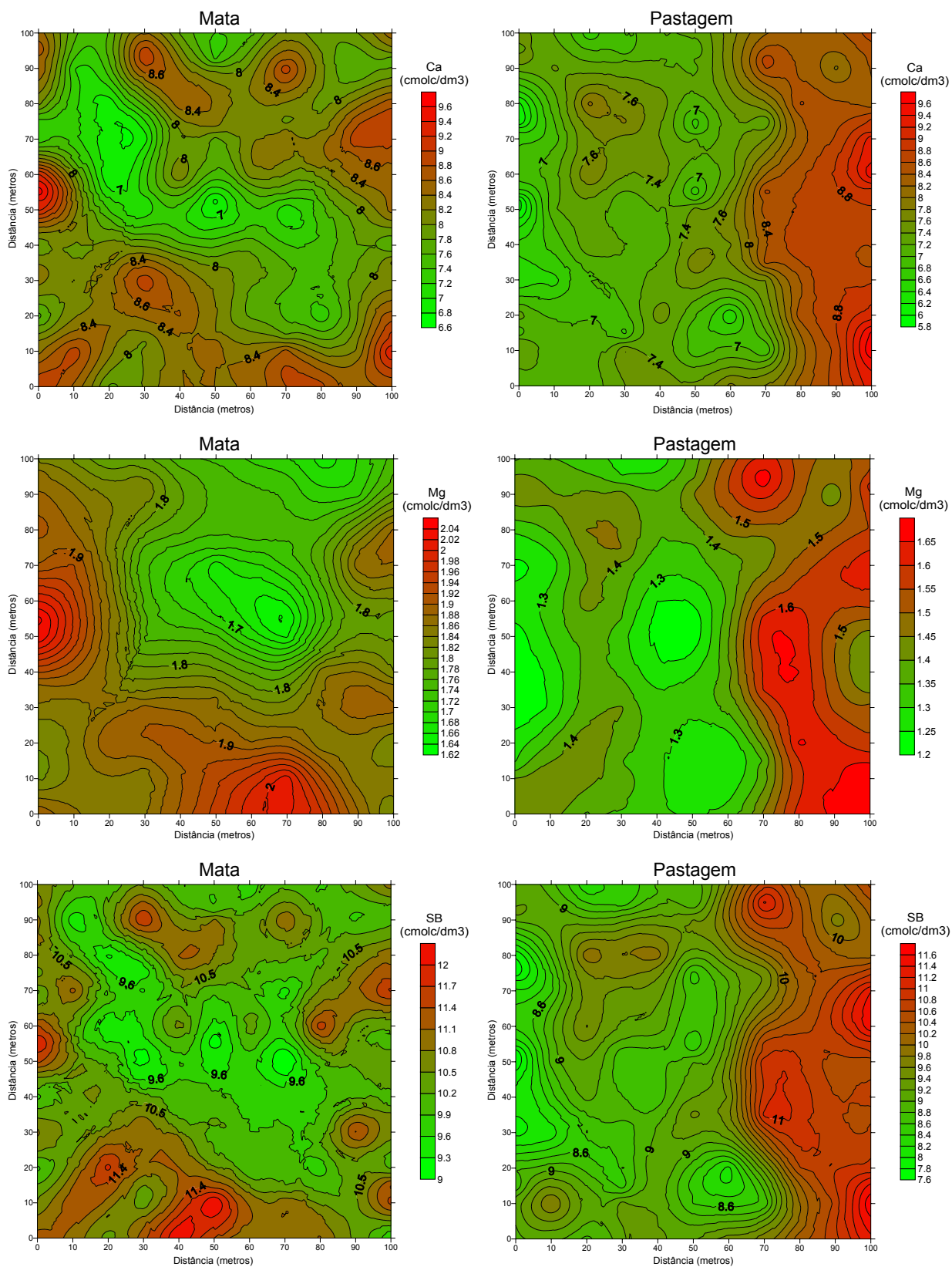


FIGURA 24 - Mapas da distribuição espacial dos atributos Ca, Mg e SB da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

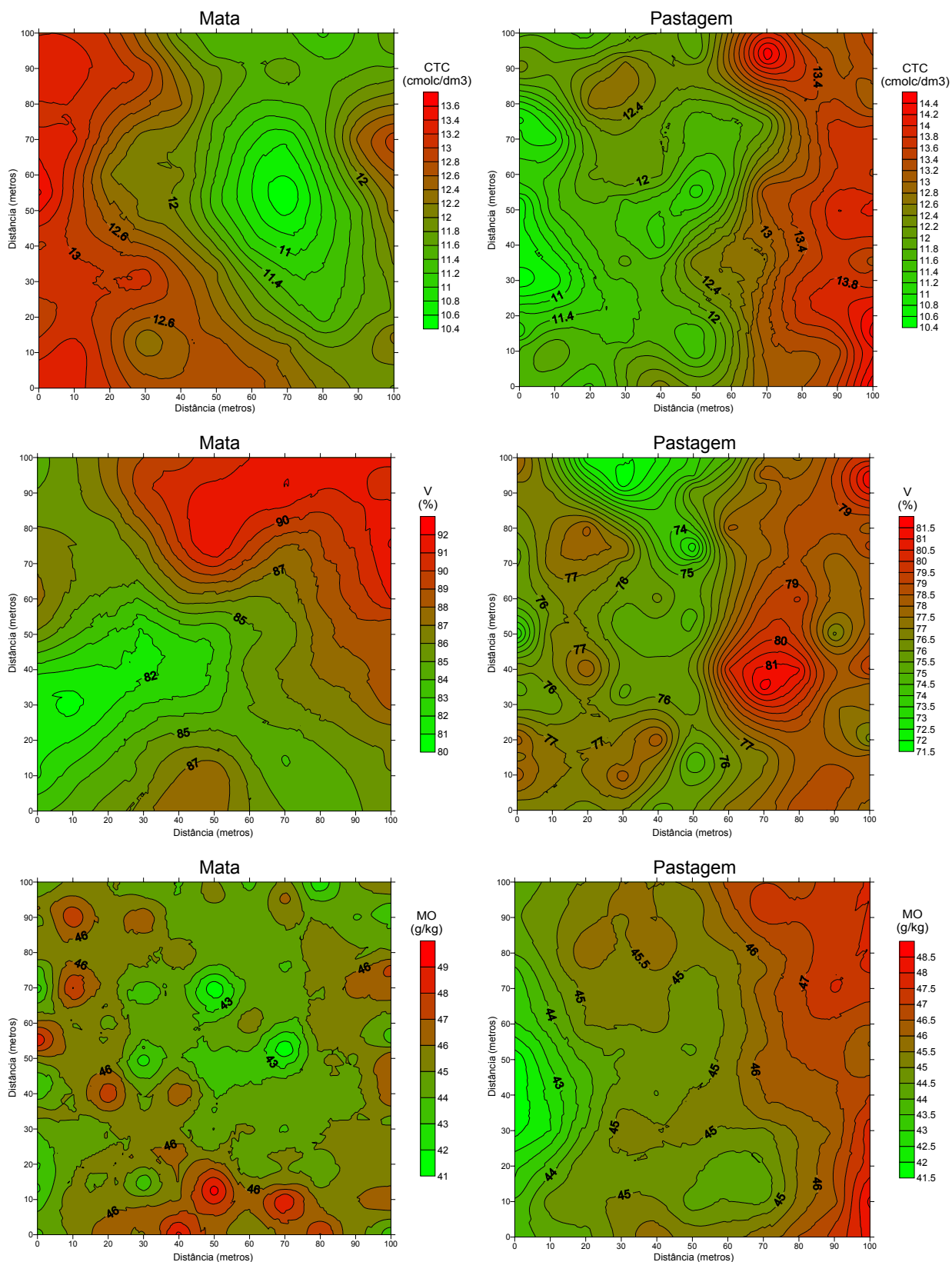


FIGURA 25 - Mapas da distribuição espacial dos atributos CTC, V e MO da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

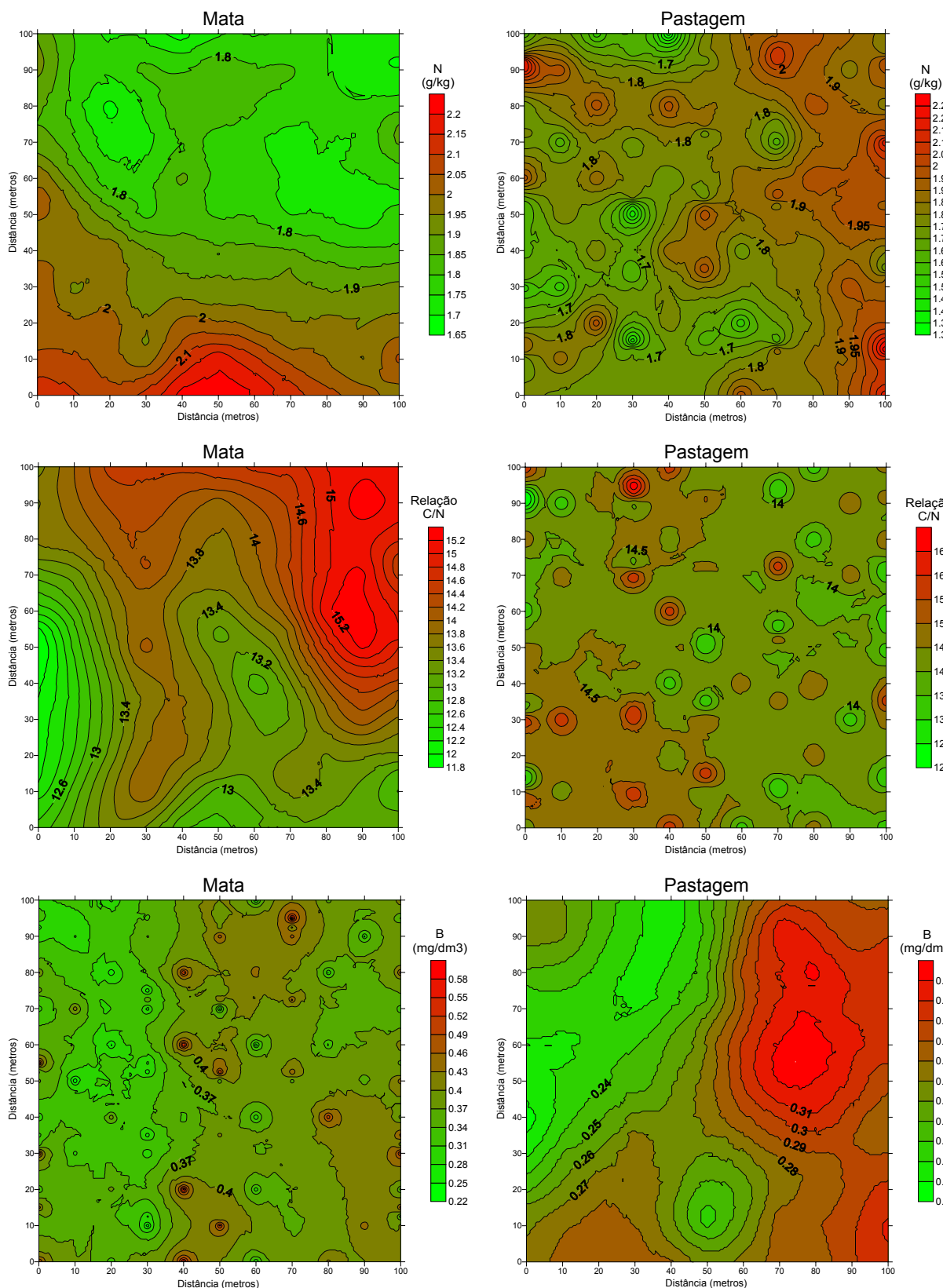


FIGURA 26 - Mapas da distribuição espacial dos atributos N, C/N e B da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

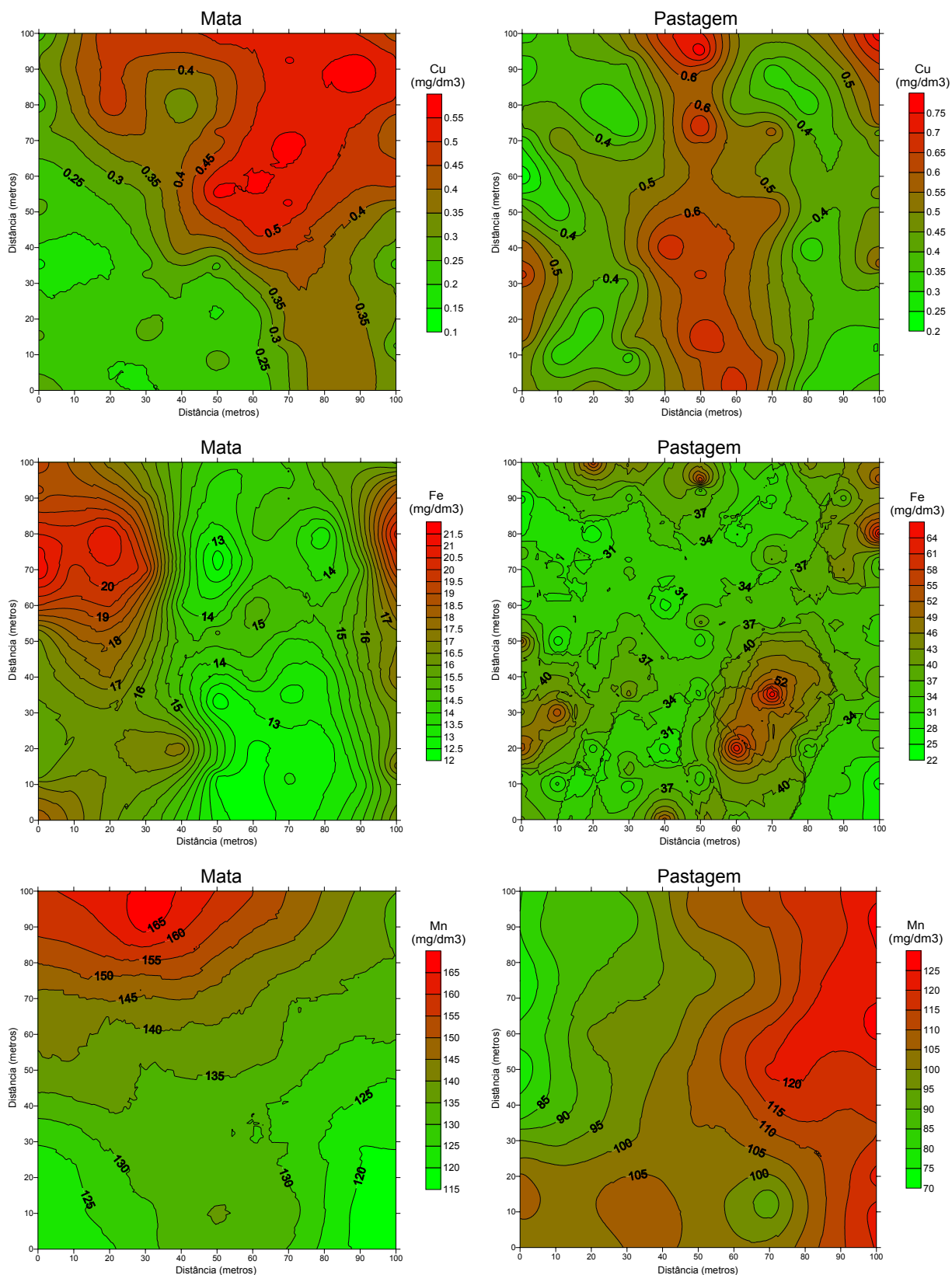


FIGURA 27 - Mapas da distribuição espacial dos atributos Cu, Fe e Mn da camada de 0-20 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

