



GABRIELA CAMARGOS LIMA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS
FÍSICOS E QUÍMICOS E ÍNDICE DE
QUALIDADE DOS SOLOS DA SUB-BACIA DAS
POSSES, EXTREMA (MG), SOB DIFERENTES
AGROECOSSISTEMAS**

LAVRAS - MG

2013

GABRIELA CAMARGOS LIMA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS E ÍNDICE DE QUALIDADE DOS SOLOS DA SUB-BACIA
DAS POSSES, EXTREMA (MG), SOB DIFERENTES
AGROECOSSISTEMAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Marx Leandro Naves Silva

Coorientador

Dr. Marcelo Silva de Oliveira

LAVRAS - MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Lima, Gabriela Camargos.

Variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos e índice de qualidade dos solos da sub-bacia das Posses, Extrema (MG), sob diferentes agroecossistemas / Gabriela Camargos Lima. – Lavras : UFLA, 2013.

140 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Max Leandro Naves Silva.

Bibliografia.

1. Matéria orgânica. 2. Pastagem. 3. Conservação do solo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.45

GABRIELA CAMARGOS LIMA

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS E ÍNDICE DE QUALIDADE DOS SOLOS DA SUB-BACIA
DAS POSSES, EXTREMA (MG), SOB DIFERENTES
AGROECOSSISTEMAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 02 de maio de 2013.

Dr. Marcelo Silva de Oliveira	UFLA
Dr. Mozart Martins Ferreira	UFLA
Dr. Marco A. Carbone Carneiro	UFLA
Dr. Ronaldo Luiz Mincato	UNIFAL

Dr. Marx Leandro Naves Silva
Orientador

LAVRAS – MG

2013

À vovó Laura, possuidora de uma sabedoria infinita...
...mulher forte e pequenina com um grande coração.
DEDICO

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo amor incondicional;

Ao meu namorado André, por ter me apoiado sempre;

Às amigas para a vida toda: Natália, Marina e Liana;

Às novas amigas e colegas no IEF, Luiza e Mariana, pelo incentivo e ajuda na etapa final da tese;

Aos grandes amigos e companheiros de república que fizeram parte desta jornada: Kamila, Lina, Murilo e Isabel;

Aos colegas e amigos de Pós-Graduação, em especial Mayesse, Anna, Carla, Dani, Amanda e Bárbara, pela amizade, convívio, apoio, agradável troca de experiência, estudos e ajuda neste trabalho;

Aos alunos de iniciação científica, Fábio, Wharley, Andrew e Rodrigo, pelo auxílio nas análises;

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo;

Ao professor Marx Leandro Naves Silva e professor Marcelo Silva de Oliveira, pela orientação;

Aos demais professores do Departamento de Ciência do Solo, pelo auxílio;

Aos membros da banca, pelas sugestões;

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), Departamento de Ciência do Solo (DCS), pela oportunidade de realização deste curso e à CAPES, pela concessão da bolsa;

À FAPEMIG (CAG-APQ-01423-11) e ao CNPq (471522/2012), pelo financiamento do projeto e à Prefeitura Municipal de Extrema, Minas Gerais, na pessoa do secretário de Meio Ambiente, Paulo Henrique Pereira, pelo suporte logístico, e ao funcionário Benedito Arlindo Cortes, pelo auxílio nos trabalhos de campo;

A todos que, direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO GERAL

O bioma mata atlântica está constantemente sob ameaça de desastres como enchentes e a erosão hídrica, isso ocorre devido ao uso e manejo incorreto dos recursos naturais água, solo e florestas dos quais o homem retira elementos essenciais para sua sobrevivência. Nos biomas, o solo é um dos recursos naturais de maior importância e heterogeneidade, refletindo na variabilidade de seus atributos químicos e físicos que é decorrente de seu processo de formação natural e do uso realizado pelo homem. Estes atributos associados entre si conferem resultados que possibilita determinar condições de agregação do solo em relação a cada uso e que favorecem maior infiltração de água, menor perda de solo por erosão hídrica e conseqüente maior recarga de água do lençol freático. Portanto, os objetivos com o presente estudo foram determinar e avaliar as inter-relações entre atributos físicos e químicos de solo, a variabilidade espacial e índice de qualidade do solo em relação à erosão hídrica e recarga de água, na sub-bacia hidrográfica das Posses, Extrema (MG). Verificou-se nas pastagens baixa macroporosidade, baixos teores de matéria orgânica e maior densidade do solo. Os atributos químicos e físicos do solo, em sua maioria, apresentaram dependência espacial, o que permitiu o seu mapeamento a partir de técnicas geoestatísticas. As áreas as quais obtiveram maiores deteriorações e menores índices de qualidade do solo foram àquelas ocupadas por pastagens. A manutenção das áreas mais críticas, a partir da preservação da mata nativa e povoamentos com eucalipto, e áreas com maior capacidade de suporte com pastagens manejadas, favorecem a conservação dos atributos físicos e químicos do solo, permitindo a recarga de água no solo.

Palavras-chave: Matéria orgânica. Pastagem. Conservação do solo.

GENERAL ABSTRACT

The Atlantic forest biome is constantly under threat from disasters such as floods and erosion. This occurs due to incorrect use and management of water, soil and forests, from which man removes elements essential for their survival. In the biomes, soil is one of the most important and heterogeneous natural resource, which is reflected in the variability of its chemical and physical attributes which result from its natural formation process and use by men. The association of these attributes determines results which allow the determination of soil aggregation conditions for each use, and shows which one promotes greater water infiltration, reduced soil loss by water erosion and, consequently, higher groundwater recharge. Therefore, the objectives of this study were to determine and evaluate the interrelations between physical and chemical soil attributes, spatial variability and soil quality index in relation to water erosion and water recharge, in the Posses sub-basin, in the municipality of Extrema, Minas Gerais, Brazil. We verified that low macroporosity, low organic matter content and high soil density in the pastures. Chemical and physical soil properties, in its majority, presented spatial dependency, which allowed its mapping with geostatistical techniques. The areas with higher deterioration and lower soil quality index were those occupied by pastures. The maintenance of the most critical areas, by the preservation of native forest and eucalypt plantations, and areas with greater bearing capacity with managed pastures, favor the conservation of physical and chemical soil attributes, allowing soil water recharge.

Key words: Organic matter. Pasture. Soil conservation.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- Figura 1 Mapa de localização da Sub-bacia das Posses, Extrema (MG)39
- Figura 2 Mapa das classes de solos (a) e relevo (b) da sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....40
- Figura 3 Uso atual do solo na Sub-bacia das Posses, Extrema, MG.....41
- Figura 4 Curva de retenção de água no solo ajustada pelo modelo de Genuchten (1980) para o Argissolo Vermelho-Amarelo (a), Cambissolo Háptico (b), Cambissolo Húmico (c), Neossolo Flúvico (d), Neossolo Litólico (e), na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....50
- Figura 5 Capacidade de Campo, Ponto de Murcha Permanente e Água Disponível para o Argissolo Vermelho-Amarelo (a), Cambissolo Háptico (b), Cambissolo Húmico (c), Neossolo Flúvico (d), Neossolo Litólico (e), na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....52
- Figura 6 Resistência do solo à penetração (RP), em perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo (a), Cambissolo Háptico (b), Cambissolo Húmico (c), Neossolo Flúvico (d), Neossolo Litólico (e), na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....54

CAPÍTULO 3

- Figura 1 Mapa de localização da Sub-bacia das Posses, Extrema (MG)71
- Figura 2 Mapa das classes de solos (a) e relevo (b) da sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....72
- Figura 3 Mapa de uso atual do solo (a) e da divisa das propriedades rurais (b) na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....73

Figura 4	Mapa dos pontos amostrados na sub-bacia das Posses, Extrema MG	74
Figura 5	Semivariogramas dos atributos químicos do solo: cálcio, magnésio, potássio, fósforo, pH e matéria orgânica do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)	88
Figura 6	Semivariogramas dos atributos físicos do solo: diâmetro médio geométrico com e sem pré-umedecimento (DMG_{cp} e DMG_{sp}), diâmetro médio ponderado com e sem pré-umedecimento (DMP_{cp} e DMP_{sp}), índice de floculação (IF) na sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	91
Figura 7	Mapa de distribuição dos atributos químicos do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	95
Figura 8	Mapa de distribuição dos atributos físicos do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	99

CAPÍTULO 4

Figura 1	Mapa de localização da Sub-bacia das Posses, Extrema (MG)	113
Figura 2	Mapa das classes de solos (a) e relevo (b) da sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	113
Figura 3	Uso atual do solo na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	114
Figura 4	Pontos amostrados na sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	122
Figura 5	Semivariogramas do índice de qualidade do solo da sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	130
Figura 6	Mapa de distribuição do índice de qualidade do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	131

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

- Tabela 1 Caracterização dos sistemas de mata nativa e demais agrossistemas avaliados na sub-bacia das Posses, Extrema (MG) ... 42
- Tabela 2 Teores de areia, silte, argila e matéria orgânica do solo (MO), macro e microporosidade, condutividade hidráulica do solo saturado (k) e densidade do solo (DS), para os diferentes usos e solos ocorrentes na Sub-bacia das Posses, município de Extrema (MG)..... 48
- Tabela 3 Resistência do solo à penetração avaliada a uma profundidade de 20 cm e umidade do solo para os diferentes usos e solos ocorrentes na Sub-bacia das Posses, município de Extrema (MG) .. 55
- Tabela 4 Coeficiente de Correlação de Pearson entre a resistência do solo à penetração (RP) e atributos indicadores de qualidade do solo em relação à erosão hídrica..... 57
- Tabela 5 Coeficiente de Correlação de Pearson entre a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD) e permeabilidade do solo à água (K) e atributos indicadores de qualidade do solo em relação à erosão hídrica..... 58

CAPÍTULO 3

- Tabela 1 Teores de areia, silte, argila para solos ocorrentes na Sub-bacia das Posses, município de Extrema - MG 79

Tabela 2	Diâmetro médio geométrico com e sem pré-umedecimento (DMGcp e DMGsp), Diâmetro médio ponderado com e sem pré-umedecimento (DMPcp e DMPsp), Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) e teores médios de matéria orgânica para cada classe e uso de solo presente na sub-bacia das Posses, Município de Extrema (MG)	81
Tabela 3	Parâmetros Estatísticos para os atributos químicos e físicos do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)	82
Tabela 4	Parâmetros de ajuste do semivariograma experimental para os atributos físicos e químicos relacionados com a qualidade do solo em relação erosão hídrica, para a sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	85

CAPITULO 4

Tabela 1	Caracterização dos sistemas nativos de referência demais sistemas avaliados na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)	115
Tabela 2	Deterioração dos atributos químicos e físicos em relação aos sistemas nativos de referência e índice de qualidade do solo para diferentes sistemas e uso e manejo do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	124
Tabela 3	Parâmetros Estatísticos para o índice de qualidade do solo avaliado em cada classe de solo estudada na sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	128
Tabela 4	Parâmetros de ajuste do semivariograma experimental para índice de qualidade do solo (IQS) para s sub-bacia das Posses, Extrema (MG).....	129

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	Introdução geral	13
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Mata Atlântica e Sistema Cantareira	13
1.2	Projeto: Conservador das Águas	17
1.3	Atributos físicos e químicos indicadores de qualidade do solo em relação à erosão hídrica e recarga de água	19
1.4	Geostatística aplicada a estudos de variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo	24
	REFERÊNCIAS	26
CAPÍTULO 2	Atributos físicos e químicos do solo sob diferentes agroecossistemas	33
1	INTRODUÇÃO	35
2	MATERIAL E MÉTODOS	38
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	60
CAPÍTULO 3	Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de solo sob uso de pastagens e com remanescentes de Mata Atlântica, na sub-bacia hidrográfica das posses, Extrema, MG	64
1	INTRODUÇÃO	66
2	MATERIAL E MÉTODOS	70
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4	CONCLUSÕES	100
	REFERÊNCIAS	101
CAPÍTULO 4	Determinação e espacialização do índice de qualidade do solo em áreas de uso agrícola, florestal, pastagens e remanescentes de Mata Atlântica, na sub-bacia das posses, Extrema (MG)	106
1	INTRODUÇÃO	108
2	MATERIAL E MÉTODOS	112
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	123
4	CONCLUSÕES	133
	REFERÊNCIAS	134

CAPÍTULO 1 Introdução geral

1 INTRODUÇÃO

1.1 Mata Atlântica e Sistema Cantareira

O Brasil é o principal país entre aqueles detentores de megadiversidade, possuindo entre 15 e 20% do número total de espécies vegetais e animais da Terra. Gerir essa rica biodiversidade demanda ação urgente, fundamentada em consciência conservacionista e espelhada em políticas públicas que representem as aspirações da sociedade (CAMPANILI; PROCHNOW, 2006). Grande parte da riqueza aqui encontrada é originária da Floresta Atlântica.