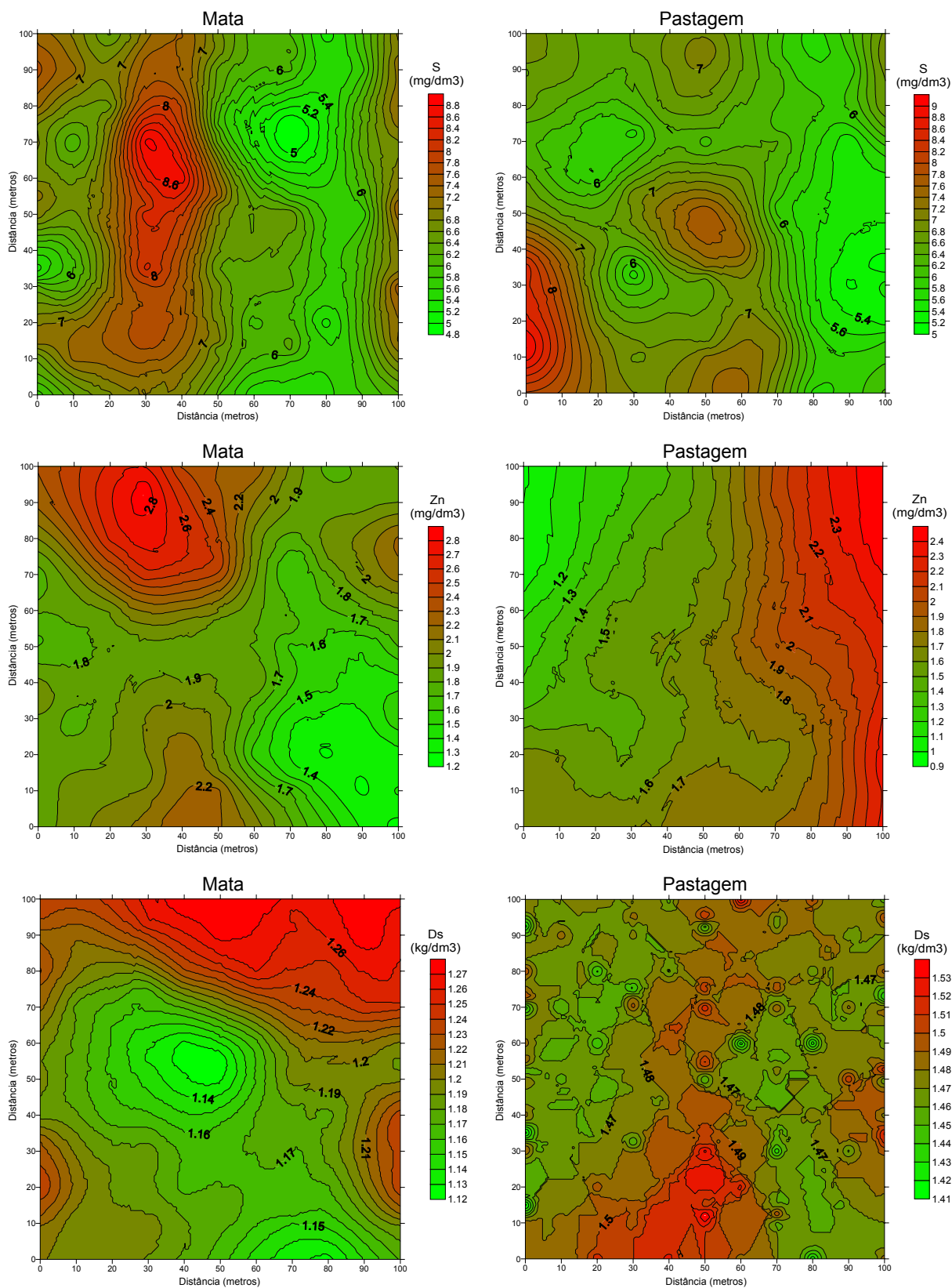


FIGURA 28 - Mapas da distribuição espacial dos atributos S e Zn da camada de 0-20 cm e Ds da camada de 5-10 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

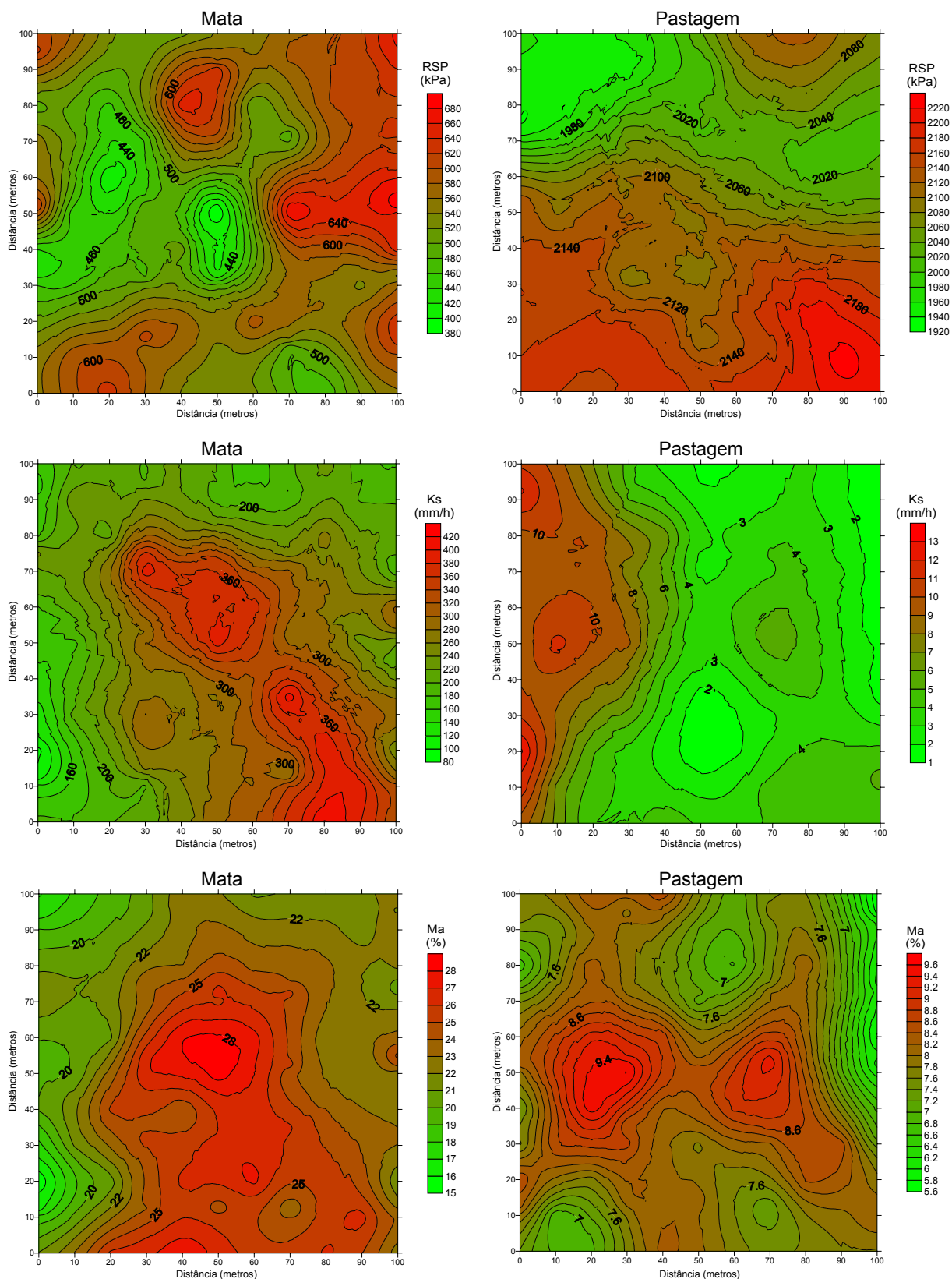


FIGURA 29 - Mapas da distribuição espacial dos atributos RSP, Ks e Ma da camada de 5-10 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

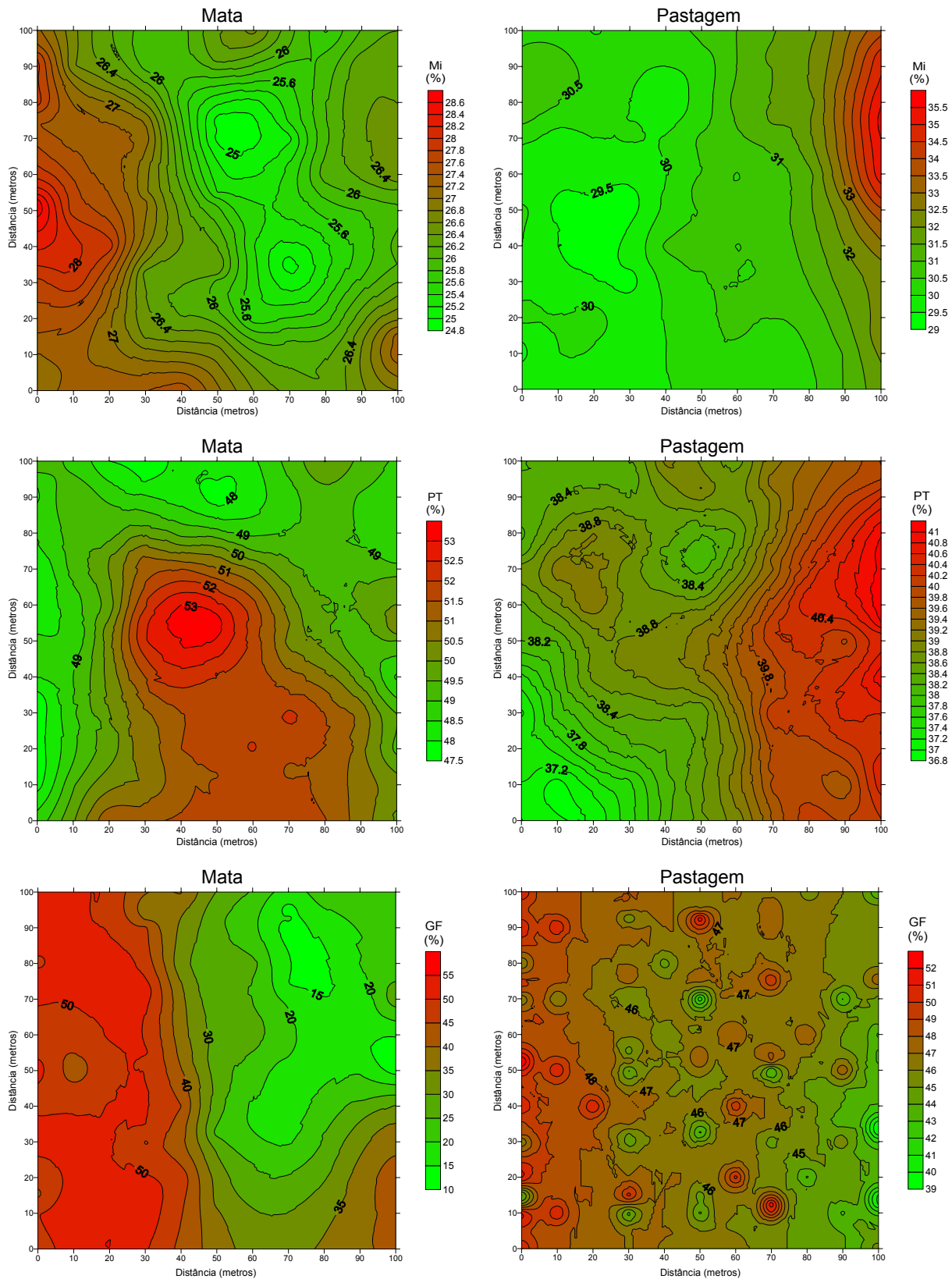


FIGURA 30 - Mapas da distribuição espacial dos atributos Mi, PT e GF da camada de 5-10 cm do solo sob mata e do solo sob pastagem.

(1999) afirmaram que, em áreas aparentemente homogêneas, a variabilidade espacial pode ser considerável e a análise estatística clássica somente permite caracterizar essa variabilidade. Por outro lado, a geoestatística permite detectar a existência de uma estrutura ou de organização na distribuição espacial dos parâmetros e a partir daí, com a krigagem, é possível mapear e identificar no campo os locais e suas respectivas representações de valores. Neste sentido, a obtenção dos mapas dos atributos do solo sob mata e do solo sob pastagem foi de grande importância, pois permitiu detalhar as alterações ocorridas.

Tanto a variografia das variáveis originais, como o procedimento para retirada de tendência e modelagem do resíduo, foram, em geral, eficientes para a obtenção dos mapas, com exceção do pH e B na mata e da Ds na pastagem. Estes atributos, conforme mostram as Figuras 17, 19 e 21 e os Quadros 15 e 16, apresentaram efeito pepita puro, ou seja, ausência de um modelo de distribuição espacial. Isto pode ser evidenciado pelos valores nulos do R^2 do semivariograma e pelos R^2 ajustados na validação cruzada, que foram externamente baixos e, na maioria, não-significativos em nível de 5% de probabilidade, com valores de 0,00, 1,60 e 3,40%, para o pH e B na mata e Ds na pastagem, respectivamente. Optou-se, nestes casos, pela interpolação com o inverso da distância (IDW). Porém, ressalta-se que foi limitante a utilização dos mapas obtidos por este processo de interpolação, sendo justificável em decorrência de que os procedimentos utilizados necessitavam dos mapas de cada atributo e por de se estar testando uma metodologia para obtenção de novas formas de estudo da degradação do solo.

Na obtenção dos mapas dos atributos que foram variografados a partir de seus valores originais, nenhuma transformação foi realizada na tentativa de se obter distribuição normal, como ocorreu em alguns estudos (TSEGAYE e HILL, 1998a; COUTO et al., 1997). Isto se justifica, uma vez que não é pressuposição dos fundamentos da geoestatística as variáveis terem distribuição normal e porque se objetivou a obtenção dos mapas das variáveis originais, embora, em alguns casos, essa transformação possa auxiliar na modelagem, porém, com o inconveniente de se produzir mapas com valores transformados, os quais não podem ser utilizados na metodologia adotada.

Com o objetivo de fornecer maiores informações a respeito de cada mapa obtido, foi realizada a estatística descritiva do conjunto de dados estimados, utilizados para sua

elaboração, cujos resultados encontram-se nos Quadros 17 e 18. Ressalta-se que a análise conjunta dos mapas e da sua estatística descritiva auxiliou a compreensão dos procedimentos adotados, além de permitir melhores conclusões a respeito da metodologia utilizada.

Observando-se os resultados dos Quadros 17 e 18 e comparando-os com os resultados dos Quadros 11 e 12, que mostram a estatística descritiva do conjunto de dados originais, percebeu-se que os valores dos parâmetros estatísticos foram alterados. Em geral, as médias dos atributos dos mapas foram superiores ao do conjunto dos dados originais, com exceção dos atributos PT e RSP no solo sob mata, e da CTC, Fe e Ma no solo sob pastagem, as quais foram menores, porém, muito próximas às dos valores originais. Em todos os casos, os mínimos foram maiores e os máximos e as amplitudes, menores, imprimindo, desta forma, coeficientes de variação menores para os valores estimados dos mapas em relação aos valores originais. Em alguns casos, houve considerável diminuição do coeficiente de variação, como o K no solo sob mata, que era de 87,62% e passou para 9,72%, e o Ks e o P no solo sob pastagem, que eram de 226,10% e 111,77% e passaram para 54,46% e 10,80%, respectivamente. Desta forma, os coeficientes de variação que anteriormente apresentaram grandes variações, passaram a apresentar, consideravelmente, menores variações. Assim, o coeficiente de variação passou a apresentar variação de valores entre 1,77% e 36,83% para o solo sob mata, e de 1,05% e 54,46% para o solo sob pastagem, sendo que anteriormente, os valores eram entre 5,75% e 87,62% para o solo sob mata, e 2,67% e 226,10% para o solo sob pastagem.

O fato do coeficiente de variação ter diminuído para todos os atributos, pode ser explicado em razão do procedimento adotado na técnica da validação cruzada, quando se eliminou-se pontos amostrais que apresentaram resíduos padronizados inferiores a -2 ou superiores a 2, obtidos da regressão linear entre os valores observados e estimados. Assim, pontos que apresentaram valores discrepantes foram eliminados, sendo invariavelmente desconsiderados os pontos extremos do conjunto de dados, tanto para valores mais altos como para valores mais baixos. Desta forma, os valores dos mínimos aumentaram e os valores dos máximos diminuíram, fazendo com que as amplitudes diminuíssem, levando, conseqüentemente, à redução dos coeficientes de variação. É interessante ressaltar que houve grande dispersão das variáveis originais, cujos valores se apresentaram de forma isolada na

QUADRO 17 - Estatística descritiva dos mapas da distribuição espacial dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob mata.

Atrib.	Unidade	NP	Resolução	Média	Min.	Max.	Ampl.	Med.	Desvio	Erro	CV
pH	-	40000	0,5	6,95	6,16	7,98	1,82	6,94	0,1227	0,0006	1,77
P	mg/dm ³	40000	0,5	1,69	0,93	2,15	1,22	1,73	0,2272	0,0011	13,42
K	mg/dm ³	40000	0,5	136,41	106,06	167,87	61,81	136,95	13,2518	0,0663	9,72
Ca	cmol _c /dm ³	40000	0,5	7,99	6,75	9,69	2,94	8,04	0,4913	0,0025	6,15
Mg	cmol _c /dm ³	40000	0,5	1,82	1,64	2,04	0,41	1,84	0,0790	0,0004	4,33
SB	cmol _c /dm ³	40000	0,5	10,39	9,02	12,37	3,36	10,34	0,5431	0,0027	5,23
CTC	cmol _c /dm ³	40000	0,5	12,13	10,45	13,63	3,19	12,10	0,7208	0,0036	5,94
V	%	40000	0,5	86,40	80,69	92,10	11,41	85,94	2,8241	0,0141	3,27
MO	g/kg	40000	0,5	45,09	41,18	49,34	8,16	45,04	0,9929	0,0050	2,20
N	g/kg	40000	0,5	1,87	1,68	2,23	0,55	1,84	0,1195	0,0006	6,38
C/N	-	40000	0,5	13,76	11,80	15,32	3,52	13,72	0,7247	0,0036	5,26
B	mg/dm ³	40000	0,5	0,37	0,23	0,60	0,37	0,38	0,0352	0,0002	9,50
Cu	mg/dm ³	40000	0,5	0,37	0,13	0,59	0,46	0,37	0,1148	0,0006	31,39
Fe	mg/dm ³	40000	0,5	15,59	12,19	21,51	9,32	15,20	2,1298	0,0106	13,66
Mn	mg/dm ³	40000	0,5	136,49	115,39	167,64	52,25	134,16	10,9166	0,0546	8,00
S	mg/dm ³	40000	0,5	6,61	4,80	8,84	4,03	6,55	0,8058	0,0040	12,19
Zn	mg/dm ³	40000	0,5	1,93	1,26	2,84	1,58	1,89	0,3413	0,0017	17,68
Ds	kg/dm ³	40000	0,5	1,20	1,12	1,28	0,16	1,19	0,0379	0,0002	3,17
RSP	kPa	40000	0,5	542,47	387,83	695,57	307,74	546,85	58,4959	0,2925	10,78
Ks	mm/h	40000	0,5	268,07	95,39	421,17	325,78	267,57	63,3766	0,3169	23,64
Ma	%	40000	0,5	23,55	15,32	29,00	13,68	23,56	2,3847	0,0119	10,12
Mi	%	40000	0,5	26,37	24,87	28,70	3,82	26,27	0,7805	0,0039	2,96
PT	%	40000	0,5	50,21	47,65	53,30	5,65	50,04	1,3346	0,0067	2,66
GF	%	40000	0,5	35,16	10,79	55,05	44,26	34,49	12,9480	0,0647	36,83

Atrib. - atributo do solo; NP - número de pixels; Min. - mínimo; Max. - máximo; Ampl. - amplitude; Med. - mediana; Desvio - desvio-padrão; CV - coeficiente de variação.

QUADRO 18 - Estatística descritiva dos mapas da distribuição espacial dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob pastagem.

Atrib.	Unidade	NP	Resolução	Média	Min.	Max.	Ampl.	Med.	Desvio	Erro	CV
pH	-	40000	0,5	6,54	6,38	6,72	0,34	6,52	0,0774	0,0004	1,18
P	mg/dm ³	40000	0,5	0,71	0,59	1,14	0,54	0,70	0,0768	0,0004	10,80
K	mg/dm ³	40000	0,5	132,87	92,78	155,55	62,77	136,26	12,7967	0,0640	9,63
Ca	cmol _c /dm ³	40000	0,5	7,64	5,94	9,78	3,84	7,42	0,6701	0,0034	8,78
Mg	cmol _c /dm ³	40000	0,5	1,42	1,20	1,69	0,49	1,40	0,1183	0,0006	8,34
SB	cmol _c /dm ³	40000	0,5	9,50	7,64	11,77	4,13	9,27	0,8268	0,0041	8,70
CTC	cmol _c /dm ³	40000	0,5	12,38	10,46	14,55	4,09	12,14	0,8792	0,0044	7,10
V	%	40000	0,5	76,98	71,72	81,69	9,97	76,97	1,6436	0,0082	2,14
MO	g/kg	40000	0,5	45,32	41,61	48,62	7,01	45,19	1,1894	0,0059	2,62
N	g/kg	40000	0,5	1,81	1,33	2,29	0,96	1,81	0,1035	0,0005	5,72
C/N	-	40000	0,5	14,34	12,02	16,90	4,89	14,30	0,3954	0,0020	2,76
B	mg/dm ³	40000	0,5	0,27	0,22	0,33	0,11	0,27	0,0280	0,0001	10,30
Cu	mg/dm ³	40000	0,5	0,47	0,21	0,79	0,58	0,46	0,0966	0,0005	20,41
Fe	mg/dm ³	40000	0,5	36,91	23,18	66,02	42,84	35,77	5,6411	0,0282	15,28
Mn	mg/dm ³	40000	0,5	103,82	74,97	126,97	52,00	103,59	11,0804	0,0554	10,67
S	mg/dm ³	40000	0,5	6,52	5,14	9,00	3,86	6,49	0,6752	0,0034	10,36
Zn	mg/dm ³	40000	0,5	1,71	0,98	2,50	1,52	1,66	0,3234	0,0016	18,91
Ds	kg/dm ³	40000	0,5	1,48	1,42	1,53	0,12	1,47	0,0154	0,0001	1,05
RSP	kPa	40000	0,5	2090,81	1939,32	2228,38	289,07	2102,06	70,0244	0,3501	3,35
Ks	mm/h	40000	0,5	5,09	1,05	13,14	12,09	4,11	2,7693	0,0138	54,46
Ma	%	40000	0,5	7,94	5,66	9,60	3,94	7,98	0,6700	0,0034	8,44
Mi	%	40000	0,5	30,73	29,23	35,66	6,44	30,46	1,1448	0,0057	3,73
PT	%	40000	0,5	39,03	36,90	41,14	4,24	38,86	0,9170	0,0046	2,35
GF	%	40000	0,5	46,63	39,24	52,94	13,69	46,66	1,5225	0,0076	3,27

Atrib. - atributo do solo; NP - número de pixels; Min. - mínimo; Max. - máximo; Ampl. - amplitude; Med. - mediana; Desvio - desvio-padrão; CV - coeficiente de variação.

distribuição de frequência. Como no procedimento utilizado foram eliminados os valores que em muito destoaram do conjunto de dados, estes pontos foram eliminados. Nestes casos, a alteração da média foi considerável, como o K que, no solo sob mata, apresentou média inicial de 184,87 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e depois passou para 136,41 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, e no solo sob pastagem, que era de 153,93 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e passou para 132,87 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$.

Quando se eliminaram os pontos a partir dos critérios descritos anteriormente, a porcentagem de valores dentro do intervalo de confiança da média com 95% de probabilidade aumentou. Conforme MOUSTAFA (2000), quando os valores estimados na krigagem estiverem dentro deste intervalo de confiança, implica dizer que esta técnica de interpolação produziu relativamente estimativas com variância mínima e, neste caso, produziu mapas com maior acurácia. Assim, espera-se que os mapas produzidos utilizando-se este procedimento tenham sido obtidos com melhor qualidade, caso esse não fosse utilizado. Por outro lado, a eliminação de pontos não pode ser elevada, no sentido de sobrar quantidade que ao final prejudique a modelagem e as estimativas da krigagem. Neste sentido, foi utilizado como critério a eliminação de no máximo 30% do total de pontos amostrais. Segundo STEIN (1995), a eliminação de pontos pode ocorrer até o ponto em que se obtenha no mínimo 30 pares de pontos para cada distância considerada e que a distância máxima no semivariograma não seja inferior a 50% da maior distância encontrada. Assim, prevendo esta eliminação de pontos, foram utilizados 121 pontos amostrais, o que foi superior aos 100 pontos amostrais necessários para se variografar variáveis em pequena extensão de área, segundo WEBSTER e OLIVER (1990). Desta forma, mesmo se eliminando pontos amostrais, sobraram pontos em quantidade suficiente para a confecção do semivariograma e posterior krigagem com razoável confiabilidade. Com isto, o procedimento tendeu a homogeneizar o novo conjunto de dados, favorecendo a obtenção de valores dos parâmetros estatísticos mais confiáveis.

Em geral, notou-se que as estruturas das distribuições espaciais das variáveis foram diferentes quando se comparou o solo sob mata com o solo sob pastagem. Uma explicação pode residir no fato de as áreas serem distintas e, assim, apresentarem estrutura espacial também distintas, sendo esta diferença em função do tempo de uso e da localização geográfica, o que estaria de acordo com HOOSBEEK (1998). Na pastagem, sua distribuição espacial foi atribuída a esses dois fenômenos, ou seja, foi esperado que sua utilização tenha alterado os valores dos atributos químicos e físicos e a localização geográfica da área tenha

sido também responsável pelo padrão espacial de algumas propriedades, como, por exemplo, a textura que certamente influenciou algumas das propriedades estudadas. Esta colocação vem de encontro com TSEGAYE e HILL (1998b), que comentam que as propriedades químicas e físicas sofrem alterações em função do material de origem e do relevo, mas também do manejo e uso do solo. Eles citam, ainda, que diversos autores afirmam que o manejo do solo influencia na dependência espacial das propriedades. Assim, comparando-se a mata e a pastagem, era esperada maior variabilidade sistemática no solo sob mata em relação ao solo sob pastagem, uma vez que em sistemas naturais, a variabilidade é mais dependente dos processos de formação do solo, os quais são estreitamente relacionados com os processos físicos.

4.3. Diagnóstico quantitativo da degradação do solo sob pastagem

A partir dos mapas dos atributos, contidos nas Figuras 23 a 30, foram obtidos os mapas de perdas individuais, que se encontram nas Figuras 31 a 34, os quais representam a exportação de elementos nutrientes ou a diminuição dos valores dos atributos físicos e químicos do solo sob pastagem, em relação ao solo sob mata. Esses mapas são interessantes porque possibilitam localizar áreas com maiores e menores perdas e, desta forma, detectar geograficamente os locais que necessitam de maiores cuidados. Estas colocações estão de acordo com ALEGRE e LARA (1991) e MORAES e LUSTOSA (1997), que comentam que devido à alta variabilidade, as propriedades físicas e químicas do solo podem ser mais bem entendidas a partir da obtenção de mapas da variabilidade espacial, o que permite o melhor conhecimento das condições do solo.

Para melhor visualização dos resultados, foram quantificadas a extensão de áreas com valores positivos, negativos e nulos, dos mapas de perdas individuais contidos nas Figuras 31 a 34, cujos resultados encontram-se no Quadro 19. Verificou-se que para os atributos químicos, com exceção do Mg, P e V, foram encontrados valores negativos de perdas, conforme mostram o Quadro 19 e as Figuras 31 a 34. Em alguns casos, esses valores negativos encontraram-se distribuídos geograficamente em grande proporção de área, como no caso dos atributos K, Ca, CTC, SB, MO, N, Cu, Fe, S e Zn (Figuras 31 a 33). Isto demonstra inicialmente, em uma análise pura e simples, que nesses locais houve ganho de nutrientes na

QUADRO 19- Quantificação de áreas com valores de perdas positivos, negativos e nulos dos mapas da distribuição espacial das perdas dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob pastagem.

Atributo	Área com valores positivos		Área com valores negativos e nulo		Total (valores positivos + negativos e nulo)	
	(m ²)	(%)	(m ²)	(%)	(m ²)	(%)
pH	9984,25	99,84	15,75	0,16	10000,00	100,00
P	10000,00	100,00	0,00	0,00	10000,00	100,00
K	6290,00	62,90	3710,00	37,10	10000,00	100,00
Ca	6371,25	63,71	3628,75	36,29	10000,00	100,00
Mg	10000,00	100,00	0,00	0,00	10000,00	100,00
SB	7795,25	77,95	2204,75	22,05	10000,00	100,00
CTC	4709,00	47,09	5291,00	52,91	10000,00	100,00
V	10000,00	100,00	0,00	0,00	10000,00	100,00
MO	4178,75	41,79	5821,25	58,21	10000,00	100,00
N	5665,50	56,66	4334,50	43,35	10000,00	100,00
C/N	7669,25	76,69	2330,75	23,31	10000,00	100,00
B	9991,50	99,92	8,50	0,09	10000,00	100,00
Cu	2757,25	27,57	7242,75	72,43	10000,00	100,00
Fe	0,00	0,00	10000,00	100,00	10000,00	100,00
Mn	9868,50	98,69	131,50	1,32	10000,00	100,00
S	5467,50	54,68	4532,50	45,33	10000,00	100,00
Zn	6339,00	63,39	3661,00	36,61	10000,00	100,00
Ds	10000,00	100,00	0,00	0,00	10000,00	100,00
RSP	10000,00	100,00	0,00	0,00	10000,00	100,00
Ks	10000,00	100,00	0,00	0,00	10000,00	100,00
Ma	10000,00	100,00	0,00	0,00	10000,00	100,00
Mi	0,00	0,00	10000,00	100,00	10000,00	100,00
PT	10000,00	100,00	0,00	0,00	10000,00	100,00
GF	2855,25	28,55	7144,75	71,45	10000,00	100,00

área com solo sob pastagem em relação a área com solo sob mata. Por outro lado, observou-se que existiram valores positivos de perdas distribuídos geograficamente em grande proporção de área, chegando mesmo a ocupar toda a extensão de área, como no caso dos atributos pH, P, Mg, V, B e Mn (Figuras 31 a 33). Desta forma, inicialmente houve um ganho na análise das informações, ou seja, a análise espacial permitiu detectar sítios com maiores e menores valores de perdas, permitindo que possam ser dispensados maiores cuidados para os locais mais problemáticos, fato que não foi possível quando se trabalhou com a estatística clássica.