Na época da colonização europeia no Brasil, a Mata Atlântica cobria aproximadamente 15% do território brasileiro, sendo a área equivalente a 1.296,446 km². Sua região de ocorrência original abrangia integralmente ou parcialmente atuais 17 estados brasileiros: Alagoas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Sergipe (BRASIL, 2010).

Segundo Brasil (2007), existe hoje 27% de remanescentes, incluindo os vários estágios de regeneração em todas as fisionomias: florestas, campos naturais, restingas e manguezais, entretanto, o percentual de mata atlântica conservado é de apenas 7,26%.

Mesmo reduzida e muito fragmentada, estima-se que a Mata Atlântica possua cerca de 20.000 espécies vegetais (algo entre 33 e 36% das espécies existentes no Brasil). Até se comparada com a Floresta Amazônica, a Mata Atlântica apresenta, proporcionalmente ao seu tamanho, maior diversidade biológica (BRASIL, 2010).

Estudos realizados no Parque Estadual da Serra do Conduru no sudeste da Bahia mostraram uma diversidade de 454 espécies de árvores por hectare, número que superou o recorde de 300 espécies por hectare registrado na Amazônia peruana em 1986, podendo significar que de fato a Mata Atlântica possui a maior diversidade de árvores do mundo (LANDAU, 2003).

O bioma Mata Atlântica é composto por diferentes tipos de formações florestais e cada uma delas com peculiares características que são definidas pela Lei nº 11.428 de 2006. Remanescentes de Mata Atlântica presentes na região sul do estado de Minas Gerais vem sendo submetidos à pressão de fatores físicos e ambientais determinados pela orientação de encostas e histórico de ocupação do solo. A sub-bacia das Posses, alvo do presente estudo, está localizada nesta região e além de fazer parte deste singular bioma, está inserida no Sistema Cantareira, composto por um conjunto de diversas represas, que concentra uma das maiores produções de água do mundo.

O bioma Mata Atlântica quando preservado proporciona uma série de benefícios ao homem. Entre estes, tem-se a regulação do clima, amenizando desastres como enchentes, secas e tempestades; a manutenção do ciclo hidrológico absorvendo, filtrando e promovendo a qualidade da água; a prevenção da erosão hídrica do solo, mantendo sua estrutura e estabilidade; a produção de oxigênio. O provimento de espaços para moradia, cultivos, recreação e turismo; a manutenção das condições dos recursos ambientais naturais, em especial a biodiversidade e a variabilidade genética, das quais o homem retira elementos essenciais para a melhoria da agricultura, produção de medicamentos e cosméticos; a manutenção de processos que a tecnologia humana não domina e nem substitui como polinização e decomposição de resíduos. A regulação da composição química dos oceanos (BRASIL, 2010).

As consequências causadas pela degradação ambiental, muitas vezes não são notadas de imediato, mas são extremamente graves. A alteração ou redução das áreas naturais afeta a própria sustentabilidade dos processos ecológicos.

O uso e a ocupação do solo sem um manejo correto, aliado ao declive acentuado, nestas regiões têm influenciado diretamente a recarga de água no solo, influência na quantidade e qualidade de água, assim como o curso anual de sua vazão e conseqüentemente a degradação física, morfológica e química do solo ocasionando à erosão hídrica.

O Sistema Cantareira possui uma área produtora de água de aproximadamente 227.950 hectares produzindo 33 mil litros por segundo, dos quais 31 são produzidos na Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba e apenas dois são produzidos na Bacia do Alto Tietê, pelo rio Juquery. Dos 31 mil litros por segundo produzidos na Bacia do Piracicaba, 22 mil litros vêm dos reservatórios Jaguari-Jacareí, cujas bacias estão inseridas majoritariamente no Estado de Minas Gerais. O sistema contém estruturas hidráulicas de regularização de vazões e de adução de água de grande porte e envolve vazões muito altas por se tratar de um sistema para abastecimento público, construído com o objetivo de garantir o atendimento de parte das demandas para o abastecimento bacias hidrográficas localizadas a jusante das mesmas (WHATELY; CUNHA, 2007).

A área de drenagem do rio Jaguari à montante da represa, dentro do Sistema Cantareira, abrange 10.3243,4 hectares. Suas nascentes estão localizadas no Estado de Minas Gerais, nos municípios de Camanducaia, Extrema, Itapeva e Toledo. No município de Extrema (MG), o rio Jaguari recebe um afluente importante, o rio Camanducaia. Alguns quilômetros abaixo da referida confluência, já dentro do Estado de São Paulo, o rio Jaguari é represado, constituindo um dos reservatórios do Sistema Cantareira. A jusante do reservatório, já fora do Sistema Cantareira, nasce no município de Americana (SP) o rio Piracicaba, pela junção dos rios Jaguari e Atibaia, seguindo depois até

o município de Barra Bonita (SP), onde se une ao rio Tietê. Como a bacia do Jaguari abrange quatro municípios mineiros e quinze paulistas, ela é considerada Federal. Nos limites do Sistema Cantareira, a bacia do rio Jaguari compreende total ou parcialmente os municípios de Camanducaia, Extrema, Itapeva, Sapucaí-Mirim, Joanópolis e Vargem (WHATELY; CUNHA, 2007).

A situação da água nas bacias formadoras do Sistema é preocupante, pois, grande parte da região (69,4%) está alterada por usos antrópicos. As áreas cobertas por vegetação de Mata Atlântica, fundamentais para a produção e purificação de água, ocupam apenas 21% da área do Sistema (INSTITUTO SÓCIO AMBIENTAL - ISA, 2007). Na bacia do rio Piracicaba, os tipos de cobertura dominantes são pastagem (45%), agricultura (31%), floresta natural e silvicultura (16%) e áreas urbanas (6%). Nos últimos 20 anos, as áreas urbanas e agrícolas aumentaram de forma constante em grande parte à custa de pastos e florestas naturais (FILOSO et al., 2003). Da mesma forma, a região do entorno da represa Jaguari-Jacaré sofre com a pressão antrópica das últimas décadas, decorrentes da alteração no uso e ocupação do solo condicionada principalmente pelo aumento populacional (ISA, 2007). Os usos mais impactantes na área são a pecuária, a criação de suínos, a presença de olarias, atividades de mineração, o processo de urbanização e o crescimento do segmento turístico (HOEFFEL et al., 2008).

Desta forma, a caracterização e entendimento do comportamento dos recursos naturais que envolvem e compreendem uma sub-bacia ou uma bacia hidrográfica, em especial uso do solo e seus atributos químicos e físicos, são fundamentais em função da sua aplicabilidade objetivando recuperação e conservação ambiental, bem como produção sustentável. Com este foco, diversos estudos em relação ao uso do solo, regime hídrico de uma sub-bacia e suas implicações foram desenvolvidos na bacia hidrográfica de Cannonsville Reservoir visando o abastecimento de água na cidade de New York, USA. Para

tanto, foram implantadas práticas de conservação do solo e da água nos sistemas de produção animal e vegetal (BRYANT et al., 2008).

O sistema de pagamentos por serviços é de importância estratégica do país, neste caso as bacias dos rios Jaguari, Piracicaba, Capivari e Jundiá (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA, 2003).

1.2 Projeto: Conservador das Águas

Considerando-se a importância da recuperação das áreas de recarga do Sistema Cantareira, especificamente da sub-bacia das Posses, o programa Conservador das Águas, tem como finalidade a compensação de proprietários rurais pela conservação da água e, juntamente com seus financiadores, vem recuperando áreas destinadas à preservação e nascentes e de recarga de água, possibilitando em longo prazo, melhores condições de solos, como a infiltração de água para abastecer o lençol freático e manter a perenidade dos rios, pela natureza.

O Sistema Cantareira é responsável pelo abastecimento de 50% da população de São Paulo. Sendo importante a recuperação da área à montante da bacia Piracicaba e o Jaguari, que compreende as nascentes do Rio Jaguari. São parceiros do Projeto Conservador das Águas: o Programa de Conservação da Floresta Atlântica da The Nature Conservancy (TNC); a Superintendência do Abastecimento de Água do Estado de São Paulo (SABESP); o Instituto Estadual de Florestas (IEF); a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras (DCS-UFLA).

Por meio da execução de ações de proteção florestal e restauração de áreas degradadas que margeiam os cursos d'água, dentro da sub-bacia hidrográfica das Posses, no município de Extrema, o projeto tem por objetivo a implantação do conceito de Pagamento por Serviços Ambientais. A Prefeitura

Municipal compensa financeiramente proprietários rurais que aderiram ao projeto, enquanto que os parceiros e também a Prefeitura se encarregam de financiar os custos de recuperação e proteção destas áreas, fundamentais para a conservação das águas em qualidade e quantidade.

O objetivo final do programa "Conservador da Águas" é garantir a sustentabilidade socioambiental dos manejos e práticas implantadas por meio do pagamento pelos serviços ambientais, e gerar incentivos econômicos a proprietários que ainda têm áreas de floresta nativa ou que pretendem recuperar áreas.

Este projeto foi a primeira iniciativa municipal brasileira que implantou o Pagamento por Serviços Ambientais baseada na relação existente entre a floresta e os serviços prestados por ela em relação à qualidade e quantidade de água a toda a sociedade.

Para que haja eficácia na recuperação da sub-bacia, é necessário que a mesma seja caracterizada em relação aos atributos do solo, água e vegetação. A parceria com a Universidade Federal de Lavras já apontou resultados e ainda provará resultados os quais contribuirão para adequada recuperação e conservação da sub-bacia das Posses.