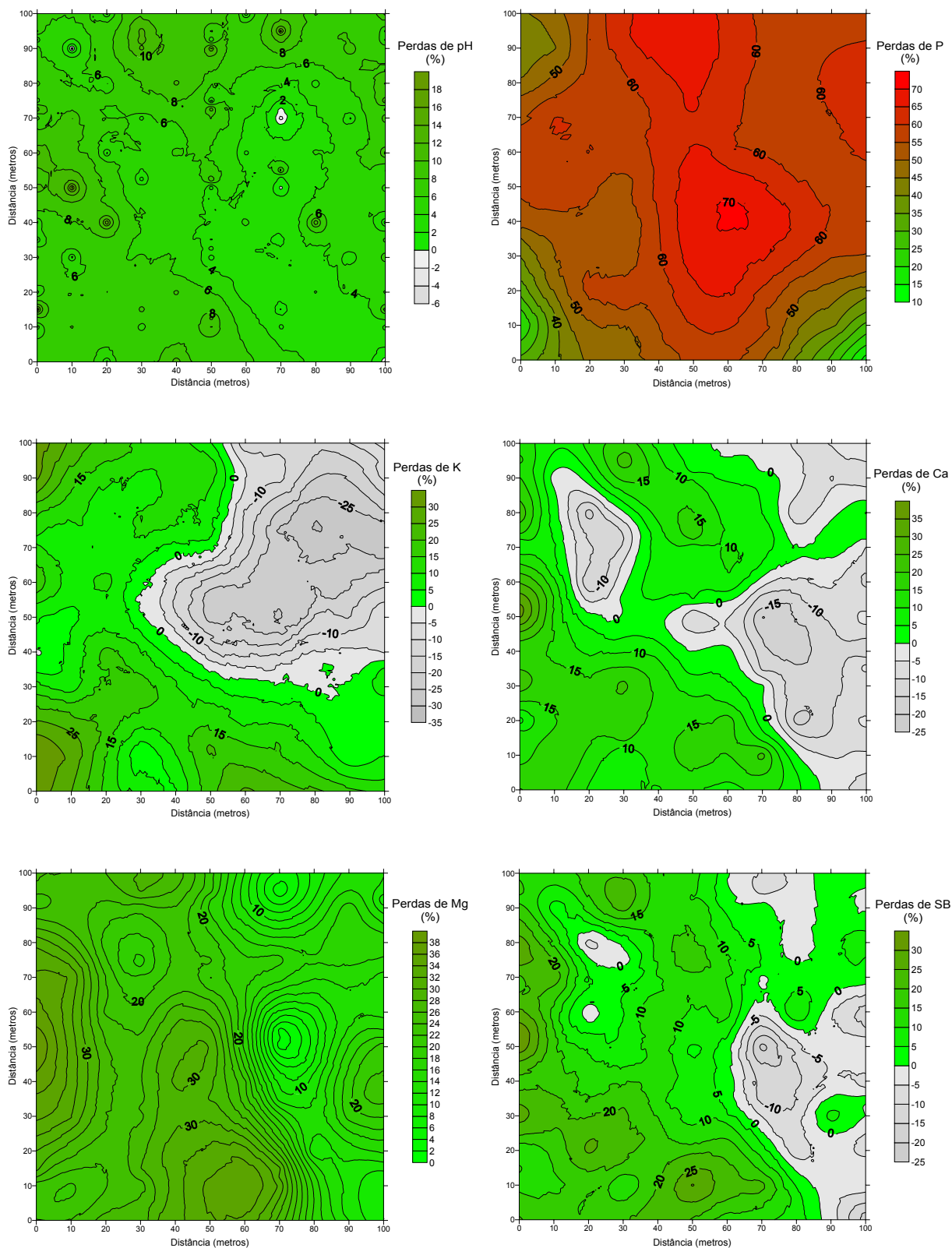


FIGURA 31 - Mapas da distribuição espacial das perdas dos atributos pH, P, K, Ca, Mg e SB do solo sob pastagem.

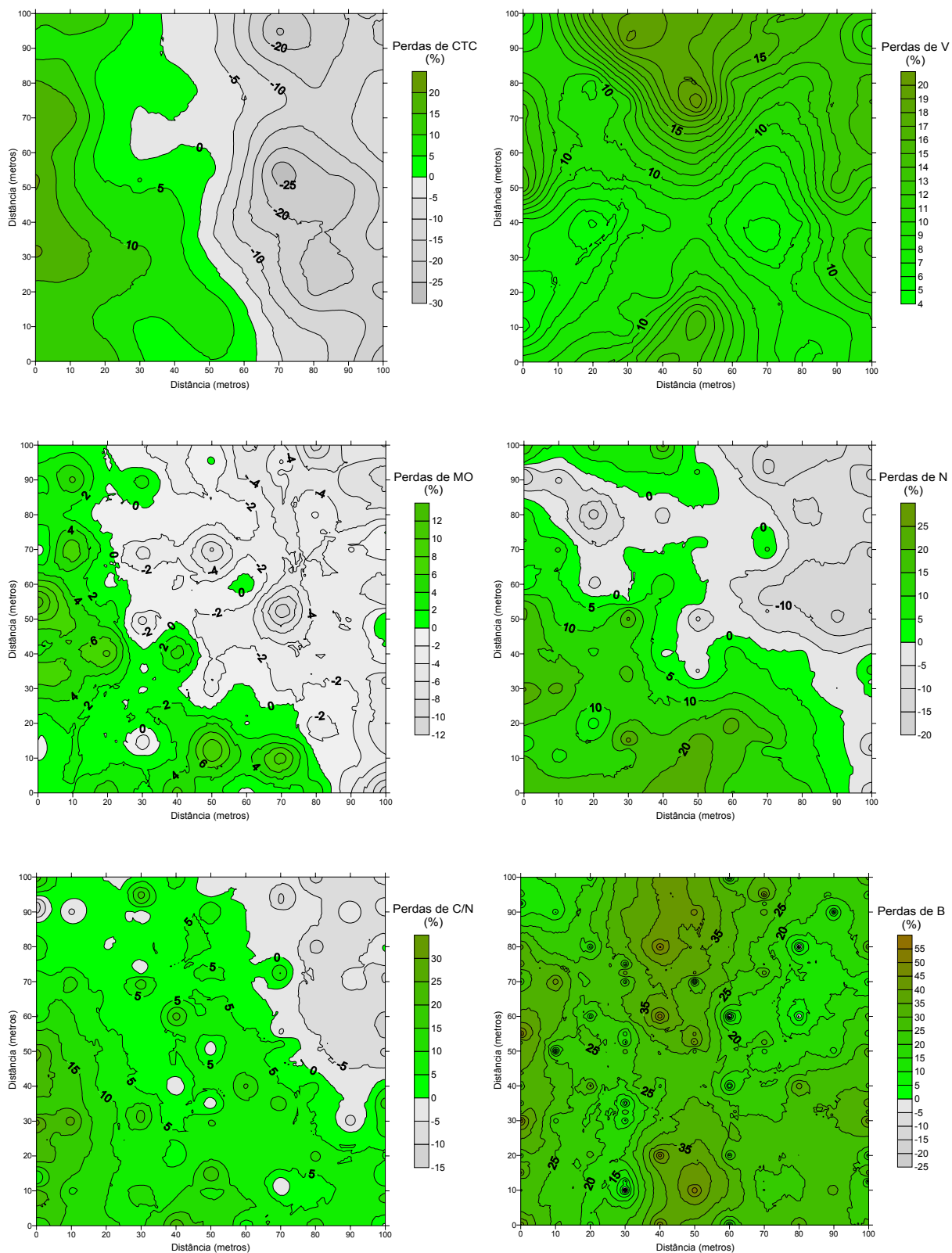


FIGURA 32 - Mapas da distribuição espacial das perdas dos atributos CTC, V, MO, N, C/N e B do solo sob pastagem.

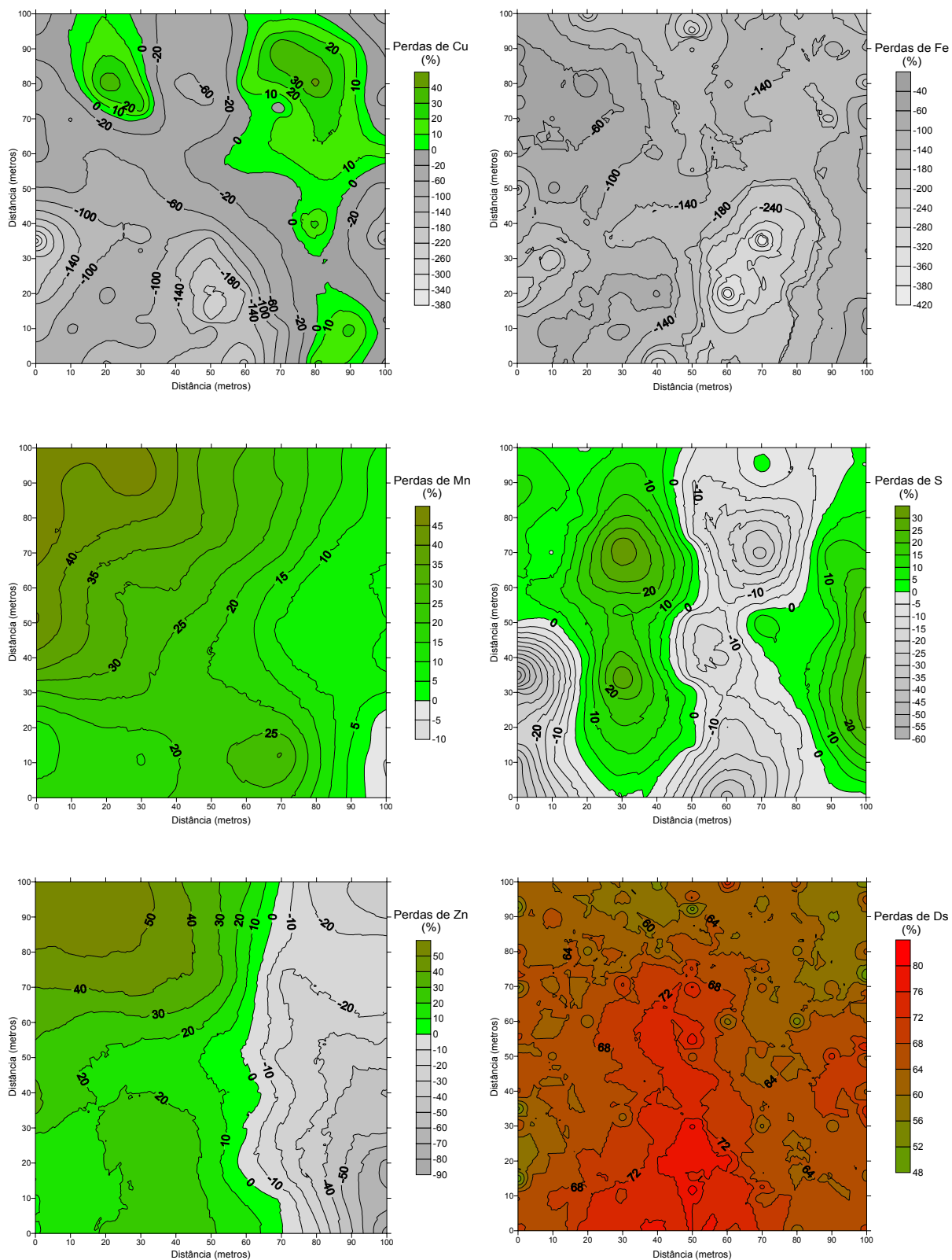


FIGURA 33 - Mapas da distribuição espacial das perdas dos atributos Cu, Fe, Mn, S, Zn e Ds do solo sob pastagem.

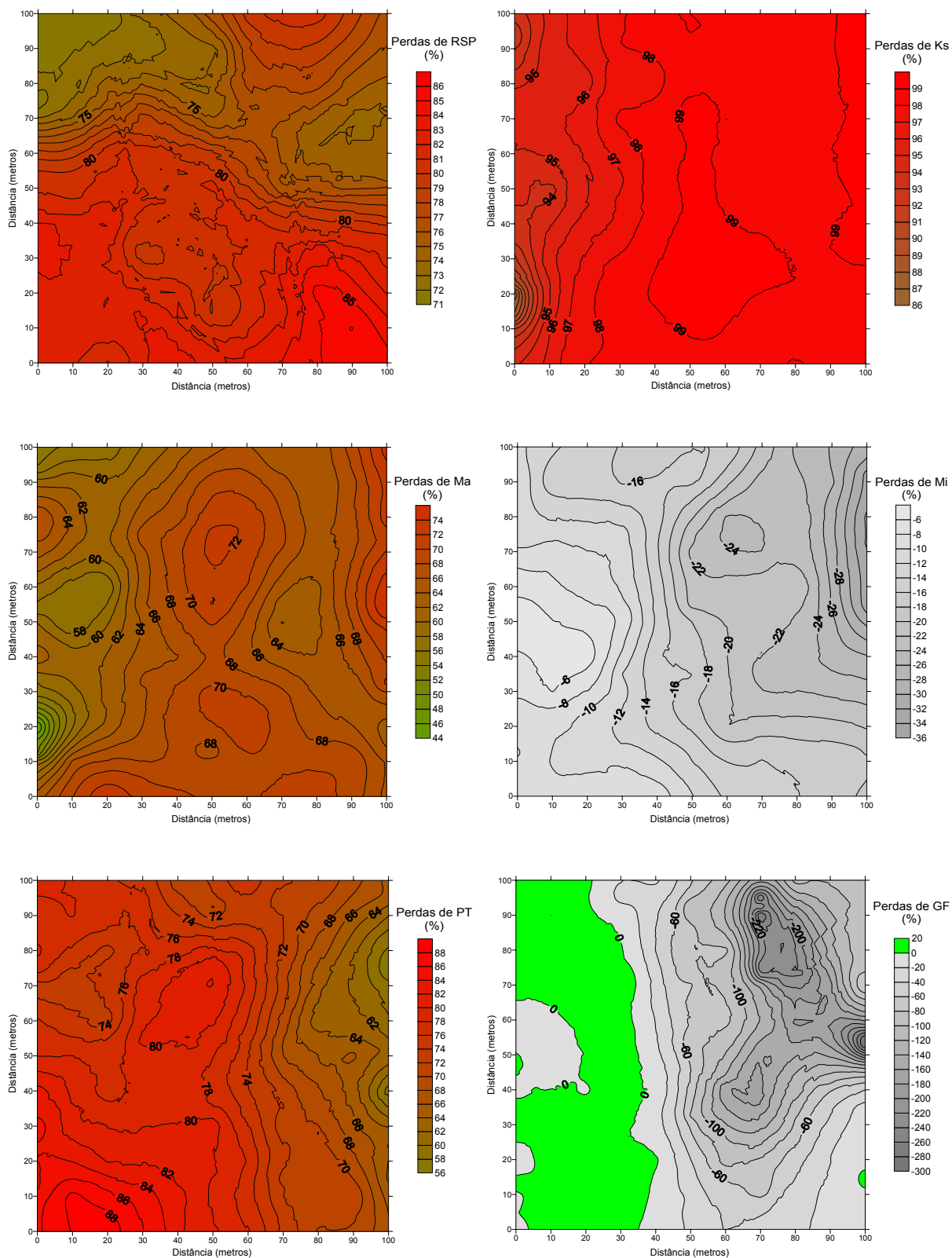


FIGURA 34 - Mapas da distribuição espacial das perdas dos atributos RSP, Ks, Ma, Mi, PT e GF do solo sob pastagem.

A presença de valores negativos nos mapas de perdas para os atributos químicos demonstrou haver ganho de nutrientes na pastagem. SMITH e BASTOS (1984) e CORREA e REICHARDT (1995) atribuem este ganho à elevação do teor de elementos nutrientes no solo sob pastagem, em razão das queimadas, que usualmente são utilizadas para limpeza da área, que fazem com que certos sítios apresentem acúmulo de elementos. Como no presente caso, o uso do fogo foi utilizado para limpeza da área, ele pode ser uma explicação lógica para tal resultado, uma vez que na área nunca foi utilizada qualquer forma de adubação. Outra explicação para os resultados negativos das perdas pode ser em razão da própria característica da área com solo sob pastagem, que possui padrão distinto de distribuição espacial em relação ao solo sob mata. Assim, é de se esperar que nestes locais, as perdas tenham ocorrido, apesar da presente metodologia não poder detectá-las. Estas perdas somente poderiam ser detectadas à medida que se partisse de um estudo que fosse realizado em uma mesma área geográfica, sem o uso do fogo para limpeza inicial, monitorando-a desde a sua abertura e ao longo dos anos, o que é praticamente inviável para estudos de curta duração ou que queiram apenas verificar as tendências nas alterações ocorridas no solo sob pastagem.

A utilização de áreas geograficamente diferentes no presente estudo se justificou no estudo de DIAS e GRIFFITH (1998), que comentam que o valor de referência para a comparação passa a ser o ponto principal no processo de avaliação da degradação e sempre que possível não se deve fazer uso de padrões fixos e sim, fazê-lo utilizando-se áreas próximas em que não tenha havido intervenção antrópica. Isto é reforçado por CORREA e REICHARDT (1995) que colocam que uma alternativa é a estimativa mais aproximada das tendências das alterações antrópicas do solo obtida por meio da seleção de um solo virgem e um sob cultivo, de modo que pudessem ser comparados, devendo, para isto, que ambos fossem bastante semelhantes no que diz respeito à sua classificação e situação topográfica, uma vez que os estudos utilizando-se um solo virgem e, a partir daí, submetendo-o às operações agrícolas desejadas e, periodicamente, analisando os parâmetros escolhidos, apesar de mais eficientes, são limitantes, em razão do tempo gasto para a realização do estudo. Com isto, reforça-se que a presente metodologia, utilizando áreas geograficamente diferentes, teve como objetivo auxiliar o estudo da degradação e apresentar as tendências das alterações espaciais a que estão sujeitas a área com solo sob pastagem.

Para obtenção dos mapas de perdas individuais (Figuras 31 a 34) o valor limite utilizado foi sempre relativo ao solo sob mata, sendo que para os atributos Ds, PT e RSP, foi necessário estabelecer uma forma diferenciada de obtenção desse valor em relação ao restante dos atributos do solo, uma vez que nestes casos, foi necessário estabelecer o limite máximo no qual fosse atribuída uma perda de 100%. Assim, como descrito em materiais e métodos, foram adotados como valor limite $1,618 \text{ kg/dm}^3$, 35,28% e 2.500 kPa, para a Ds, PT e RSP, respectivamente. No caso da RSP, o valor limite de 2.500 kPa foi superior ao estabelecido pela pesquisa, conforme TORMENA (2002), que é de 2.000 kPa. Isto se justifica, porque a pastagem é uma planta menos sensível à compactação do solo, tolerando condições mais adversas. Isto vem ao encontro com o trabalho de MANTOVANI (2002), que afirma que é difícil estabelecer limite para as propriedades do solo em relação à compactação, uma vez que dependem das condições presentes no local estudado.

Ressalta-se que a adoção dos valores limites foi feita com base em análises rotineiras de determinações de propriedades do solo. Portanto, com o procedimento utilizado para obtenção dos valores limites da Ds, PT e RSP, foi possível prosseguir a análise da distribuição espacial da degradação do solo.

Com a finalidade de se obter maiores informações na análise, foram realizadas a estatística descritiva dos mapas de perdas individuais, que constam no Quadro 20. Em primeira análise, foi observado que os valores mínimos para quase todos os atributos químicos foram negativos. Para os atributos físicos, esses valores foram sempre positivos e elevados. Os máximos se apresentaram altos para os atributos físicos e intermediários para os atributos químicos, com exceção do P, que também foi elevado. A média foi positiva para a maioria dos atributos, com exceção da CTC, MO, Cu, Fe e GF. Assim, esses resultados, juntamente com os mapas apresentados, apontaram que a metodologia, apesar de utilizar áreas geograficamente diferentes, foi capaz de fornecer resultados que mostraram as tendências das perdas na área com solo sob pastagem, ou seja, por meio dos mapas foi possível uma análise detalhada das alterações dos atributos químicos e físicos do solo sob pastagem. Ressalta-se que a seleção das áreas para estudo foi baseada na menor diferença possível que poderia haver de solos e fatores ambientais entre elas, no sentido de tornar mais eficiente a análise comparativa. Isto é reforçado à medida que foi possível detectar locais com valores positivos de perdas, mostrando as tendências das alterações na área com solo sob pastagem.

Percebeu-se, conforme o Quadro 20, que os coeficientes de variação foram, em geral, de médios a altos, com valor mínimo de 1,70% para o Ks e de 6060,81% para o S. Coeficientes de variação médios a altos demonstram média a alta variação de valores em torno da média e, desta forma, as perdas podem ser mais bem representadas pelos mapas de distribuição espacial do que simplesmente pela média. A análise utilizando-se somente a média, neste caso, é limitada e não acrescenta ganho na análise. Desta forma, a utilização da média é interessante quando fizer parte de uma análise conjunta dos dados, somando-se a análise clássica e a análise da distribuição espacial dos atributos do solo, como realizado no presente estudo.

Analisando-se os atributos físicos, verificou-se que, com exceção da Mi e do GF, todos apresentaram altos valores de perdas, sendo em média de 70 a 80%, apresentando mínimos sempre positivos e altos, conforme mostram o Quadro 20 e as Figuras 31 a 34. Isto demonstrou a alta degradação física da área com solo sob pastagem. Assim, mesmo sendo utilizadas áreas geograficamente diferentes na análise, devido à alta degradação dos atributos físicos na pastagem, essa foi detectada de forma intensa.

Com a finalidade de se ter um ganho na análise das informações e na tentativa de se obter níveis que representaram o fenômeno de degradação, foram obtidos 3 mapas com os níveis de degradação, sendo um físico, um químico e um geral, este último agregou as informações dos dois primeiros. Para isto houve a necessidade de selecionar os atributos que melhor representaram a área com solo sob pastagem em termos de degradação. Dessa forma, foram escolhidos 10 atributos, sendo cinco físicos e cinco químicos. Os atributos físicos selecionados foram a Ds, Ks, RSP, Ma e PT, e os químicos foram o P, V, C/N, B e Mn. A escolha de 10 atributos foi porque na análise foi necessário número idêntico de variáveis físicas e químicas, ou seja, o peso do grupo dos atributos físicos teve que ser o mesmo peso dos atributos químicos e isto foi conseguido trabalhando-se com cinco variáveis físicas e cinco químicas.

A escolha dos atributos Ds, Ks, RSP, Ma e PT, baseou-se no critério destes terem sido os que melhor representaram as condições físicas do solo e que, segundo MORAES e LUSTOSA (1997), são os principais parâmetros utilizados para caracterizar a camada compactada do solo. Os atributos Mi e GF não foram selecionados, em razão de apresentarem mapas de perdas com valores negativos em grande proporção (Figura 34).

QUADRO 20 - Estatística descritiva dos mapas da distribuição espacial das perdas individuais dos atributos químicos (camada de 0-20 cm) e físicos (camada de 5-10 cm) do solo sob pastagem.

Atrib.	Unid.	NP	Resol.	Média	Min.	Max.	Ampl.	Mediana	Desvio	Erro	CV
pH	%	40000	0,5	5,83	-4,63	18,63	23,26	5,96	2,1376	0,0107	36,65
P	%	40000	0,5	57,11	12,85	71,13	58,28	58,40	8,1420	0,0407	14,26
K	%	40000	0,5	1,57	-30,73	34,77	65,49	5,41	14,5206	0,0726	924,14
Ca	%	40000	0,5	4,03	-20,20	36,60	56,80	4,86	10,0017	0,0500	247,88
Mg	%	40000	0,5	21,99	1,44	39,90	38,46	22,97	7,8822	0,0394	35,85
SB	%	40000	0,5	8,29	-21,02	34,47	55,49	8,94	9,6391	0,0482	116,30
CTC	%	40000	0,5	-2,65	-28,00	21,03	49,04	-0,71	11,7606	0,0588	444,29
V	%	40000	0,5	10,80	4,16	20,64	16,48	10,15	3,3729	0,0169	31,22
MO	%	40000	0,5	-0,55	-11,83	13,34	25,17	-0,97	3,4593	0,0173	624,07
N	%	40000	0,5	2,88	-17,95	26,88	44,83	1,74	9,3427	0,0467	324,43
C/N	%	40000	0,5	4,52	-13,07	31,77	44,84	4,72	6,7466	0,0337	149,42
B	%	40000	0,5	26,28	-24,00	57,14	81,14	26,26	7,5314	0,0377	28,65
Cu	%	40000	0,5	-44,49	-3465,38	41,79	407,18	-26,88	59,7209	0,2986	134,24
Fe	%	40000	0,5	-142,71	-417,85	-20,66	397,19	-138,32	57,2320	0,2862	40,10
Mn	%	40000	0,5	23,16	-5,58	49,90	55,49	22,25	11,9964	0,0600	51,80
S	%	40000	0,5	0,23	-59,00	34,06	93,05	1,63	13,7431	0,0687	6060,81
Zn	%	40000	0,5	7,06	-84,73	57,49	142,22	15,25	29,2663	0,1463	414,53
Ds	%	40000	0,5	66,28	48,33	80,91	32,58	65,63	4,9230	0,0246	7,43
RSP	%	40000	0,5	79,07	71,27	86,02	14,75	80,09	3,6868	0,0184	4,66
Ks	%	40000	0,5	97,87	86,25	99,61	13,36	98,59	1,6594	0,0083	1,70
Ma	%	40000	0,5	65,98	44,08	75,98	31,90	66,61	4,1713	0,0209	6,32
Mi	%	40000	0,5	-16,68	-34,36	-4,39	29,98	-16,36	6,3306	0,0317	37,96
PT	%	40000	0,5	74,74	56,46	89,25	32,80	75,74	6,4699	0,0323	8,66
GF	%	40000	0,5	-55,39	-297,67	16,61	314,28	-31,61	66,0678	0,3303	119,27

Atrib. - propriedade do solo; Unid. - unidade; NP - número de pixels; Resol. - resolução; Min. - mínimo; Max. - máximo; Ampl. - amplitude; Desvio - desvio-padrão; CV - coeficiente de variação.

A escolha dos atributos P, V, C/N, B e Mn, foi devida a dois aspectos. Primeiro, pela análise dos mapas de perdas, em que foram selecionados atributos cujos mapas não apresentaram áreas com perdas negativas ou que as tiveram em pequena proporção. Neste caso, foram selecionados os atributos B, P e Mn. Segundo, pela representatividade que o atributo teve em relação ao conjunto de variáveis. Neste caso, foram selecionados os atributos V e C/N, sendo que o primeiro contemplou os atributos Ca, Mg, K e SB na sua obtenção, e o segundo, contemplou os atributos MO e N no seu cálculo. Desta forma, com estes cinco atributos químicos tentou-se representar, da melhor forma possível, o conjunto de variáveis químicas.

Ressalta-se que a escolha dos mapas de perdas individual foi baseada em critérios estabelecidos de seleção dos atributos, conforme descrito anteriormente, e teve como objetivo

aumentar a confiabilidade dos resultados na etapa de obtenção dos mapas com os níveis de degradação física, química e geral. Este é um ponto limitante na avaliação da degradação, concordando com DIAS e GRIFFITH (1998), que apontam que um dos pontos limitantes em estudos de degradação é a escolha de quais atributos do solo devem ser avaliados. Neste sentido, uma vez utilizados critérios bem estabelecidos, foi possível a obtenção de resultados mais confiáveis e representativos da degradação do solo sob pastagem.

Após a seleção dos 10 atributos e análise pelo sistema de informação geográfica, por meio de operações algébricas, foram obtidos os mapas com os níveis de degradação, que se encontram na Figura 35. Estes mapas são a síntese da tendência média ocorrida com os atributos físicos e químicos, ou seja, são as perdas médias dos atributos utilizados na sua obtenção, representando a degradação do solo sob pastagem em termos físicos e químicos. Conforme mostra a Figura 35, o mapa com os níveis físicos de degradação (NFD) apresentou valores entre 69 e 83%, demonstrando alta degradação física do solo sob pastagem. O mapa com os níveis químicos de degradação (NQD) apresentou valores entre 6 e 38%, demonstrando baixa a média degradação. E, finalmente, o mapa com os níveis gerais de degradação (NGD), apresentando valores entre 41 e 57%, ou seja, intermediário ao NFD e o NQD, uma vez que ele representou a agregação das informações destes dois mapas.

Esses mapas são úteis no sentido porque possibilitam detectar locais que apresentaram, em média, maiores problemas de degradação e, assim, pode-se despender maior atenção para estes locais. Assim, pode-se afirmar que, em geral, a degradação química do solo sob pastagem foi baixa, registrado pelos baixos valores contidos no mapa dos NQD, a degradação física foi alta, registrado pelos altos valores no mapa dos NFD, e a degradação geral foi moderada, registrada pelos valores intermediários no mapa dos NGD. Esta classificação foi similar à proposta por OLDEMAN (1994), que classificou a degradação do solo em fraca, moderada, forte e extrema.