Os resultados esperados pelo convênio são números bastante significativos: 50 nascentes protegidas; 150 hectares de matas ciliares protegidas; 280 hectares de matas de topo protegidas; 300 hectares de Reserva Legal averbados; 1200 hectares de solos conservados; 120 propriedades com práticas adequadas de saneamento ambiental.

Espera-se também que o sistema de Pagamentos por Serviços Ambientais possa ser replicado, inicialmente em outras sub-bacias do município e posteriormente para outras bacias hidrográficas do País.

1.3 Atributos físicos e químicos indicadores de qualidade do solo em relação à erosão hídrica e recarga de água

Dentre os principais recursos oferecidos pela natureza, destaca-se o solo e a água, tendo em vista sua importância para desenvolvimento e manutenção dos demais recursos. É de capital importância o conhecimento do comportamento dos seus atributos a fim de proporcionar melhor manejo e conservação da natureza.

Um solo é considerado fisicamente ideal para manutenção da qualidade ambiental dos ecossistemas quando para o crescimento de plantas quando apresentam boa retenção de água, bom arejamento, bom suprimento de calor e pouca resistência ao crescimento radicular.

Os principais fatores relacionados à produção de água são o clima, a topografia, as classes de solos, a cobertura vegetal e o uso do solo (KEESE; SCANLON; REEDEY, 2005; MENEZES et al., 2009). Além destes, a profundidade do solo (ARNOLD et al., 2000; MENEZES et al., 2009) e as características das rochas (ARNOLD et al., 2000) acima do lençol freático também podem alterar o potencial de recarga de aquíferos. A recarga de água ocorre de forma variada tanto espacial quanto temporal, como consequência das variações climáticas, diferentes uso do solo e heterogeneidade hidrogeológica (SHARMA, 1986). Os atributos físicos do solo também interferem na produção de água em sub-bacias hidrográficas.

Um solo bem estruturado permite o movimento de água em seu perfil, além de adequada aeração, disponibilidade de nutrientes, atividade microbiana, penetração de raízes, habilidade de resistir à erosão, dentre outros. A avaliação da estrutura, realizada por meio de índices que relacionam as fases sólida, líquida e gasosa do solo, permite definir suas condições de degradação. Alguns

destes índices são a densidade, a porosidade, a permeabilidade e a estabilidade de agregados do solo.

A densidade do solo é um atributo indicador da relação entre o espaço vazio e sólido do solo e pode indicar compactação, alterações estruturais e na porosidade do solo. A densidade é um importante atributo no estudo dos fluxos hidráulicos, sendo função da estrutura, textura e compactação do solo (RICHARDT; TIMM, 2004).

A porosidade é inversamente proporcional à densidade do solo e seu papel no armazenamento e movimento de água no solo é determinante. A classe de poros denominada microporos, depois de saturado em água, a retém contra a gravidade sendo responsáveis, portanto, pela retenção e armazenamento de água no solo. A classe dos macroporos, ao contrário, após serem saturados em água não a retém ou são esvaziados pela ação da gravidade contribuindo majoritariamente para a infiltração de água no solo. A permeabilidade do solo à água pode ser considerada como um dos mais importantes atributos relativos ao manejo da água no solo e de suma importância na recarga dos aquíferos.

Estudo realizado na sub-bacia hidrográfica no Alto Rio Grande observou grande variabilidade para a densidade do solo, com menores valores em glebas cultivadas com lavouras e eucalipto, sendo o contrário constatado nas glebas ocupadas com pastagens (GOMES, 2005). Estudos desenvolvidos por Silva (2001), na mesma região, avaliando a qualidade do solo em sistemas de manejo, no município de São João Del Rei (MG), apontaram para reduções significativas da permeabilidade do solo em sistema convencional de cultivo da batata ($140,7 \text{ mm h}^{-1}$) em relação ao cerrado nativo ($288,4 \text{ mm h}^{-1}$). A presença de maior densidade do solo nas regiões de recarga de nascentes é indicativa de perturbação das condições de infiltração e restrição ao fluxo de água no solo, o que compromete o abastecimento do aquífero, favorece o escoamento superficial direto, possibilita o arraste de partículas, promove o assoreamento dos cursos de

água, aumenta a resistência mecânica à penetração radicular e reduz a aeração e a disponibilidade de água às plantas (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Estes autores evidenciaram que as principais alterações no solo são decorrentes da redução do teor de carbono orgânico do solo, aumento da densidade do solo, redução da porosidade (aumento da microporosidade em detrimento da macroporosidade), estabilidade e tamanho dos agregados, permeabilidade do solo à água e resistência do solo à penetração.

Em solos tropicais, menores valores de densidade do solo estão relacionados à formação da estrutura granular, em consequência, principalmente, de elevados teores de óxidos de alumínio (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; GIAROLA; SILVA; IMHOFF, 2002; PEDROTTI et al., 2003). Alvarenga et al. (1996) verificaram que a restrição ao crescimento radicular de leguminosas e a infiltração de água ocorre em valores de densidade acima de $1,25 \text{ kg dm}^{-3}$, em latossolo de textura muito argilosa.

Comparando valores de densidade do solo em diferentes povoamentos florestais, Martins et al. (2002) observaram um menor valor para a área sob mata nativa ($1,03 \text{ kg dm}^{-3}$), em relação a outras áreas ($1,25$ a $1,28 \text{ kg dm}^{-3}$), onde havia sido realizado preparo do solo para implantação dos povoamentos, além de preparos anteriores, quando utilizadas para cultivo agrícolas. Seixas, Oliveira Júnior e Souza (1998) verificaram aumento na densidade do solo sob floresta após a realização de colheita mecanizada, independente do sistema de manejo de resíduos utilizado, em solo de textura arenosa.

Diversos autores relatam alteração da densidade do solo em função do manejo, tendo como referencial a condição natural (BEUTLER et al., 2001b; CARVALHO JÚNIOR; FONTES; COSTA, 1998; CAVENAGE et al., 1999; CORRÊA, 1985; MARTINS et al., 2002; ROSA et al., 2003). Segundo Beltrame, Gondim e Taylor (1981), a densidade do solo afeta a sua resistência à penetração e a condutividade hidráulica. A relação entre densidade do solo e

resistência à penetração também foi observada por Smith, Johnston e Lorentz (1997).

Conforme mencionado, a qualidade estrutural do solo em função do manejo também pode ser avaliada por meio da porosidade do solo. Vários autores comprovam alteração de porosidade em função de alterações no ambiente natural, tanto no setor agrícola (BEUTLER et al., 2001b; CARVALHO JÚNIOR; FONTES; COSTA, 1998; CORRÊA, 1985; KLEIN; LIBARDI, 2002; ROS et al., 1997; ROSA et al., 2003) como no setor florestal (ALVARENGA; DAVIDE, 1999).

A estabilidade de agregados expressa a resistência à degradação quando os agregados do solo são submetidos a forças que tendem a rompê-los. É importante em estudos de qualidade do solo, sendo utilizada como indicadora da sustentabilidade de sistemas de uso e manejo do solo (ANDRÉA et al., 2002; CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990; CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998; MARTINS et al., 2002; SILVA; CURI; BLANCANEAUX, 2000; SILVA et al., 1998; SILVA; MIELNICZUK, 1997; VIEIRA; MUZILLI, 1984).

Uma maior estabilidade de agregados, estimada pelo diâmetro médio geométrico, foi observada em áreas de mata nativa (BEUTLER et al., 2001a; MARTINS et al., 2002; SILVA et al., 1998), comparada com outros sistemas, visto que o preparo do solo tende a romper a estrutura do solo, destruindo os agregados.

Segundo Andréa et al. (2002) e Silva, Curi e Blancaneaux (2000), os sistemas conservacionistas de manejo, como o plantio direto, ao contrário dos preparos com revolvimento do solo, mantiveram as melhores condições de agregação, estimadas pelo diâmetro médio geométrico e porcentagem de agregados maior que 2 mm. Estes resultados de agregação evidenciam a contribuição da matéria orgânica do solo com a estabilidade de agregados, que

se apresenta em maior concentração nos sistemas naturais (ANDRÉA et al., 2002; BEUTLER et al., 2001a; SILVA et al., 1998; SILVA; REINERT; REICHERT, 2000).

Em condição natural, os teores de matéria orgânica podem ser mais elevados em função do grande aporte de resíduos e conservação no ecossistema. Por outro lado, ao avaliar a estabilidade de agregados em mata plantada de eucalipto e mata nativa, Fonseca (1984) observou que existem evidências no aumento da estabilidade de agregados com a mudança de mata natural para eucalipto. Segundo esse autor, apesar da maior quantidade de matéria orgânica sob mata natural, possivelmente a maior atividade da microbiota sob eucalipto, associada ao uso do fogo na implantação dos reflorestamentos, sejam as possíveis causas.

A presença do carbono orgânico no solo reduz a compactação e erosão hídrica, pois atenua o impacto das gotas de chuva e o salpicamento do solo (MORAES et al., 2003). O aumento da quantidade de carbono orgânico do solo altera a distribuição de poros, facilitando a infiltração de água criando condições favoráveis ao desenvolvimento do macro e micro fauna, além de aumentar a capacidade de retenção, armazenamento e recarga dos aquíferos, proporcionando menores oscilações das vazões das nascentes ao longo do ano hidrológico (BERTOL et al., 2000).

A importância da matéria orgânica para o ecossistema está relacionada às funções que desempenha, tanto de natureza física, química como biológica, o que sustenta sua condição de atributo relevante em estudos de qualidade do solo.

Diversos estudos envolvendo sistemas de manejo verificaram correlação entre teor de carbono orgânico no solo e agregação (ALVARENGA; DAVIDE, 1999; ANDRÉA, 2002; CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998).

A matéria orgânica do solo atua nas propriedades físicas do solo promovendo a estruturação, contribuindo para a estabilidade de agregados,

reduzindo a densidade do solo, e deste modo, conseqüentemente, favorece a infiltração de água no solo e o desenvolvimento de raízes, além de fornecer nutrientes às plantas.

1.4 Geoestatística aplicada a estudos de variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo

Uma técnica que auxilia a avaliação e compreensão dos recursos naturais é a geoestatística, que permite descrever a continuidade espacial, característica essencial de muitos fenômenos naturais. A geoestatística oferece um conjunto de ferramentas estatísticas que incorporam no processamento dos dados as coordenadas espaciais das observações (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

A espacialização de atributos do solo possibilita conhecer melhor a variação e o comportamento destes no ambiente. Segundo Berge e Klamt (1997) e Couto, Klamt e Stein (2000), estes estudos podem ser feitos em grandes áreas, abrangendo diversos tipos de solo, desde que haja uma malha amostral adequada. Estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo são importantes não apenas em amostragens ou interpretação dos dados, mas também auxiliam o levantamento e classificação de solos (NOVAES FILHO et al., 2007).

O interesse da análise geoestatística não se limita à obtenção de um modelo de semivariograma e seus parâmetros, desejando-se também prever valores em pontos não amostrados. Nesse segmento, Souza et al. (2010) avaliaram o comportamento de atributos químicos do solo interpolando pontos amostrados e não amostrados em Alegre, ES. Hurtado et al. (2009), a partir da espacialização de atributos químicos e físicos do solo mostrou que a geoestatística foi uma ferramenta viável para identificar áreas de inconsistência

em termos de correção da acidez do solo e definir melhores dosagens e tipos de calcário para diferentes zonas de acidez.