A obtenção dos mapas com os NFD, NQD e NGD vem de encontro com o que comentam SMITH et al. (1994), que afirmam que pode ser obtido um indicador múltiplo por meio da integração de um número ilimitado de indicadores de qualidade do solo, o que possibilita melhor representação da tendência média. Assim, indicadores químicos, físicos e biológicos podem ser combinados para formar uma variável múltipla, a partir da qual se obtém

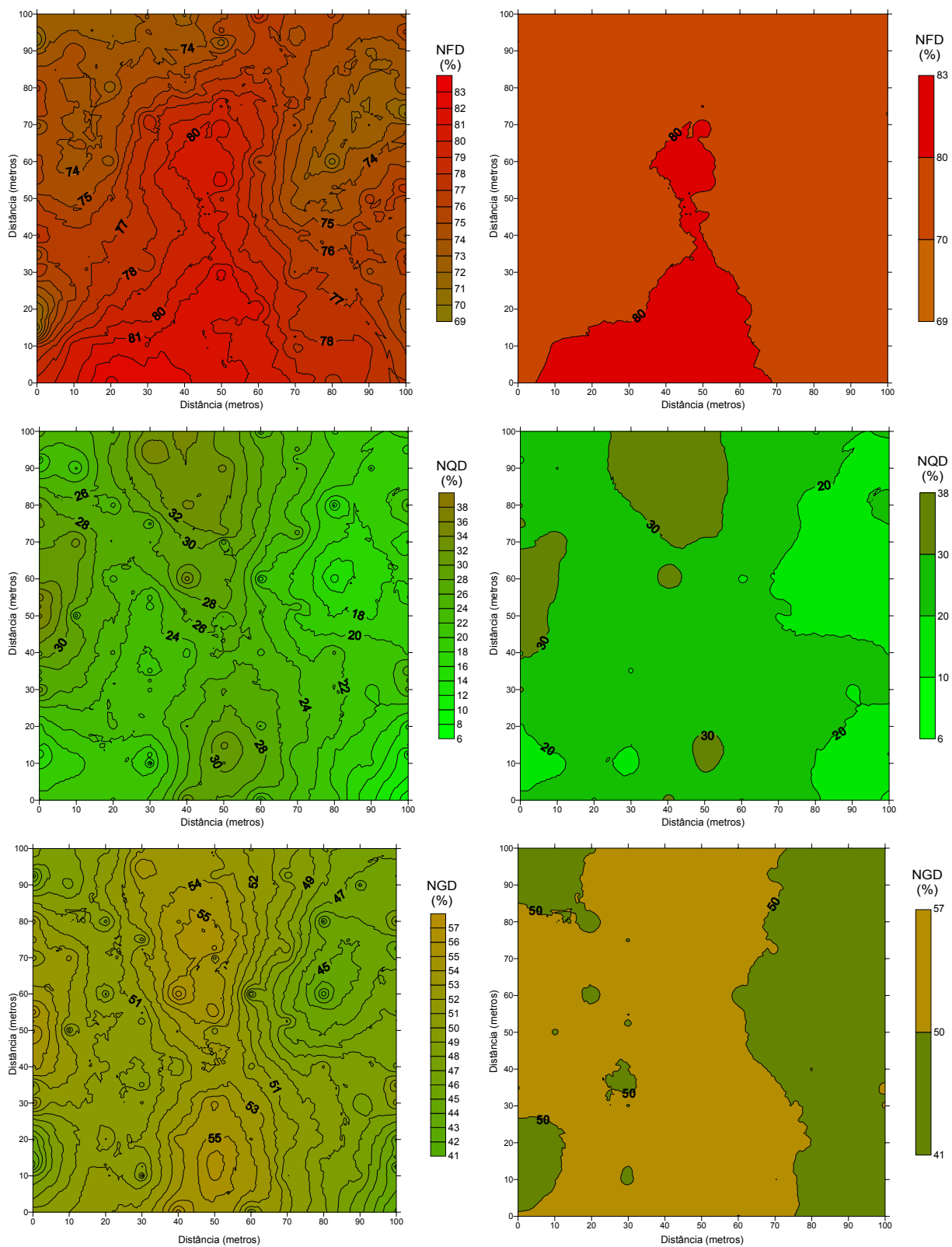


FIGURA 35 - Mapas da distribuição espacial dos níveis físicos (NFD), químicos (NQD) e gerais (NGD) de degradação do solo sob pastagem.

os índices de qualidade do solo. Neste sentido, a geoestatística pode auxiliar na obtenção desses índices, uma vez que é possível obter uma representação contínua do indicador em um mapa, permitindo espacializar por meio de estimativas, valores dos índices obtidos para locais não-amostrados e, assim, possibilitando definir gradientes, seus limites e seus efeitos interativos. Desta forma, os resultados permitem melhor análise em comparação ao que é feito normalmente, por meio da utilização de categorização da qualidade do solo ou utilização de índices com escalas discretas, variando entre 1 e 10. Neste caso, é mais fácil flexibilizar a incorporação da tomada de decisão, em termos de manejo, econômicos e ambientais. Finalmente, esses resultados podem ser transportados para os sistemas de informações geográficas com a finalidade de poderem ser trabalhados e, assim, obter melhor análise.

Os mapas com os NFD, NQD e o NGD, permitiram observar aspectos espaciais que não foram evidentes por meio da análise com a estatística clássica. Assim, foi possível identificar em termos de área geográfica, as situações mais críticas e as tendências em termos de degradação, o que é de grande importância na análise. Dessa forma, a obtenção desses três mapas, procurou sintetizar e fazer um balanço da degradação do solo sob pastagem, comparativamente ao solo sob mata, em termos químicos e físicos, buscando valorizar as informações individuais dos atributos. Isto foi possível em razão da obtenção dos mapas de distribuição espacial pela geoestatística e posterior análise pelos recursos de geoprocessamento do sistema de informação geográfica, que permitiram agregar e sintetizar as informações nestes três mapas, fazendo com que houvesse ganho na análise da degradação.

Os mapas com os níveis físicos (NFD), químicos (NQD) e gerais (NGD) de degradação, representaram tão somente a tendência média da degradação em termos físicos, químicos e gerais, respectivamente e, desta forma, foram muito úteis na análise ambiental e da sustentabilidade da área com solo sob pastagem. Isto vem de encontro com o que foi comentado por GOOVAERTS (1999), que sugeriu que os resultados gerados pela geoestatística podem ser trabalhados nos sistemas de informações geográficas de forma rápida, o que fornece um incremento na análise. Da mesma forma, PAPENDICK (1994) comenta que existe a necessidade de pesquisar o desenvolvimento de métodos e procedimentos para a quantificação das condições físicas do solo, seus efeitos e impactos no ambiente, o que vem de encontro com os objetivos do presente estudo.

Por outro lado, ressalta-se que uma análise isolada dos mapas com os NFD, NQD e NGD, não foi suficiente para solucionar problemas específicos, como o caso dos baixos valores dos níveis críticos de fósforo. Para solucionar estes tipos de problemas, foi necessária a utilização de análise conjunta de todos fatores e informações obtidas. Assim, a análise clássica pelo teste de significância, aliado à análise dos mapas da distribuição espacial, dos mapas de perdas individuais e dos mapas com níveis de degradação, forneceram uma base detalhada e confiável no auxílio dos estudos da degradação.

Ressalta-se que no caso do fósforo, atenção especial teve que ser tomada, uma vez que este apresentou no mapa da distribuição espacial, valores inferiores ao nível crítico e, no mapa de perdas, apresentou valores elevados e positivos em relação aos outros atributos químicos. Assim, cuidados específicos são necessários para o P, no sentido de poder elevá-lo a um nível adequado no solo. Isto é reforçado por SMITH et al. (1994), que colocam que apesar de ser vantajosa a integração de parâmetros individuais por esse processo, uma avaliação individual dos indicadores permite identificar aspectos específicos que estão afetando sobremaneira e de forma mais intensa as condições do solo.

O Quadro 21 mostra a estatística descritiva dos mapas dos NFD, NQD e NGD. Para o NFD, o valor médio foi de 76,79% e mínimos e máximos de 69,82% e 83,47%, respectivamente. Para o NQD, o valor médio foi de 24,37% e mínimos e máximos de 7,50% e 38,05%, respectivamente. E para o NGD, o valor médio foi de 50,58% e mínimos e máximos de 41,26% e 57,70%, respectivamente. Os coeficientes de variação foram relativamente baixos, variando de 3,50%, para o NFD a 18,84% para o NQD.

QUADRO 21 - Estatística descritiva dos mapas com os níveis físicos (NFD), químicos (NQD) e gerais (NGD) de degradação do solo sob pastagem.

Mapa	Unid.	NP	Resolução	Média	Min.	Max.	Ampl.	Mediana	Desvio	Erro	CV
NFD	%	40000	0,5	76,79	69,82	83,47	13,66	76,51	2,6877	0,0134	3,50
NQD	%	40000	0,5	24,37	7,50	38,05	30,55	24,32	4,5915	0,0230	18,84
NGD	%	40000	0,5	50,58	41,26	57,70	16,44	50,80	2,8222	0,0141	5,58

Unid. - unidade; NP - número de pixels; Min. - mínimo; Max. - máximo; Ampl. - amplitude; Desvio - desvio-padrão; CV - coeficiente de variação.

O Quadro 22 fornece as áreas calculadas com os respectivos níveis de degradação. Nota-se que o NFD ficou predominantemente com maior área nos níveis de 70 a 80%, o NQD nos níveis entre 20 a 30% e o NGD, nos níveis 50 e 60%. A quantificação de áreas dos níveis de degradação é útil quando se deseja realizar a análise ambiental e da sustentabilidade da área com pastagem.

QUADRO 22 - Quantificação de áreas dos mapas da distribuição espacial dos níveis físicos (NFD), químicos (NQD) e gerais (NGD) de degradação do solo sob pastagem.

Categoria (%)	Nível de Degradação					
	NFD		NQD		NGD	
	Área (m ²)	%	Área (m ²)	%	Área (m ²)	%
0 – 10	-	-	5,50	0,06	-	-
10 – 20	-	-	1.886,50	18,86	-	-
20 – 30	-	-	6.906,00	69,06	-	-
30 – 40	-	-	1.202,00	12,02	-	-
40 – 50	-	-	-	-	3.725,25	37,25
50 – 60	-	-	-	-	6.274,75	62,75
60 – 70	0,75	0,01	-	-	-	-
70 – 80	8.420,75	84,21	-	-	-	-
80 – 90	1.578,50	15,78	-	-	-	-
90 – 100	-	-	-	-	-	-
Total	10.000,00	100,00	10.000,00	100,00	10.000,00	100,00

A partir da quantificação das áreas e seus respectivos níveis, obteve-se os índices de degradação físico, químico e geral, conforme proposto pela metodologia. Foram obtidos os valores de 76,79%, 24,37% e 50,58% para os Índices Físico de Degradação (IFD), Índice Químico de Degradação (IQD) e Índice Geral de Degradação (IGD), respectivamente. Estes índices representam a degradação da área do solo sob pastagem em termos físicos, químicos e gerais. Assim, pode-se afirmar que a degradação física do solo foi alta, a química foi baixa e a geral, moderadamente alta, conforme a classificação proposta, o que reforça os resultados discutidos anteriormente.

A obtenção dos mapas de perdas individuais, dos mapas com os níveis de degradação e dos índices de degradação pela metodologia utilizada, representa um ganho na análise e

diagnóstico do solo, em razão de possibilitar a agregação das informações de grande número de atributos. Esta forma de tratamento difere daquela normalmente utilizada nos estudos de degradação. A metodologia traz como vantagem, a análise conjunta das informações utilizando os procedimentos clássicos e técnicas modernas, utilizando a geoestatística e os recursos de geoprocessamento. Apesar deste ganho, serão necessários estudos similares, com a finalidade de adequação e validação dos procedimentos utilizados, notadamente com relação às limitações detectadas.

A utilização dos recursos de geoprocessamento foi essencial, pois permitiram, por meio de operações algébricas entre os mapas da distribuição espacial dos atributos gerados pela geoestatística, a obtenção dos mapas de perdas individuais, dos níveis de degradação e dos índices de degradação, fazendo com que houvesse ganho na análise das informações individuais dos atributos do solo.

Embora não existam valores limites e, ou, críticos para os níveis e para os índices de degradação, a presente metodologia foi capaz de detectar e estabelecer a extensão e o grau em que ocorreram, permitindo sugerir, quando necessário, procedimentos para a minimização dos mesmos.

De forma geral, constatou-se que nas condições de estudo, a degradação física do solo foi intensa, em razão dos altos valores nos mapas de perdas dos atributos físicos, dos altos valores no mapa com os níveis físicos de degradação e do alto valor do índice físico de degradação. Aliado a isto, também foi detectado que o fósforo se apresentou limitante, em razão dos baixos valores dos níveis críticos. Assim, as recomendações gerais para o presente caso são a recuperação física aliado a adubação fosfatada do solo sob pastagem, para propiciar melhoria das condições que permitam a elevação da taxa de lotação e, conseqüentemente, do retorno econômico da atividade pecuária.

Apesar dos resultados serem específicos da área de estudo, podem, juntamente com as recomendações gerais, ser extrapolados para outros locais da região que apresentem condições similares de paisagem, forrageiras e solos, contribuindo nas orientações de recuperação e manejo dos solos pastagem.

5. CONCLUSÕES

O estudo da degradação do solo sob pastagem, utilizando métodos tradicionais de análise, técnicas da geoestatística e dos recursos de geoprocessamento, permitiu as seguintes conclusões:

- a) A utilização de técnicas da geoestatística e dos recursos de geoprocessamento propiciaram a análise espacial e quantitativa da degradação do solo sob pastagem, possibilitando seu detalhamento e a melhoria do diagnóstico;
- b) Tanto a análise qualitativa, com auxílio da estatística clássica, como a análise espacial e quantitativa, com auxílio de técnicas da geoestatística e dos recursos de geoprocessamento, revelaram que o solo sob pastagem se apresentou degradado química e fisicamente;
- c) Os atributos químicos (fósforo, saturação por bases, relação C/N, boro e manganês) e os físicos (densidade do solo, condutividade hidráulica, resistência do solo à penetração, macroporosidade e porosidade total) foram os que melhor representaram as condições químicas e físicas na análise espacial e quantitativa da degradação do solo sob pastagem;
- d) O procedimento elaborado, utilizando técnicas da geoestatística e dos recursos de geoprocessamento possibilitou, a obtenção de índices quantitativos que representaram e consideraram a variabilidade e a distribuição espacial da degradação química e física do solo sob pastagem;
- e) As análises espacial e qualitativa revelaram que a degradação física do solo foi alta, evidenciada pelo elevado índice físico de degradação (76,79%), e a degradação química foi baixa, evidenciada pelo baixo índice químico de degradação (24,37%), mostrando que a primeira foi mais intensa e mais relevante no estudo; e
- f) Em razão da degradação física intensa e dos baixos valores da concentração de fósforo, são recomendadas a recuperação física e a adubação fosfatada do solo sob pastagem.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo identificou como fatores limitantes, que merecerão atenção para futuras pesquisas relacionadas à degradação do solo, os seguintes aspectos:

- estabelecimento dos atributos do solo que melhor representem o estado atual de degradação, que se relacionem com o desenvolvimento das pastagens e com os efeitos nocivos ao meio ambiente, para serem utilizados na obtenção dos níveis e dos índices de degradação;
- estabelecimento dos valores limites e, ou, críticos dos atributos do solo, a partir dos quais as condições serão consideradas limitantes ou impeditivas para o desenvolvimento das pastagens ou que propiciarão efeitos danosos ao meio ambiente, para serem utilizados na determinação dos níveis e dos índices de degradação;
- estabelecimento do peso relativo de cada atributo do solo na determinação dos níveis e dos índices de degradação; e
- estabelecimento dos valores críticos dos níveis e dos índices de degradação, a partir dos quais serão necessárias intervenções no solo para minimizar os problemas relacionados ao desenvolvimento das pastagens e, ou, efeitos nocivos ao meio ambiente, com a finalidade de maximizar o ganho de produção e rentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEGRE, J. C.; LARA, P. D. Efecto de los animales em pastoreo sobre las propiedades físicas de suelos de la región tropical húmeda de Peru. **Pasturas Tropicales**, v.13, p.18-23. 1991.
- ALVARENGA, M. I. N.; SOUZA, J. A. **Atributos do solo e o impacto ambiental**. Lavras: FAEPE/ESAL, 1995. 140 p.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Introdução à geoestatística linear**. Porto Alegre: Companhia de Pesquisas Minerais. 1998. 99p.
- ANJOS, J. T.; UBERTI, A. A. A.; VIZZOTO, V. T. et al. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.139-145. 1994.
- ARSHAD, M. A.; COEN, G. M. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. **America Journal Alternative Agricultural**, v.7, p.12-16, 1992.
- ARONOFF, S. **Geographic information systems: a management perspective**. Ottawa: WDL Public., 1995. 294p.
- ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Ed.) **Sistema de informações geográficas: aplicações na Agricultura**. 2.ed. ver. e ampl. Brasília: EMBRAPA-SPI/EMBRAPA-CPAC, 1998. 434p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Norma NBR 7182 – Solo: ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 1986. s.n.p.
- BARROW, C. J. **Land degradation, development and breakdown of terrestrial environments**. 2 ed. rev. Centre for development studies – University College of Swansea – University of Wales. 1994. 295p.
- BATISTELLA, M.; MIRANDA, J. R.; MIRANDA, E. E. Banco de dados geocodificados com base municipal para a região Nordeste do Brasil. In: CONFERÊNCIA LATINO AMERICANA SOBRE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, 4, 1993 e SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 2, 1993. **Pôsteres apresentados...** São Paulo: USP-EP, 1993.
- BIANCHINI, A.; MAIA, J. C.; MAGALHÃES, P. S. G. et al. Penetrógrafo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.332-336. 2002.
- BIBLIO, R.; AMADO, T. J. C.; VEZZANI, F. M. et al. Agricultura de precisão como ferramenta para identificação de zonas de manejo e seleção de intervenções. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29. 2003 **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 4p. (CD-ROM).

BODDEY, R. M.; RAO, L. M., THOMAS, R. J. Reciclaje de nutrimentos e impacto ambiental de las pasturas de *Brachiaria*. In: MILES, J. W., MAASS, B. L.; VALLE, C. B. ***Brachiaria*: biología, agronomía y mejoramiento**. 1998. p. 79-95.

BOUMAN, B. A. M.; NIEUWENHUYSE, A.; IBRAHIM, M. Pasture degradation and restoration by legumes in humid tropical Costa Rica. **Tropical-Grasslands**, v.33, n.2, p.98-110, 1999.

BRIENZA JR., S.; VIELHAEUR, K.; VLEK P. G. Enriquecimento de capoeira: mudando a agricultura migratória da Amazônia oriental brasileira. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. (Ed.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1998. p.177-182.

BRUS, D. J.; GRUIJTER, J. J. Random sapling or geostatistics modeling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with discussion). **Geoderma**, v.80, n.1-2, p.1-44, 1997.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: University Press, 1986. 191p.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: University Press, 1998. 333p.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. et al. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. Campinas: Instituto de Computação, UNICAMP, 1996. 197p.

CAMBARDELLA, C. A.; MORRMAN, T.B.; NORVAK, J. M. et al. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1240-1248, 1994.

CARDOSO JÚNIOR, E. Q.; RODRIGUES, T. E.; SILVA, J. M. L. et al.. Propriedades físicas de latossolo e argissolo no noroeste paranaense sob sistemas de recuperação de pastagens (*Brachiaria humidicula*, Rendle). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, 2002. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2002. 4p.

CARVALHO, M. M.; FREITAS, V. P.; CRUZ FILHO, A. B. Requerimento de fósforo para o estabelecimento de duas gramíneas tropicais em um solo ácido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.29, n.2, p.199-209. 1994.

CARVALHO, M. M. Recuperação e pastagens degradadas em áreas de relevo acidentado. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. (Ed). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1998. p.149-161.

CASTRIGNANO, A.; STELLUTI, M. Fractal geometry and geostatistics for describing the field variability of soil aggregation. **Journal Agricultural Engineering Research**, v.73, n.1, p.13-18, 1999.

CASTRIGNANO, A.; GIUGLIARINI, L.; RISALITI, R. et al. Study of spatial relationships among some soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics. **Geoderma**, v.97, n.1-2, p.39-60, 2000.

CHAUVEL, A.; GRIMALDI, M.; BARROS, E. et al. Pasture damage by an Amazonian earthworm. **Nature**, London, v.398, n.6722, p.32-33, 1999.

CLARK LABS. **Idrisi version I32.11 for Windows**. [S.l.]: Clark Labs. 2000. 1 CD-ROM

COELHO, O. G. W. **Modelamento da degradação de Latossolos na região de Fortaleza dos Valos – RS: uma aplicação SIG/sensoriamento remoto**. 1999. 166p. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

CORREA, J. C.; REICHARDT, K. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um Latossolo Amarelo da Amazônia Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, n.1, p.107-114. 1995.

COSTA, L. M.; MATOS, A. T. Impactos da erosão do solo em recursos hídricos. In: **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Brasília: MMA, SRH, ABEAS, UFV, 1997. p. 173-189.

COUTO, E. G.; STEIN, A.; KLAMT, E. Large area spatial variability of soil chemical properties in Central Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.66, p.139-152. 1997.

COUTO, E. G.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de micronutrientes em solo sob pivô central no sul do Estado de Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.12, p.2321-2329, 1999.

CROMER, M. V. Geostatistics for environmental and geotechnical applications: a technology transferred. In: SRIVASTAVA, R. M.; ROUHANI, S.; CROMER, M. V. et al. (Ed.). **Geostatistics for environmental and geotechnical applications**. American Society for Testing and Materials, 1996. p.3-12.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KÄMPF, N. et al. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: SBSC, 1993. 90 p.

DAVIS, J. G.; HOSSNER, L. R.; WILDING, L. P. et al. Variability of soil chemical properties in two sandy dunal soils of Niger. **Soil Science**, v. 159, n.5, p.321-330, 1995.

DESBARATS, A. J. Modeling spatial variability using geostatistics. In: SRIVASTAVA, R. M.; ROUHANI, S.; CROMER, M. V. et al. (Ed.). **Geostatistics for environmental and geotechnical applications**. American Society for Testing and Materials, 1996. p.32-48.

DIAS, L. E.; GRIFFITH, J. J. Conceituação e caracterização de áreas degradadas. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. (Ed.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1998. p.1-7.

DIAS-FILHO, M. B. Pastagens cultivadas na Amazônia Oriental Brasileira: processos e causas da degradação e estratégias de recuperação. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. (Ed.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1998. p.135-147.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. B.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F. et al. (Ed.). Defining soil quality for a sustainable environment. **Soil Society of America**, Special Publication, n.5, p.3-21, 1994.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). Methods for assessing soil quality. **Soil Science Society of America**, Special Publication, n.49. p.25-38, 1996.

E-ACADEMY. **MINITAB statistical software**. Version 13.0 for Windows. [S.l.]: E-Academy, 2000. 1 CD-ROM.

EGENHOFER, M. J.; FRANK, A. U. Prospective views of GIS technologies and applications. In: Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo:EDUSP, 1990. p.95-102.

EMPRESA MATOGROSSENSE DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA E EXTENSÃO RURAL – EMPAER. **Estudo da Realidade Atual – Município de Mirassol D'Oeste-MT**. 2000. s.n.p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: CNPS/EMBRAPA, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro. CNPS/EMBRAPA, 1999. 412 p.

FIDALSKI, J. TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A. et al. Variabilidade espacial da resistência à penetração de um latossolo sob dois sistemas de manejo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2003. 4p. (CD-ROM).

FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. **Glossário de ciência do solo**. Viçosa: UFV/DPS, 1992. 142 p.

GAMMA DESIGN. **Gamma Design Software: GS+ geostatistics for the environment sciences version 5.1.1**. [S.l.]: Gamma Design Software, 2000. 1 CD-ROM.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer version 7.0:** Surface Mapping System. [S.l.]: Golden Software. 1999. 1 CD-ROM.

GONZALES, R. M. Joint learning with GIS: multi-actor resource management. **Agricultural Systems**, v.73, p.99-111, 2002.

GOODCHILD, M. F. Geographical information science. **International Journal on Geographical Information Systems**, v.6, n.1, p.31-45, 1992.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, v.89, n.1-2, p.1-45, 1999.

GOOVAERTS, P. Estimation or simulation of soil properties? An optimization problem with conflicting criteria. **Geoderma**, v.97, n.4-4, p.165-186, 2000.

GREENWOOD, K. L.; MACLEOD, D. A.; SCOTT, J. M. et al. Changes to soil physical properties after grazing exclusion. **Soil Use and Management**, v.14, p.19-24. 1998.

GUIMARÃES, E. C. Geoestatística básica e aplicada. UFU/FAMAT: Núcleo de Estudos Estatísticos e Biométricos. 2001. 48p. Disponível em: <www.famat.ufu.br/ednaldo/geoest/apgeol.pdf>

GUTJAHR, A. Spatial variability of soil properties. In: NIELSEN, D. R.; BOUMA, J. (Ed.). **Spatial Variability**. Wageningen:PUDOC, p.9-34. 1985.

HARRISON, D. F.; CAMERON, K. C.; McLAREN, R. C. Effects of subsoil loosening on soil physical properties, plant root growth, and pasture yield. **Journal Agriculture Resources**, v.37, p.599-567. 1994.

HOLT, J. A.; BRISTOW, K. L.; McIVOR, J. G. The effects of grazing pressure on soil animals and hydraulic properties of two soils in semi-arid tropical Queensland. **Journal Soil Resources**, v.34, p.69-79. 1996.

HOOSBEEK, M. R. Incorporating scale into spatio-temporal variability: applications to soil quality and yield data. **Geoderma**, v.85, p.113-131, 1998.

HUMPHREYS, L. R. **Tropical forages: their role in sustainable agriculture**. London: Ed. Longman Scientific e Technical. 1994. 414p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics: an introduction to applied geostatistics**. Oxford: University Press, 1989. 561p.

IZABOLCS, I. The concept of soil resilience. In: GREELAND, D. J.; SZABOCLS, I. (Ed.). **Soil resilience and sustentainable land use..** Cab International, Wallingford, UK. 1994. p.33-39.

JACOMINE, P. K. T.; CASTRO FILHO, C.; MOREIRA, M. L.C. et al. **Guia para identificação dos principais solos do estado de Mato Grosso**. Cuiabá:PNUD, PRODEAGRO, 1995. 118p.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. London, Academic Press, 1978, 600p.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres. 1979. 264p.

KUZYAKOVA, I. F.; ROMANENKOV, V. A.; KUZYAKOV, Y. V. Application of geostatistics in processing the results of soil and agrochemical studies. **Eurasian Soil Science**, v.34, n.11, p.1219-1228, 2001.

LAL, R. Soil erosion and land degradation: the global risks. **Advances in Soil Science**, v.11, p.129-172, 1990.

LAL, R.; STEWART, B. A. Soil degradation: need for action: research and development priorities. **Advances in Soils Science**. v 11, p. 331-337, 1990.

LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. **Soil & Tillage Research**, v.27, n.1-4, p.1-8, 1993.

LAL, R. Sustainable land use systems and soil resilience. In: GREELAND, D. J.; SZABOCLS, I (Ed.). **Soil resilience and sustentainable land use**. Cab International, Wallingford, UK. 1994. p. 41-67.

LAL, R. Degradation and resilience of soil. **Philosophical Transactions: Biological Sciences**, v.352, n.1356, p.997-1010, 1997.

LAL, R. Soil management in the developing countries. **Soil Science**, v.165, n.1, p.57-72, 2000.

LARK, R. M. A geostatistics extension of the sectioning procedure for disaggregating soil information to the scale of functional models of soil processes. **Geoderma**, v.95, n.1-2, p.89-112, 2000.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. Conservation and enhancement of soil quality. In: DUMANSKI, J.; PUSHPARAJAH, E.; LATHAM, M. et al. (Ed.). **Evaluation for sustainable land management in the developing world**. v.2: Technical Papers. Bangkok/Thailand, International Board for Soil Research and Management, 1991. p. 175-203.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M. et al. Intervalo hídrico ótimo em sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2003. 4p.

LEES, B. G. Australian geography and geographic information systems. **Australian Geographical Studies**, v.40, n.1, p.33-47, 2002.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3.^a ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 84 p.

LEONEL, C. L.; RIBEIRO, G. J. T.; LEITE, G. M. V. et al. Comportamento de forrageiras em diferentes graus de compactação num Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico textura argilosa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2003. 4p. (CD-ROM).

LIMA, C. A. G.; SILANS, A. P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.12, p.2311-2320, 1999.

LOES, R. H. Z. Ações do IBAMA na recuperação de áreas degradadas. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. (Ed.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1998. p. 247-251.

LOMBARDI NETO, F. Degradação de pastagens. In: Encontro sobre recuperação de pastagens, 1. Nova Odessa. **Anais...** Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, p. 49-60. 1993.

LÓPEZ, M. V.; ARRÚE, J. L. Efficiency of an incomplete block design based on geostatistics for tillage experiments. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.1104-1111, 1995.

LOPES, S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. Tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes. 2 ed. ver. e ampl. Piracicaba: POTAFOS, 1998. 177 p.

MACEDO, M. C. M.; KICHEL, A. N.; ZIMMER, A. H. **Degradação e alternativas de recuperação e renovação de pastagens**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2000. 4p. (Comunicado Técnico n.62).

MACEDO, M. C. M.; CUNHA, L. A. L.; BONO, J. A. M. Uso de subsolador e escarificador rotativo na descompactação de um latossolo sob pastagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2003. 4p. (CD-ROM).

MANTOVANI, E. C. Técnicas de avaliação da compactação dos solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2002. 4p. Palestra (CD-ROM)

MARTINELLI, B. M.; PAIVA, H. N.; DIAS, H. C. T. et al. C. Resistência mecânica à penetração em solos com diferentes usos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, 2002. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2002. 4p. (CD-ROM).

MATOS, C. O. **Contribuição ao planejamento e gestão da área de proteção ambiental de Souza e Joaquim Egídio, Campinas/SP**. 1996. 235p. (Dissertação Mestrado) Universidade de São Paulo, São Paulo.

MIRANDA, E. E.; DORADO, A. J.; GUIMARÃES, M. et al. **Sistema de informaciones geograficas como instrumento complementario para la evaluación de sistema de producción sostenibles**: Informe Final. Campinas: ECOFUERZA Investigación y Desarrollo/UNICAMP-NUCATE/EMBRAPA-NMA, 1995. 220p.

MONTGOMERY, G. E.; SCHUCH, H. C. **GIS data conversion handbook**. Colorado: GIS World, 1993. 292p.

MOOLMAN, J. H.; VANHUYSSTEEN, L. A. A geostatistical analysis of the penetrometer soil strength of a deep ploughed soil. **Soil & Tillage Research**, v.15, p.11-24. 1989.

MORAES, A. **Produtividade animal e dinâmica de uma pastagem de pangola (*Digitaria decumbens* Stent.), azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) e trevo branco (*Trifolium repens* L.), submetida a diferentes pressões de pastejo**. 1991. 200p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

MORAES, J. F. L.; VOLKOLFF, B. A.; CERRI, C. C. et al. Soil properties under Amazon Forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, v. 70, p.63-81. 1996.

MORAES, A.; LUSTOSA, S. B. C. Efeito do animal sobre as características do solo e a produção da pastagem. In: SIMPÓSIO SOBRE AVALIAÇÃO DE PASTAGENS COM ANIMAIS. MARINGÁ, 1997. **Anais...** Maringá: Universidade Estadual de Maringá, p.129-149. 1997.

MOUSTAFA, M. M. A geostatistics approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage design in Egypt. **Agricultural Water Management**, v.42, n.3, p.291-312, 2000.

MULLA, D. J.; BHATTI, A. U.; KUNKEL, R. Methods for removing spatial variability from field research trials. **Advance in Soil Science**, v.13, p.201-213, 1990.

MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. F.; DESJARDINS, T. et al. Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.11, p. 1409-1418. 2001.

NEVES, J. C. L. **Curso de fertilidade e manejo do solo – Módulo 10 – Micronutrientes**. Brasília: ABEAS, 1996. 26 p.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. **Curso de fertilidade e manejo do solo – Módulo 7 – Fósforo**. Brasília: ABEAS, 1996. 133 p.

OLDEMAN, L. R. The Global extent of soil degradation. In: GREELAND, D. J.; SZABOCLS, I (Ed.). **Soil resilience and sustentainable land use**. Cab International, Wallingford, UK. 1994. p. 99-118.

OLIVEIRA, J. B. Fatores de formação. In: MONIZ, A. C. (Coord.). **Elementos de Pedologia**. São Paulo: Polígono; Ed. Da Universidade de São Paulo, 1972. 459p.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento**. 2 ed. Jaboticabal, FUNEP, 1992. 201 p.

OLIVER, M. A.; KHAYRAT, A. L. A geostatistical investigation of the spatial variation of radon in soil. **Computers & Geosciences**, v.27, p.939-957, 2001.