A avaliação da variabilidade espacial dos atributos do solo vem sendo utilizada, por meio de ferramentas da geoestatística, como uma fonte eficiente para o conhecimento da relação das propriedades do solo no espaço (GREGO; VIEIRA, 2005). Sendo adequada no estudo de um manejo que vise aperfeiçoar as práticas culturais na produção e a conservação do solo (CAMBARDELLA et al., 1994).

Gontijo et al. (2012), pela análise espacial da matéria orgânica do solo verificou dependência espacial desta indicando distribuição de valores médios em toda área estudada.

Estudos em Juazeiro mostraram o incremento da resistência mecânica do solo à penetração com o aumento da profundidade de maneira que a ferramenta da geoestatística possibilitou definir as áreas as quais apresentam maiores níveis de compactação do solo (COELHO; CORTEZ; OLSZEWSKI, 2012).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual operativo do programa “Produtor de Água”**. Brasília, 2003. 65 p.

ALVARENGA, M. I. N.; DAVIDE, A. C. Características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro e a sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 933-9422, 1999.

ALVARENGA, R. C. et al. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 319-326, maio/ago. 1996.

ANDRÉA, A. F. d' et al. Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos cerrados no sul do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 1047-1054, 2002.

ARNOLD, J. G. et al. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 227, n. 1, p. 21-40, Mar. 2000.

BELTRAME, L. F. S.; GONDIM, L. A. P.; TAYLOR, J. C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 5, n. 3, p. 145-149, 1981.

BERG, M. V. D.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solo na região do Planalto Médio, RS: I., análise de variância por amostragem aninhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 393-399, set./out. 1997.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de capim-Elefante-Anão C.V. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 1047-1054, maio 2000.

BEUTLER, A. N. et al. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos cerrados no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, n. 1, p. 129-136, jan. 2001a.

_____. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, n. 1, p. 167-177, jan. 2001b.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Levantamento da cobertura vegetal nativa do bioma Mata Atlântica**. Rio de Janeiro, 2007. 84 p.

_____. **Manual de adequação ambiental**. Brasília, 2010. 87 p.

BRYANT, R. B. et al. Cannonsville reservoir and town brook watersheds: documenting conservation efforts to protect New York City's drinking water. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 63, n. 6, p. 339-344, 2008.

CAMARGO, O. T. de; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Degaspar, 1997. 132 p.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 1, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.

CAMPANILI, M.; PROCHNOW, M. **Mata Atlântica: uma rede pela floresta**. Brasília: RMA, 2006. 332 p.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 14, n. 1, p. 99-105, 1990.

CARVALHO JÚNIOR, I. A.; FONTES, L. E. F.; COSTA, L. M. Modificações causadas pelo uso e a formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média na região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 505-514, 1998.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com teor de carbono orgânico num Latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de cultura e métodos de preparo de amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

CAVENAGE, A. et al. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 997-1003, 1999.

COELHO, D. S.; CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 1, p. 755-763, jan. 2012.

CORRÊA, J. C. Efeito de métodos de cultivo em algumas propriedades físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso do Estado do Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 11, p. 1317-1322, nov. 1985.

COUTO, E. G.; KLAMT, E.; STEIN, A. Estimativa do teor de argila e de potássio trocável em solo esparsamente amostrado no sul do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 1, p. 129-140, out. 2000.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 515-524, 1999.

FILOSO, S. et al. Land use and nitrogen export in the Piracicaba River basin, Southeast Brazil. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 65, n. 1, p. 275-294, Sept. 2003.

FONSECA, S. **Propriedades físicas, químicas e microbiológicas de um Latossolo Vermelho Amarelo sob eucalipto, mata natural e pastagens**. 1984. 78 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1984.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 885-893, jul./ago. 2002.

GOMES, N. M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela na Região do Alto Rio Grande, MG**. 2005. 124 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

GONTIJO, I. et al. Variabilidade e correlação espacial de micronutrientes e matéria orgânica do solo com a produtividade da pimenta do reino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 1, p. 1093-1102, jan./fev. 2002.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 2, p. 169-177, jan. 2005.

HOEFFEL, J. L. et al. Trajetórias do Jaguar: unidades de conservação, percepção ambiental e turismo: um estudo na APA do Sistema Cantareira. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 131-148, 2008.

HURTADO, S. M. C. et al. Spatial variability of soil acidity attributes and the spatialization of liming requirement for corn. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1351-1359, set./out. 2010.

INSTITUTO SÓCIO AMBIENTAL. **Um olhar sobre o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo**: resultados do diagnóstico socioambiental participativo do sistema Cantareira. São Paulo, 2007. 67 p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 51 p.

KEESE, K. E.; SCANLON, B. R.; REEDEY, R. C. Assessing controls on diffuse groundwater recharge using unsaturated flow modeling. **Water Resources Research**, Oxford, v. 41, n. 1, p. 1-12, June 2005.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 857-867, jul./ago. 2002.

LANDAU, E. C. **Padrões de ocupação espacial da paisagem na mata atlântica do sudeste da Bahia, Brasil**. Salvador: Instituto de Estudos Sócio-Ambientais do Sul da Bahia; Conservation International do Brasil, 2003. 15 p.

MARTINS, S. G. et al. Avaliação de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférrico sob diferentes povoamentos florestais. **Cerne**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 32-42, 2002.

MENEZES, M. D. et al. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associadas ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, Serra da Mantiqueira, MG. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 82, p. 175-184, 2009.

MORAES, J. M. et al. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.

NOVAES FILHO, J. P. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia Meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p. 91-100, nov. 2007.

PEDROTTI, A. et al. Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 1, p. 1-9, jan./fev. 2003.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 524 p.

ROS, C. O. da et al. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 2, p. 241-247, 1997.

ROSA, M. E. C. et al. Formas de carbono em latossolo vermelho eutroférico sob plantio direto no sistema biogeográfico do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 911-923, set./out. 2003.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. D.; SOUZA, C. R. Efeito da camada de resíduos na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 54, p. 9-16, 1998.

SHARMA, M. L. Measurement and prediction of natural groundwater recharge: an overview. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 25, n. 1, p. 49-56, 1986.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 113-117, 1997.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BLANCANEAX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de um Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2485-2492, dez. 2000.

SILVA, M. L. N. et al. Estabilidade de resistência de agregados de Latossolo Vermelho-Escuro cultivado com sucessão de milho-adubo verde. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 1, p. 97-103, 1998.

SILVA, R. R. **Qualidade do solo em função de diferentes sistemas de manejo na região Campos das Vertentes, Bacia do Alto Rio Grande, MG**. 2001. 108 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 1, p. 191-199, jan./fev. 2000.

SMITH, C. M.; JOHNSTON, M. A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, n. 1/2, p. 93-111, 1997.

SOUZA, G. S. et al. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 73-81, 2010.

VIEIRA, M. J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 7, p. 873-882, jul. 1984.

WHATELY, M.; CUNHA, P. **Cantareira 2006**: um olhar sobre o maior manancial de água da região metropolitana de São Paulo. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2007. 67 p.

CAPÍTULO 2 Atributos físicos e químicos do solo sob diferentes agroecossistemas

RESUMO

São importantes nos estudos de recarga de água do solo os atributos físicos, entre estes a textura, curva de retenção de água no solo, resistência do solo à penetração, macro e microporosidades, permeabilidade do solo à água e densidade do solo, com relação aos atributos químicos destacamos os teores de carbono no solo. Estes atributos associados entre si conferem resultados que possibilitam determinar condições que favorecem maior infiltração de água, menor perda de solo por erosão hídrica e conseqüente maior recarga de água do lençol freático. Um dos fatores responsáveis pela perda da qualidade dos atributos físicos está relacionado ao uso e manejo do solo de forma inadequada. O manejo inadequado afeta diretamente a estrutura do solo por meio da compactação, o que conseqüentemente pode aumentar a resistência do solo à penetração e diminuir a permeabilidade do solo à água. Portanto, os objetivos com o presente estudo foram avaliar o comportamento dos atributos físicos de solo relacionados na recarga de água no solo considerando-se os diferentes usos e manejo dos solos ocorrentes na sub-bacia das Posses, Extrema (MG). Não foi apontada correlação entre matéria orgânica e resistência do solo à penetração, na profundidade avaliada. A maior correlação foi verificada entre ponto de murcha permanente e teor de areia, sendo esta inversa. Para a permeabilidade do solo à água, a maior correlação ocorreu em relação à densidade do solo (-0,307), sendo esta inversa. A manutenção das áreas mais críticas, a partir da preservação da mata nativa e povoamentos com eucalipto, e áreas com maior capacidade de suporte com pastagens manejadas, favorecem a conservação da estrutura e a permeabilidade do solo à água, permitindo a recarga de água no solo.

Palavras-Chave: Permeabilidade do solo à água. Matéria orgânica. Pearson.

ABSTRACT

Physical attributes such as texture, soil water retention curve, soil penetration resistance, macro and microporosity, soil permeability to water and soil density, and chemical attributes such as soil carbon content, are important when studying soil water recharge. These attributes in association provide results which allow the determination of conditions which favor greater water infiltration, reduced soil loss by water erosion and consequent higher groundwater recharge. One of the factors responsible for the loss of physical attribute quality is related to incorrect use and soil management. Improper management directly affects soil structure through compaction, which may increase the soil's resistance to penetration and decrease soil permeability to water. Therefore, the objectives of this study were to evaluate the behavior of soil physical attributes related to recharging ground water, considering the different uses and managements which occur in Posses sub-basin, Extrema, Minas Gerais, Brazil. No correlation was noted between organic matter and soil resistance to penetration, in any of the studied depths. The highest correlation was verified between permanent wilting point and sand content, being a reversed correlation. To soil permeability to water, the highest correlation occurred with a soil density of (-0.307), being a reverse correlation. The maintenance of the most critical areas, by preservation of native forests and eucalypt plantations, and areas with greater bearing capacity with maintained pastures, favor the conservation of soil structure and permeability to water, allowing recharging of ground water.

Key words: Soil permeability to water. Organic matter. Pearson.

1 INTRODUÇÃO

A água é essencial ao ambiente e à agricultura, sendo de vital importância para as plantas. A água é utilizada pelas plantas ficando armazenada no solo e sendo fornecida às plantas de acordo com suas necessidades. A recarga natural deste reservatório é variável, devido, principalmente, à variabilidade na distribuição das chuvas e, atualmente, os atributos físicos do solo vêm sendo alterados comprometendo a distribuição de água e crescimento vegetal devido, principalmente, ao seu manejo inadequado (SPERA et al., 2004).

A determinação da curva de retenção no solo é de suma importância nos estudos de movimento e de recarga de água no solo, pois fornece o teor de água do solo (g g^{-1}) em diferentes tensões (kPa). A curva de retenção de água é específica a cada solo e depende dos atributos do solo. A textura do solo interfere na retenção de água. Solos argilosos retêm mais que solos arenosos, além disso, a textura do solo pode influenciar e modificar outras propriedades como porosidade total, macro e microporosidade, densidade do solo, consistência do solo, e superfície específica (COSER et al., 2007).

A curva de retenção de água no solo possibilita determinar a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD), esta última obtida por meio da diferença entre as duas primeiras. A capacidade de campo corresponde ao limite superior da faixa de disponibilidade de água às plantas, e o conteúdo de água correspondente é, comumente, determinado nos potenciais matriciais de 10 kPa, para solos de textura arenosa, ou de 33 kPa, para solos de textura média a argilosa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1995). O limite inferior da faixa de disponibilidade equivale ao ponto de murcha permanente (PMP) e a umidade correspondente é determinada submetendo-se amostras de solo à tensão de 1.500 kPa.

Além da determinação da curva de retenção de água no solo, considera-se importante nos estudos de movimento e recarga de água do solo, o comportamento de outros atributos físico-hídricos como a resistência do solo à penetração, macro e microporosidades, permeabilidade do solo à água e densidade do solo. Estes atributos conferem resultados que possibilitam inferir sobre condições que favorecem maior infiltração de água, menor perda de solo por erosão hídrica e conseqüente maior ou menor recarga do lençol freático.

Alguns dos fatores responsáveis pela perda da qualidade dos atributos físico-hídricos estão relacionados ao manejo do solo. O manejo inadequado afeta diretamente a estrutura do solo por meio da compactação, o que conseqüentemente pode aumentar a resistência do solo à penetração e diminuir a permeabilidade do solo à água. Um solo com elevada resistência à penetração dificulta a infiltração e crescimento de raízes (SOUZA et al., 2004).

Dessa maneira, os atributos do solo precisam ser monitorados, para que o uso deste recurso não provoque sua degradação (BERTOL et al., 2000).

A degradação dos atributos físicos do solo é um dos principais processos responsáveis pela perda da qualidade estrutural, diminuição da infiltração de água no solo e aumento da erosão hídrica (BERTOL et al., 2001). A permeabilidade do solo à água (K) é um dos principais atributos físico hídricos do solo, pois fornece informações imprescindíveis sobre capacidade de transporte de água, solutos e substâncias químicas em praticamente todos os mecanismos de fluxo. O entendimento do fluxo de água no solo é fundamental para a compreensão dos processos de infiltração, de escoamento superficial de água no solo, em estudos de erosão hídrica e lixiviação (MORAES et al., 2003), além das inferências sobre a recarga de água no solo. Segundo Tavares Filho et al. (1999), uma estrutura de solo degradada pode diminuir o volume explorado e impedir o crescimento de raízes pelo sistema radicular.

A matéria orgânica associada aos atributos físico-hídricos exerce importante função condicionando infiltração e posterior recarga de água no solo.

A importância da matéria orgânica para o ecossistema está relacionada às funções que desempenha, tanto de natureza física, química como biológica, o que sustenta sua condição de atributo relevante em estudos de qualidade do solo.

O aumento da quantidade de carbono orgânico do solo altera a distribuição de poros, facilitando a infiltração de água criando condições favoráveis ao desenvolvimento da macro e micro fauna, além de aumentar a capacidade de retenção, armazenamento e recarga dos aquíferos, proporcionando menores oscilações das vazões das nascentes ao longo do ano hidrológico (BERTOL et al., 2000).

O presente estudo foi realizado na sub-bacia das Posses, localizada na cabeceira da bacia do Rio Jaguaria, qual exerce papel fundamental de recarga de água do solo para o Sistema Cantareira, considerado o maior sistema produtor de água do mundo. Além da sub-bacia das Posses estar inserida no Sistema Cantareira é considerada de alta relevância para estudo devido à presença de remanescentes do bioma da Mata Atlântica.

Portanto, os objetivos com o presente estudo foram avaliar a retenção de água no solo, bem como capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível; resistência do solo à penetração; macro e microporosidade; permeabilidade do solo à água; densidade do solo; textura e matéria orgânica e verificar, utilizando a Correlação de Pearson, a interação desses atributos entre si.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo possui 1.196,70 ha e compreende a Sub-bacia Hidrográfica das Posses, localizada no município de Extrema, no Sul do Estado de Minas Gerais (Figura 1). Esta sub-bacia está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari, um dos rios que abastece o Reservatório do Sistema Cantareira no Estado de São Paulo. Encontra-se dentro do bioma da Mata Atlântica (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA, 2008).

Situa-se entre as coordenadas UTM 374.500 e 371.500 de longitude E e entre 7.468.200 e 7.474.800 de latitude S (Datum SAD 69, Zona 23S) e entre as altitudes de 1.144 e 1.739 m (bacia de cabeceira). O clima na sub-bacia é do tipo Cwb, de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado como mesotérmico de verões brandos e suaves, e estiagem de inverno. A temperatura média anual é de 18 °C, tendo nos meses mais quente e mais frio temperaturas médias de 25,6 °C e 13,1 °C, respectivamente, com ocorrência de geadas anuais, e precipitação média anual de 1.477 mm (ANA, 2008).

As classes de solo predominantes na sub-bacia são: Cambissolo Háplico (CX) e Cambissolo Húmico (CH), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Neossolo Flúvico (RY) e Neossolo Litólico (RL) (Figura 2a). Sendo que o Cambissolo Háplico ocupa aproximadamente 352 ha (29%), o Cambissolo Húmico ocupa aproximadamente 109 ha (10%), o Argissolo Vermelho-Amarelo ocupa aproximadamente 478 ha (40%), o Neossolo Flúvico aproximadamente 109 ha (10%) e o Neossolo Litólico abrangendo aproximadamente 136 ha (11%). As fases de relevo predominantes são ondulado e forte ondulado (Figura 2b). Atualmente o principal uso do solo é pastagem (73%) da área, equivalente a 873 hectares, aproximadamente, sendo que grande parte encontra-se mal manejada (LIMA, 2010). Há também povoamentos de eucalipto (ocupando cerca de 20 hectares da área), culturas anuais (aproximadamente 12 hectares) e

mata nativa (aproximadamente 290 hectares), sendo grande área ocupada por mata de araucária (SILVA et al., 2013) (Figura 3 e Tabela 1).

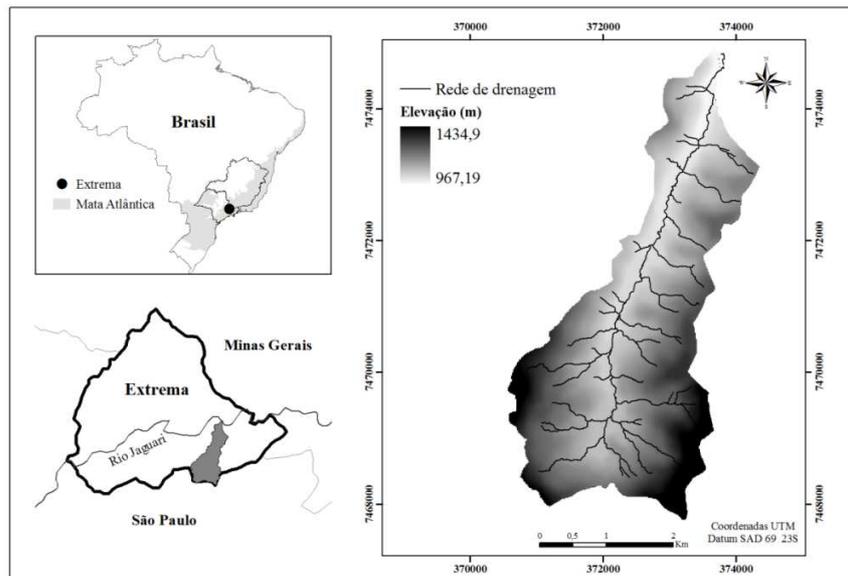


Figura 1 Mapa de localização da Sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

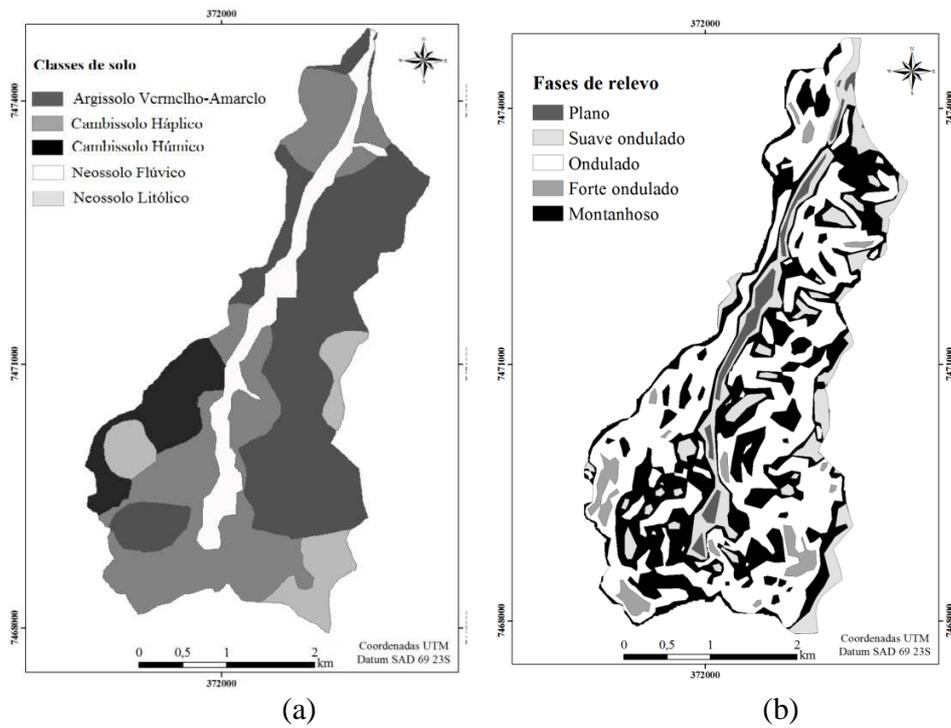


Figura 2 Mapa das classes de solos (a) e relevo (b) da sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

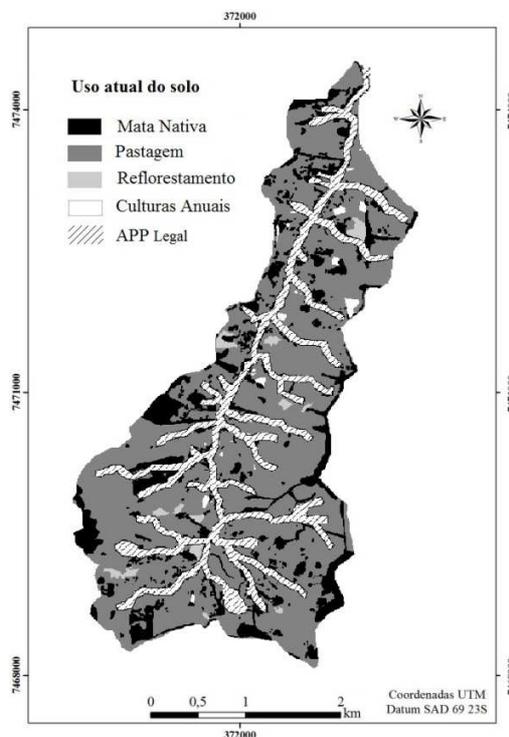


Figura 3 Uso atual do solo na Sub-bacia das Posses, Extrema, MG

Para determinação da matéria orgânica, textura, macroporosidade, microporosidade, permeabilidade do solo à água e densidade do solo, além da retenção de água no solo e resistência do solo à penetração, foi realizada a coleta de amostras deformadas e indeformadas numa profundidade de 0 – 20 cm em 14 pontos na sub-bacia das Posses com três repetições. A amostragem constituiu-se aleatória e para cada ponto coletado, realizou-se a coleta de mais dois pontos que contemplassem o mesmo ambiente. Definindo-se assim, 3 (três) repetições por ponto. Contemplando dessa maneira para este estudo as 5 classes de solos dominantes: Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Cambissolo Háptico (CX), Cambissolo Húmico (CH), Neossolo Flúvico (RY) e Neossolo Litólico (RL) e os seguintes usos do solo: Pastagem (P), Eucalipto (EUC), Mata nativa (MN),

solo sem cobertura vegetal coberto por palha de milho (SPM) e solo preparado para plantio de batata (SPB).