OVALLES, F. A.; COLLINS, M. E. Evaluation of soil variability in northwest Florida using geostatistics. **Soil Science Society of America Journal**, v.52, n.6, p.1702-1708, 1988.

PANKHURST, C. E. biological indicators of soil health and sustainable productivity. In: GREELAND, D. J.; SZABOCLS, I. (Ed.). **Soil resilience and sustentainable land use**. Cab International, Wallingford, UK. 1994. p. 331-351.

PAPENDICK, R. I. Maintaining soil physical conditions. In: GREELAND, D. J.; SZABOCLS, I. (Ed.). **Soil resilience and sustentainable land use**. Cab International, Wallingford, UK. 1994. p. 215-234.

PARR, J. F.; PAPENDICK, S. B.; HORNICK, S. B. et al. Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. **America Journal Alternative Agricultural**, v.7, n.1-2, p.5-11, 1992.

PERRIER, E. R.; WILDING, L. P. An evaluation of computacional methods for field uniformity studies. **Advance Agronomy**, v.39, p.265-312. 1986.

PINZÓN, A.; AMÉZQUITA, E. Compactación de suelos por el pisoteio de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. **Pasturas Tropicales**, v.13, p.21-26. 1991.

RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais**: Folha SD.21 – Cuiabá: Volume 26. Rio de Janeiro: MMESG, 1982. 531p.

RASMUSSEN, K. J. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: a Scandinavian review. **Soil & Tillage Research**, v.53, n.1, p.3-14, 1999.

REINERT, D. J. Recuperação de solos em sistemas agropastoris. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. (Ed.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1998. p.163-176.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B. et al. **Pedologia: bases para a distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 1995. 304 p.

ROBERTSON, G. P.; CRUM, J. R.; ELLIS, B. G. The spatial variability of soil resources followuig long-term disturbance. **Oecologia**, v.96, p.451-456, 1993.

ROUHANI, S. Geostatistics estimation: kriging. In: SRIVASTAVA, R. M.; ROUHANI, S.; CROMER, M. V. et al. (Ed.). **Geostatistics for environmental and geotechnical applications**. American Society for Testing and Materials, 1996. p.20-31.

SARAIVA, O. F.; CARVALHO, M. M. Adubação nitrogenada e fosfatada para o estabelecimento de capim-elefante em Latossolo Vermelho-Amarelo, textura argilosa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.201-205, 1991.

SELVA, E. C.; TOMAZI, M.; COUTO, E. G. et al. Teores de carbono orgânico, nitrogênio e potássio em latossolo submetido em diferentes usos em Juruena-MT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2003. 4p. (CD-ROM).

SERRÃO, E. A.; TOLEDO, J. M. The search for sustainability in Amazonian Pastures. In: ANDERSON, A. B. **Alternatives to deforestation: steps toward sustainable use of the Amazon Rain Forest**. New York: Columbia University Press. 1990. p.195-214.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, v.164, n.4, p.224-234, 1999.

SGUAREZI, J. **Mapeamento da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distrófico Típico, sob plantio direto, para um programa de agricultura de precisão em Mato Grosso**. 2002. 107p. Tese (Mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT.

SILVA, A. B. **Sistemas de informações geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1999. 236p.

SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; CORSI, M. Evaluation of soil compaction in an irrigated short-duration grazing system. **Soil & Tillage Research**, v.70, p.83-90, 2003.

SMITH, T. J.; BASTOS, J. B. Alterações na fertilidade de um Latossolo Amarelo Álico pela queima da vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, n.1, p.1-66. 1984.

SMITH, J. L.; HALVORSON, J. J.; PAPENDICK, R. Multiple variable indicator kriging: a procedure for integrating soil quality indicators. In: DORAN, J. B.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F. et al. (Ed). Defining soil quality for a sustainable environment. **Soil Society of America**. Special Publication, n.35, p.149-157, 1994.

SOUZA, A. R.; SILVA, A. B.; RESENDE, M. Influência da pressão exercida por pisoteio de animais na compactação do solo do Vale Pajeú, em Pernambuco. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO, 12, 1998. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1998. p.327.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho Distrófico de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.133-139, 2003.

SPSS INC. **SPSS statistical software version 10.0 for Windows**. [S.l.]: SPSS Inc., 1999. 1 CD-ROM

SRIVASTAVA, R. M. Describing spatial variability using geostatistics analysis. In: SRIVASTAVA, R. M.; ROUHANI, S.; CROMER, M. V. et al. (Ed). **Geostatistics for environmental and geotechnical applications**. American Society for Testing and Materials, 1996. p.13-19.

STAR, J.; ESTES, J. **Geographic information systems: an introduction**. New Jersey: Prentice-Hall, 1990. 303p.

STEIN, A. **Spatial statistics for soils and the environment** – Preliminary version. Enschede: ITC, 1995. 72p.

STREIN, C. R.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.105-111, 1991.

SYLLA, M.; STEIN, A.; VAN BREEMEN, N. et al. Spatial variability of soil salinity at different scales in the mangrove rice agro-ecosystem in West Africa. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v.54, p.1-15. 1995.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. et al. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre-RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995. 215p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TIESSEN, H. STEWART, J. W. B.; ANDERSON, D. W. Determinants of resilience in soil nutrient dynamics. In: GREELAND, D. J.; SZABOCLS, I. (Ed.). **Soil resilience and sustainable land use**. Cab International, Wallingford, UK. 1994. p. 157-170.

TORMENA, C. A. A compactação do solo em agroecossistemas agrícolas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, 2002. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2002. 4p. Palestra (CD-ROM).

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

TSEGAYE, T.; HILL, R. L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. **Soil Science**, v.163, n.2, p.143-154, 1998a.

TSEGAYE, T.; HILL, R. L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurements. **Soil Science**, v.163, n.2, p.155-165. 1998b.

TURCO, R. F.; KENNEDY, A. C.; JAWSON, M. D. Microbial indicators of soil quality. In: DORAN, J. B.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F. et al. (Ed.). Defining soil quality for a sustainable environment. **Soil Society of America**. Special Publication, n.35, p.73-90, 1994.

UTSET, A., LOPEZ, T.; DIAZ, M. A comparison of soil maps, kriging and a combined method for spatially predicting bulk density and field capacity of ferralsols in the Havana-Matanzas Plain. **Geoderma**, v.96, n.3, p.199-213, 2000.

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

VALERIANO, M. M.; PRADO, H. Geoprocessamento e amostragem de atributos anisotrópicos do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 13, 2000. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2000. 2p. (CD-ROM)

VEIGA, J. B.; MARQUES, L. C. T.; NOGUEIRA, O. L. et al. **Sistemas silvipastoris par a recuperação de pastagens degradadas em Paragominas, Pará, Brasil**. Reunión Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales. RIEPT-Amazônia. Lima-Peru. Documento de Trabajo, v.2, 75p. 1990.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, T. L.; NIELSEN, D. R. et al. Geostatistical theory and application on variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v.51, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S. R.; CASTRO, O. M.; TOPP, G. C. Spatial variability of some soil physical properties in the three soils of São Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, n.2, p.333-341, 1992.

VILELA, L.; SOARES, W. V. S.; SOUZA, D. M. et al. **Calagem e adubação para pastagens na região do cerrado**. 2. ed. ver. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2000. 15 p. (Circular Técnica n.37).

YAKOVCHENCO, V.; SIKORA, L. J.; KAUFMAN, D. D. A biologically based indicator of soil quality. **Biology and Fertility of Soils**, v.21, n.4, p.245-251, 1996.

WARRICK, A.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of Soil Physics**. New York: Academic Press, p.319-324. 1980.

WATKIN, B. R.; CLEMENTS, R. J. The effects of grazing animals on pasture. In: WILSON, P. **Plant Relations in Pastures**. p.273-289. 1978.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. In: STEWART, B.A. (ed). **Advance in Soil Science**, v.3, p.1-70, 1985.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. Oxford: University Press, 1990. 316p.

APÊNDICE

QUADRO 1A - Resultados da análise de Proctor Normal da amostra composta, retirada da camada de 0-20 cm do solo sob mata.

ponto	umidade (%)	Ds (kg/dm ³)
1	11,56	1,526
2	13,58	1,578
3	15,42	1,618*
4	17,45	1,682
5	19,47	1,666
6	21,64	1,608

*Valor utilizado para o cálculo do valor limite da densidade do solo (Ds), para obtenção do mapa de perda individual.

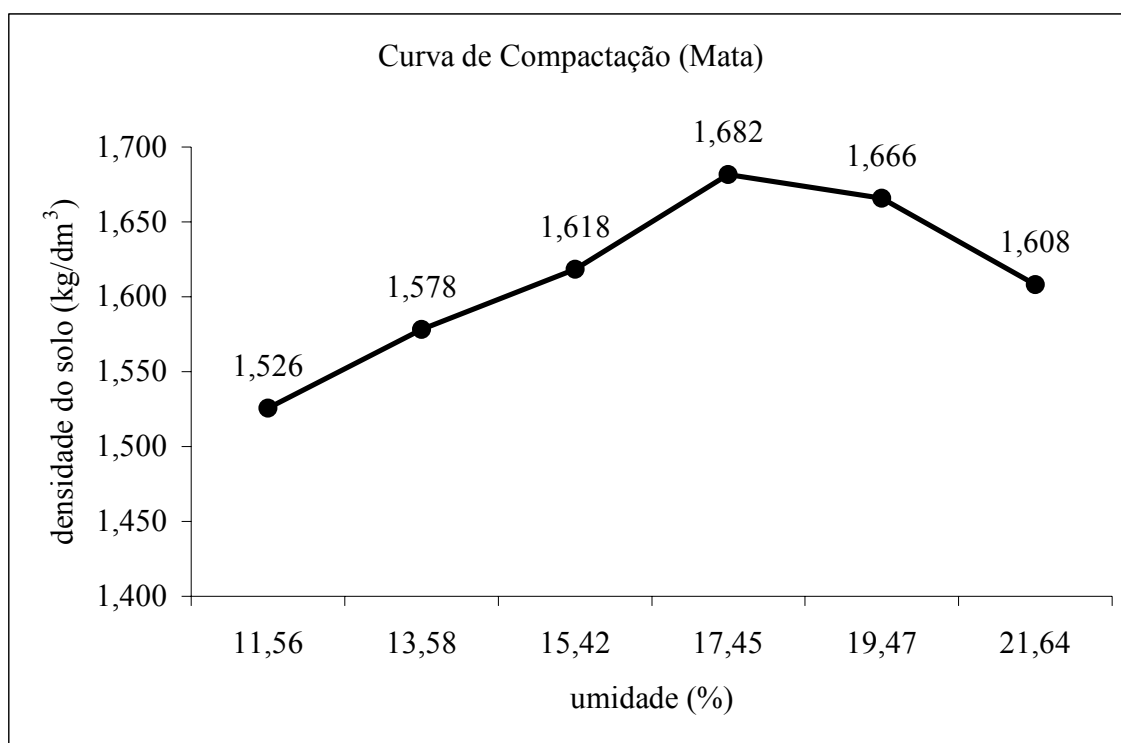


FIGURA 1A - Curva de compactação da camada de 0-20 cm do solo sob mata.

QUADRO 1B - Resultados da análise de Proctor Normal da amostra composta, retirada da camada de 0-20 cm do solo sob pastagem.

ponto	umidade (%)	Ds (kg/dm ³)
1	13,41	1,444
2	15,80	1,492
3	16,77	1,557
4	18,31	1,619
5	20,60	1,621
6	22,55	1,567

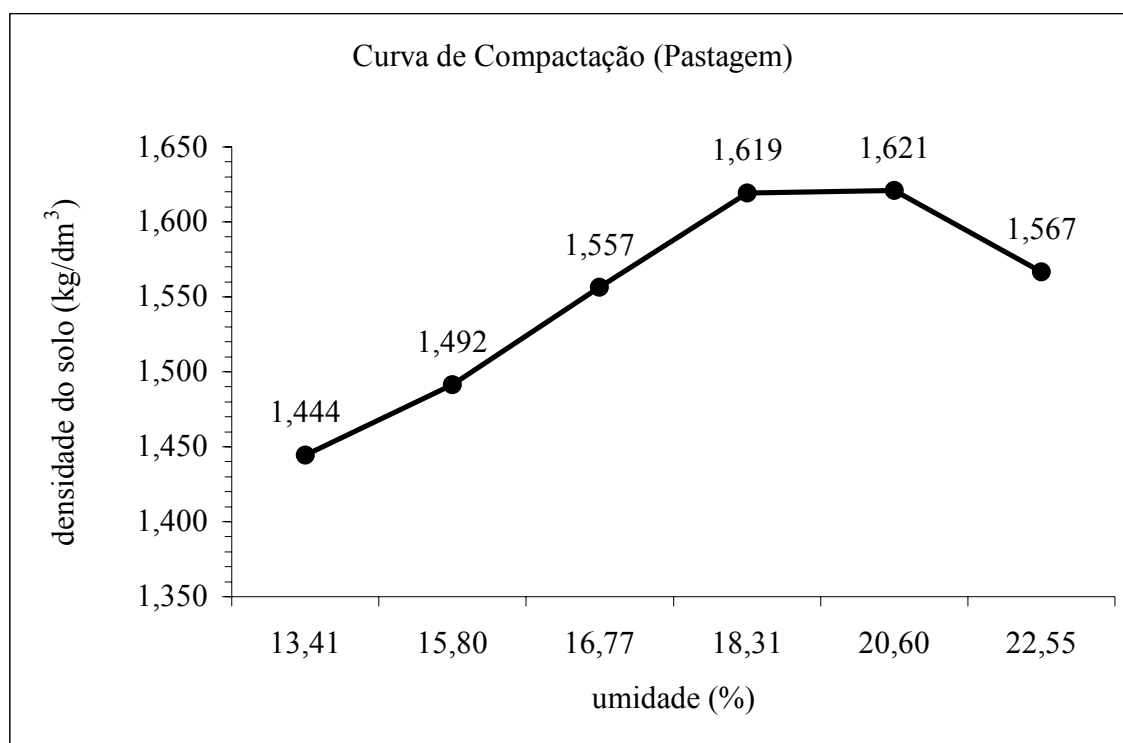


FIGURA 2B - Curva de compactação da camada de 0-20 cm do solo sob pastagem.

Cálculo dos valores limites de densidade do solo (Ds) e da porosidade total (PT), para utilização nas equações contidas no Quadro 2 de Material e Métodos, para a obtenção dos mapas de perdas individuais.

Os valores limites considerados foram obtidos da seguinte forma:

a) o valor da densidade do solo considerado como limite foi obtido a partir da análise de Proctor normal da amostra composta retirada do solo sob mata. Utilizou-se o valor de $1,618 \text{ kg/dm}^3$, que correspondeu ao ponto imediatamente anterior ao máximo da curva de compactação, conforme consta no Quadro 1A.

b) para a porosidade total o seu valor limite foi obtido pela equação:

$$PT\% = [100 \cdot (D_p - D_s)] / D_p$$

onde:

PT% - porosidade total (%);

D_p - densidade de partículas = $2,5 \text{ kg/dm}^3$; e

D_s - densidade do solo = $1,618 \text{ kg/dm}^3$

O valor da densidade de partículas (D_p) foi obtido pela análise da amostra composta retirada do solo sob mata. O valor da densidade do solo utilizado no cálculo foi o valor limite do item anterior. Assim, o valor da porosidade total foi:

$$PT\% = [100 \cdot (2,50 - 1,618)] / 2,50$$

$$PT\% = 35,28\%$$

Desta forma, foi obtido, como valor limite para a densidade do solo, o valor de $1,618 \text{ kg/dm}^3$ e, para a porosidade total, 35,28%.