Tabela 1 Caracterização dos sistemas de mata nativa e demais agrossistemas avaliados na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

Solo	Uso	Descrição
PVA	P	Ocorrência de pastagem degradada, com ocorrência de erosão
	EUC	Eucalipto com serrapilheira - idade de 2 anos na época da amostragem
	SPM	Milho pós colheita - palha de milho
CX	MN	Condição original, referencial de sistema em equilíbrio
	EUC	Eucalipto com serrapilheira (regeneração)
	SPB	Batata - preparo do solo
	P	Ocorrência de pastagem degradada
CH	MN	Condição original, referencial de sistema em equilíbrio
	P	Ocorrência de pastagem degradada
	EUC	Eucalipto com serrapilheira - 2 anos na amostragem
RY	P	Ocorrência de pastagem em área de preservação permanente
RL	MN	Condição original, referencial de sistema em equilíbrio
	P	Ocorrência de pastagem em área de preservação permanente
	EUC	Eucalipto com serrapilheira (regeneração)

MN: mata nativa; EUC: povoamento de eucalipto; P: pastagem plantada; SPM: solo coberto com palha de milho; SPB: preparado para plantio de batata PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; CH: Cambissolo Húmico; CX: Cambissolo Háptico; RL: Neossolo Litólico; RY: Neossolo Flúvico.

A análise textural foi realizada pelo método de Bouyoucos. A matéria orgânica foi determinada pela oxidação úmida em $K_2Cr_2O_7$ 0,8 mol L⁻¹. Após oxidação completa, mediu-se a absorbância em colorímetro, a 650 nm (RAIJ et al., 1987).

O volume total de poros foi determinado segundo Danielson e Sutherland (1986). A microporosidade foi obtida em amostras indeformadas, previamente saturadas por 24 horas, utilizando-se mesa de tensão com 60 cm de

altura de coluna de água, sendo a macroporosidade obtida pela diferença entre a porosidade total e microporosidade. A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada seguindo metodologia descrita por Lima et al. (1990) e os resultados expressos em mm h^{-1} . A densidade do solo foi determinada em laboratório, utilizando-se amostras indeformadas segundo Blake e Hartge (1986).

A curva de retenção de água no solo é a representação gráfica entre umidade e potencial matricial. Para este trabalho utilizou-se o processo por secamento (curva de secagem ou desorção) para determinar a umidade gravimétrica das amostras em cada tensão aplicada.

Os aparelhos utilizados neste experimento para determinação da umidade gravimétrica em cada potencial foi o extrator de placa porosa para sucção média e alta.

As amostras deformadas após coletadas foram secas ao ar e passadas em peneiras de 2 mm. Em seguida, saturaram-se cada amostra de terra fina seca ao ar (TFSA) com água destilada por 24 horas e estas foram submetidas à tensão pelo extrator de placa porosa (RICHARDS, 1965).

As tensões sob as quais as amostras saturadas foram submetidas foram: 2, 4, 6, 10, 33, 100, 500, 1000 e 1500 kPa. Após o equilíbrio, pesou-se as amostras úmidas estas foram secas em estufa a 105-110 °C por 24 horas. Posteriormente, foram resfriadas em dessecador e pesadas em balança calibrada. Calculou-se a umidade gravimétrica, expressando os resultados em g g^{-1} . A água disponível foi obtida pela diferença entre a umidade retida a 33 e 1.500 kPa (VERECKEN et al., 1989).

A umidade gravimétrica foi plotada no eixo Y em escala natural, enquanto a tensão foi plotada no eixo X em escala logarítmica. O modelo de Genuchten (1980) foi empregado para ajustar os dados médios observados para todas as condições impostas. Utilizando o programa Excel 2010, as curvas para

cada classe de solo foram plotadas e compararam-se os usos do solo. A partir da curva de retenção de água no solo, foram determinadas a capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível.

A determinação da resistência do solo à penetração foi realizada com o penetrômetro de impacto (modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF), segundo metodologia preconizada por Stolf, Fernandes e Furlani Neto (1983) de modo que as leituras foram tomadas a cada 5 cm, até a profundidade de 65 cm do solo. Os valores médios obtidos em Kgf cm^{-2} foram multiplicados pelo fator 0,098 para expressar os resultados em MPa (unidade de pressão). Para plotagem do gráfico utilizou-se o programa Excel 2010.

De posse dos resultados obtidos em ambiente R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006), determinaram-se as médias para os atributos avaliados e realizou-se a matriz de correlação de Pearson a fim de avaliar a correlação entre capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível e permeabilidade do solo à água e os atributos areia, silte, argila, matéria orgânica, macro e microporosidades e densidade do solo. Da mesma maneira, entre a resistência do solo à penetração avaliada de 0 a 5 cm de profundidade e de 15 a 20 cm e os atributos areia, silte, argila, matéria orgânica, macro e microporosidades e densidade do solo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observam-se, na Tabela 2, os teores médios de areia, silte, argila e matéria orgânica, macro e microporosidade, permeabilidade do solo à água e densidade do solo, para os diferentes usos e classes de solo, na Sub-bacia das Posses, município de Extrema MG.

As classes de solo avaliadas, com exceção do Neossolo Flúvico, apresentaram textura média a argilosa (Tabela 2), dessa maneira, a capacidade de campo do Argissolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háptico, Cambissolo Húmico e Neossolo Litólico ocorre sob tensão de 33 kPa (EMBRAPA, 1995). Para a classe Neossolo Flúvico, a qual apresenta textura arenosa, a capacidade de campo ocorre sob tensão de 10 kPa.

Em relação ao teor de matéria orgânica, nota-se um aumento nos sistemas de plantio de eucalipto em relação à mata nativa, quando comparado com pastagens, a cultura de milho e de batata. Estudos comprovaram que o cultivo do eucalipto em áreas anteriormente ocupadas com pastagens mal manejadas promoveu a recuperação nos estoques de carbono (LIMA et al., 2008). Pulrolnik et al. (2009) também obtiveram respostas positivas em relação ao acúmulo de matéria orgânica no solo sob plantio de eucalipto.

Nota-se que para todas as classes de solo estudadas, a maior densidade do solo ($1,25 \text{ g cm}^{-3}$) foi encontrada em CX quando este apresentou como cobertura do solo, a pastagem (Tabela 2). A densidade do solo é um importante indicativo das condições de manejo do solo, pois esta propriedade reflete o arranjo das partículas do solo, que por sua vez define as características do sistema poroso. Em campo, verificaram-se pastagens em elevado nível de degradação (LIMA, 2010). O aumento da densidade do solo restringe o crescimento radicular à medida que a raiz encontra poros menores e em menor número. O adensamento pode ser verificado pelo aumento da densidade do solo

e da microporosidade, da diminuição da porosidade total e, principalmente, da macroporosidade (SIDIRAS; VIEIRA; ROTH, 1984), sendo estas variações mais freqüentes em solos de textura argilosa (RAGHAVAN; MCKYES; CHASSÊ, 1977). Gomide, Silva e Soares (2011) verificaram que a macroporosidade apresenta-se como atributo sensível às alterações impostas ao solo, contribuindo para os baixos valores da porosidade total.

No presente trabalho, verificou-se maior macroporosidade, de maneira geral, somente para áreas com mata nativa, de 0,26, 0,15 e 0,11 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para Cambissolo Háplico, Cambissolo Húmico e Neossolo Litólico, respectivamente (Tabela 2). Por outro lado, verificou-se baixa macroporosidade em pastagens, sendo que a maior (0,07 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ocorreu em Neossolo Flúvico. Tal valor é considerado preocupante tendo vista que se trata de um valor inferior a 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. De acordo com Souza e Alves (2003), valores inferiores a 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ tornam-se críticos para o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas, contribuindo com o aumento da erosão hídrica, principalmente pela vulnerabilidade do solo ao impacto das gotas das chuvas. Além disso, a pastagem é o uso do solo predominante (Figura 3), ocupando cerca de 70% da sub-bacia das Posses (LIMA, 2010).

Estes resultados corroboram as observações de Sidiras, Vieira e Roth (1984) que caracterizaram o adensamento a partir do aumento da densidade do solo e da microporosidade, da diminuição da porosidade total e, principalmente, da macroporosidade. Raghavan, Mckyes e Chassê (1977) ainda ressaltaram que tais variações são mais freqüentes em solos de textura argilosa, como os solos presentes na sub-bacia das Posses (Tabela 2). Observa-se ainda a influência determinante do uso e manejo do solo, conforme mencionado por Gomide, Silva e Soares (2011) ao comprovarem a sensibilidade da macroporosidade às alterações impostas ao solo, contribuindo para os baixos valores da porosidade total.

A permeabilidade do solo à água representa a facilidade da água percolar por meio dos poros do solo (WANG et al., 2003). Comparando-se a permeabilidade do solo à água nos diferentes sistemas de manejo e mata nativa nota-se que o uso por pastagem apresentou considerável redução nos valores de permeabilidade (3). Conforme ressaltado por Silva et al. (2008), o uso constante do solo como pastagem pode reduzir sua permeabilidade, comprovado pela menor condutividade hidráulica do solo quando submetido a este uso.

Tabela 2 Teores de areia, silte, argila e matéria orgânica do solo (MO), macro e microporosidade, condutividade hidráulica do solo saturado (k) e densidade do solo (DS), para os diferentes usos e solos ocorrentes na Sub-bacia das Posses, município de Extrema (MG)

Classe de solo	Uso do Solo	-----Dag kg ⁻¹ -----			MO	Macro	Micro	K	DS
		Areia	Silte	Argila	g kg ⁻¹	---m ³ m ⁻³ ---	mm h ⁻¹	g cm ⁻³	
PVA	P	30a	30a	40b	1,17b	0,04a	0,41a	2,48b	1,24a
	EUC	30a	29a	41b	4,33a	0,06a	0,42a	4,82a	1,19a
	SPM	27a	25b	48a	1,53b	0,09a	0,42a	0,84c	1,11ab
CX	MN	42d	21e	37d	4,83d	0,26d	0,28e	5,97d	1,06e
	P	35e	32d	33e	2,13e	0,06f	0,37d	0,36f	1,25d
	SPB	29f	30d	41d	1,13d	0,16e	0,42d	3,88e	0,96e
	EUC	44d	24e	32e	3,97de	0,07f	0,40d	6,28d	1,22d
CH	MN	31h	25h	44g	4,67g	0,15g	0,37g	5,42h	1,09h
	P	34h	32g	32h	1,83i	0,04h	0,44g	0,14i	1,23g
	EUC	39g	21h	40g	3,37h	0,18g	0,39g	7,91g	0,98h
RY	P	77	13	10	1,47	0,07	0,46	1,28	1,16
RL	MN	32k	32j	36j	4,47j	0,11j	0,38j	7,00j	1,04k
	P	43j	26k	31j	2,07k	0,06k	0,39j	0,63k	1,23j
	EUC	44j	23k	33j	4,03j	0,04k	0,43j	0,12l	1,22j

PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; CX: Cambissolo Háplico; CH: Cambissolo Húmico; RY: Neossolo Flúvico; RL: Neossolo Litólico; P: pastagem plantada; EUC: povoamento de eucalipto; SPM: solo coberto com palha de milho; MN: mata nativa; SPB: solo preparado para plantio de batata; Onde, MO: matéria orgânica; Macro: macroporosidade; Micro: microporosidade; K: permeabilidade do solo à água; DS: densidade do solo.

*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si na coluna, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A curva característica de água no solo representa o conteúdo de água em $g\ g^{-1}$ retido a determinada tensão na profundidade avaliada, que no presente trabalho foi 0 a 20 cm. Solos com textura argilosa, como os presentes na sub-bacia estudada, tendem a reter mais água devido ao elevado teor de argila, enquanto os solos arenosos tendem a reter menos água. Eltz, Peixoto e Jaster (1989) e Luz e Lima (2008) verificaram o aumento da retenção de água em conformidade com o aumento dos teores de argila no solo. O teor de matéria orgânica do solo tem grande influência na retenção de água do solo de maneira que quanto maior o teor de matéria orgânica, maior a retenção. Dessa maneira, nota-se que a maior retenção de água ocorreu em ambientes de mata nativa. Tendo maiores expressões no Cambissolo Húmico e Neossolo Litólico.

A Figura 4 representa maior retenção de água em solos sob mata nativa considerando todas as tensões aplicadas. Nota-se ainda que, pela pouca inclinação da curva, as classes de solo avaliadas com exceção do Neossolo Flúvico, independente do uso, encontram-se ligeiramente compactadas principalmente quando submetidas a maiores tensões. No caso do Neossolo Litólico, a causa deste comportamento da curva de retenção deve-se principalmente ao fato de este ser um solo incipiente. Portanto, as propriedades físicas do solo que favorecem a retenção de água no solo são limitadas. Outro fator que desfavorece a retenção de água em Neossolo Litólico é a sua localização na paisagem da sub-bacia das Posses que ocorre em terrenos forte ondulados.

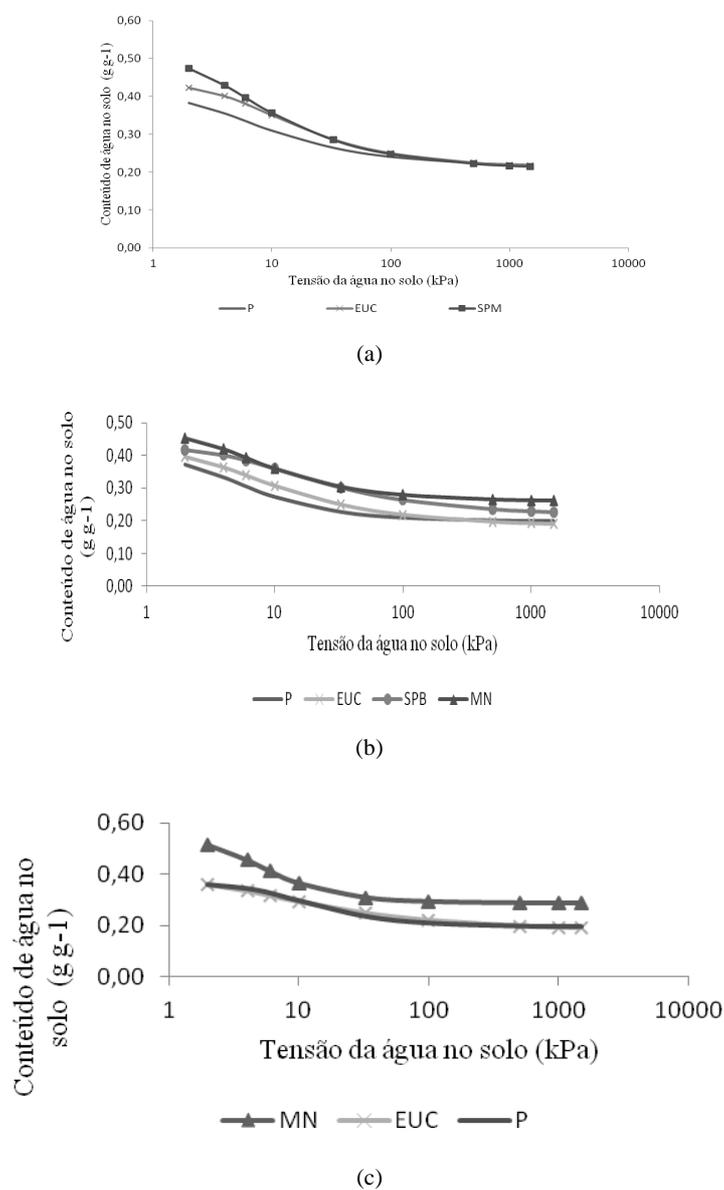
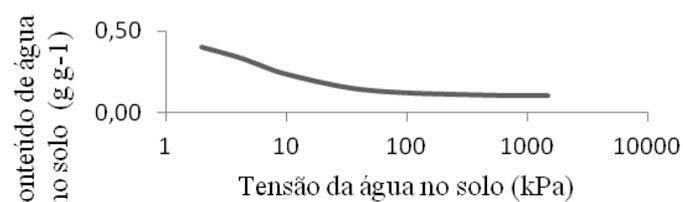


Figura 4 Curva de retenção de água no solo ajustada pelo modelo de Genuchten (1980) para o Argissolo Vermelho-Amarelo (a), Cambissolo Háplico (b), Cambissolo Húmico (c), Neossolo Flúvico (d), Neossolo Litólico (e), na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

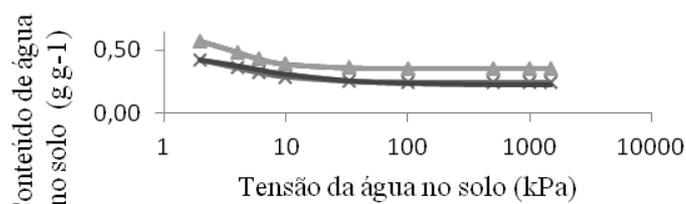
(...continua...)

“Figura 4, conclusão”



— P

(d)



—▲— MN —×— EUC — P

(e)

Nota: (MN: mata nativa; P: pastagem plantada; EUC: povoamento de eucalipto; SPB: solo preparado para plantio de batata e SPM: solo coberto com palha de milho).

A quantidade de água presente na capacidade de campo, ou seja, na tensão de 33 kPa 0,05 a 0,40 g g⁻¹ na camada superficial (0-20 cm) (Figura 5). Na tensão de 1.500 kPa (ponto de murcha permanente), o conteúdo de água variou de 0,10 a 0,35 g g⁻¹ na camada estudada. As variações observadas entre as curvas podem ser relacionadas à influência da matéria orgânica e argila, o que determina alterações na quantidade e distribuição de poros (SILVA et al., 2005). Verificou-se baixo teor de matéria orgânica em pastagem e maior teor de argila em Argissolo Vermelho-Amarelo quando comparado ao Neossolo Flúvico, refletindo, dessa maneira, no comportamento da curva de retenção de água. A

retenção de água em uso por pastagem foi inferior aos demais usos. Da mesma maneira, o Argissolo Vermelho-Amarelo apresentou maior retenção de água em todas as tensões avaliadas quando comparado ao Neossolo Flúvico

No presente estudo, a textura foi o principal fator de variação do conteúdo de água disponível. O teor de água disponível para Argissolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo Háptico, Cambissolo Húmico e Neossolo Litólico (textura média a argilosa) (Tabela 2) variou de 0,01 a 0,08 g g⁻¹ (Figura 5).

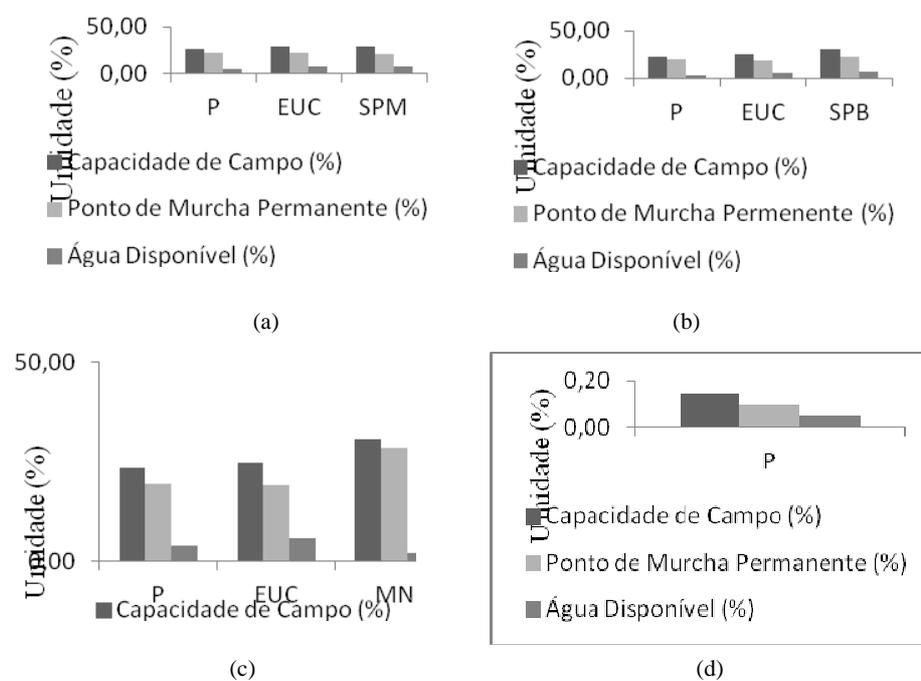
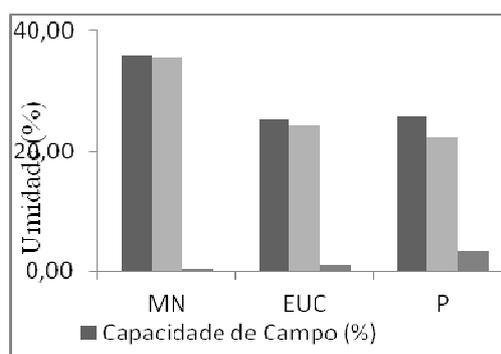


Figura 5 Capacidade de Campo, Ponto de Murcha Permanente e Água Disponível para o Argissolo Vermelho-Amarelo (a), Cambissolo Háptico (b), Cambissolo Húmico (c), Neossolo Flúvico (d), Neossolo Litólico (e), na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

(...continua...)

“Figura 5, conclusão”



(e)

Nota: (MN: mata nativa; P: pastagem plantada; EUC: povoamento de eucalipto; SPB: solo preparado para plantio de batata e SPM: solo coberto com palha de milho).

Houve variação nos resultados de resistência do solo à penetração nos diferentes ambientes estudados (Figuras 6). Em relação ao uso do solo por pastagens, a pressão do pisoteio dos animais sobre o solo compromete a qualidade física na camada superficial, em razão do aumento da densidade do solo e da redução da porosidade (GIAROLA; TORMENA; DUTRA, 2007; IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000; TWERDOFF et al., 1999).

Observou-se que a resistência do solo à penetração tende a aumentar com a profundidade em pastagens enquanto que em solo com plantio de eucalipto, a resistência do solo à penetração é menor após os 50 cm de profundidade. A resistência do solo à penetração, bem como a densidade do solo sob mata nativa foram os menores observados em relação aos demais usos (Tabela 2 e Figura 6).

Os ambientes de mata nativa possuem menor densidade do solo e favorecem a menor resistência do solo à penetração e maior permeabilidade do solo à água, pois possuem matéria orgânica protegendo o solo e mantendo a estrutura do mesmo, além disso, não ocorre pisoteio do gado nem revolvimento

do solo, é a condição ideal de expressão dos atributos físicos dos solos estudados. A umidade do solo também interfere a resistência do solo à penetração (Tabela 3), de maneira que solos com maior teor de umidade tendem a ter menor resistência à penetração.

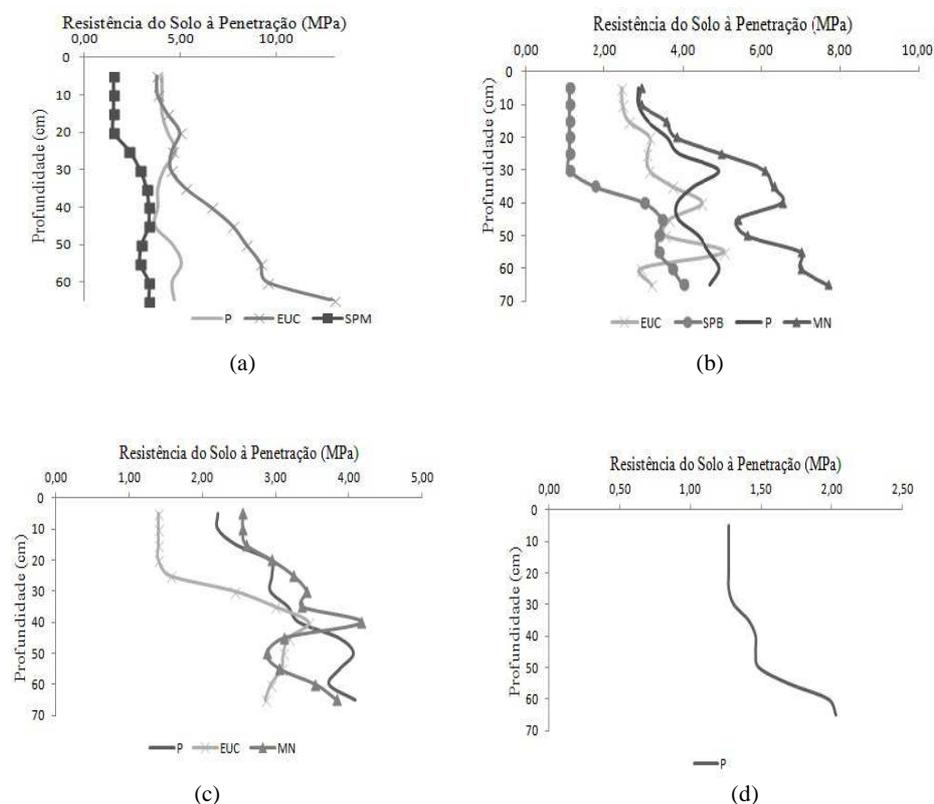
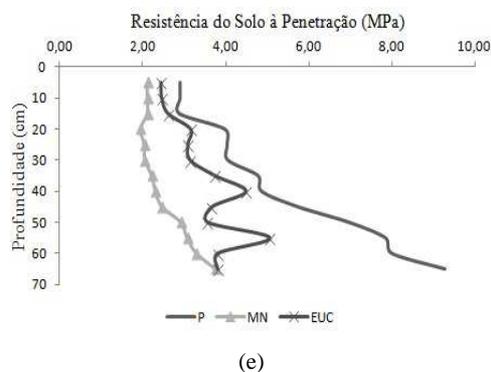


Figura 6 Resistência do solo à penetração (RP), em perfil de Argissolo Vermelho-Amarelo (a), Cambissolo Háptico (b), Cambissolo Húmico (c), Neossolo Flúvico (d), Neossolo Litólico (e), na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

(...continua...)



Nota: (MN: mata nativa; P: pastagem plantada; EUC: povoamento de eucalipto; SPB: solo preparado para plantio de batata e SPM: solo coberto com palha de milho).

Tabela 3 Resistência do solo á penetração avaliada a uma profundidade de 20 cm e umidade do solo para os diferentes usos e solos ocorrentes na Sub-bacia das Posses, município de Extrema (MG)

Solo	Uso	Umidade	Resistência do solo a 20 cm
		do solo (0 – 20 cm) g Kg ⁻¹	MPa
PVA	P	0,24	4,33
	EUC	0,28	4,96
	SPM	0,25	1,5
	MN	0,22	3,81
CX	P	0,28	3,59
	SPB	0,35	1,11
	EUC	0,23	3,15
CH	MN	0,20	2,95
	P	0,24	2,92
RY	EUC	0,28	1,4
	P	0,26	1,27

“Tabela 3, conclusão”

Solo	Uso	Umidade	Resistência do solo a 20 cm
		do solo (0 – 20 cm) g Kg ⁻¹	MPa
	MN	0,16	1,95
RL	P	0,24	3,99
	EUC	0,27	3,15

PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; CX: Cambissolo Háplico; CH: Cambissolo Húmico; RY: Neossolo Flúvico; RL: Neossolo Litólico; P: pastagem plantada; EUC: povoamento de eucalipto; SPM: solo coberto com palha de milho; MN: mata nativa; SPB: solo preparado para plantio de batata; Onde, MO: matéria orgânica; Macro: macroporosidade; Micro: microporosidade; K: permeabilidade do solo à água; DS: densidade do solo.

O estudo de inter-relação entre capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível e permeabilidade do solo à água, bem como a resistência do solo à penetração nas profundidades (0 – 5) e (15 – 20) cm com os demais atributos físicos (macro e microporosidade, densidade do solo e textura), e a matéria orgânica possibilitaram melhor compreensão das relações existentes entre estes atributos e a recarga de água no solo.

A matriz de correlação de Pearson, com 95% de confiança entre a RP (0 a 5 cm) e seus fatores, mostrou maior correlação com a densidade do solo seguida pela textura (areia, silte e argila), sendo importante salientar uma relação inversa da resistência do solo à penetração e areia (Tabela 4). Nota-se também a não ocorrência de alta correlação em relação à RP e seus fatores.

Não foi apontada correlação entre matéria orgânica e resistência do solo à penetração na profundidade avaliada (0 – 20 cm).

Para a maioria dos fatores correlacionados com a resistência do solo à penetração, a correlação diminuiu com o aumento da profundidade. A mesma relação foi verificada por Tormena et al. (2002).

A infiltração de água no solo é facilitada pela macroporosidade e densidade do solo. Na camada de 0 – 5 cm de todas as classes de solo avaliadas

foi possível verificar uma correlação de maneira que, quanto menor a resistência do solo à penetração, menor a densidade do solo e maior sua macroporosidade. Entende-se dessa maneira que, dentre as condições a ser avaliada em campo, a resistência do solo à penetração na camada superficial permite inferir sobre a densidade do solo e macroporosidade do mesmo, dizendo o quanto o uso do solo está influenciando suas propriedades físicas, sendo de fundamental importância a manutenção da superfície do solo.

Tabela 4 Coeficiente de Correlação de Pearson entre a resistência do solo à penetração (RP) e atributos indicadores de qualidade do solo em relação à erosão hídrica

Variável	Areia	Silte	Argila	MO	Macro	Micro	DS
	-----Dag kg ⁻¹ -----				m ³ m ⁻³		(g cm ⁻³)
RP (0 - 5 cm)	-0,411	0,328	0,306	-0,084	-0,272	-0,155	0,470
RP (15 - 20 cm)	-0,299	0,256	0,150	-0,070	-0,160	-0,045	0,139

RP: resistência do solo à penetração; MO: matéria orgânica; Macro: macroporosidade; Micro: microporosidade; DS: densidade do solo.

A matriz de correlação de Pearson, com 95% de confiança entre capacidade de campo e seus fatores, mostrou maior correlação com textura (areia, silte e argila), seguido por microporosidade, matéria orgânica e densidade do solo sendo importante salientar uma relação inversa da capacidade de campo e areia, assim como capacidade de campo e microporosidade (5). Nota-se também a baixa correlação entre macroporosidade e capacidade de campo. A capacidade de campo é avaliada sob tensão de 33 kPa, sendo nessa posição, a macroporosidade inexpressiva.

A maior correlação foi verificada entre ponto de murcha permanente e teor de areia, sendo esta inversa.

Foi verificada baixa correlação entre água disponível e seus fatores, sendo que a máxima ocorreu com a matéria orgânica (0,146).

A permeabilidade do solo à água também apresentou correlações muito baixas. Ainda assim, nota-se que a maior correlação, considerando a macroporosidade, ocorreu quando comparado com a permeabilidade.

Tabela 5 Coeficiente de Correlação de Pearson entre a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD) e permeabilidade do solo à água (K) e atributos indicadores de qualidade do solo em relação à erosão hídrica

Variável	Areia	Silte	Argila	MO	Macro	Micro	DS
	Dag kg ⁻¹				m ³ m ⁻³		(g cm ⁻³)
CC	-0,444	0,295	0,370	0,180	-0,036	-0,257	0,102
PMP	-0,651	0,499	0,497	0,050	-0,001	-0,187	-0,057
AD	0,012	-0,056	0,021	0,146	-0,035	-0,127	0,143
K	-0,080	0,083	0,047	0,028	0,188	-0,016	-0,307

CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; AD: água disponível; K: permeabilidade do solo à água; MO: matéria orgânica; Macro: macroporosidade; Micro: microporosidade; DS: densidade do solo.

A recarga de água no solo depende de vários fatores, dentre eles, a superfície do solo e seus atributos são fatores iniciais neste processo. O conhecimento das condições físicas do solo favoráveis à infiltração como adequada porosidade e densidade do solo, associado às características intrínsecas de cada classe de solo como textura e curva de retenção de água, bem como a cobertura vegetal, tornam-se fundamentais para que o processo de recarga seja iniciado evitando perdas por erosão hídrica. É importante se conhecer as características do solo, o uso a que está sendo submetido para sua recarga, sendo esse conhecimento essencial para a recuperação e conservação de nascentes e lençol subterrâneo (GOMES et al., 2012).

4 CONCLUSÕES

Nas tensões analisadas, para as cinco classes de solo, as curvas de retenção de água estão relacionadas aos teores de argila do solo.

O teor de Água disponível nos solos estudados foi maior em solo sob mata nativa em relação aos demais usos.

Os sistemas sob pastagem, nas classes de solo avaliadas, apresentaram maiores valores de densidade do solo (1,23 a 1,25 g cm⁻³) e resistência do solo à penetração de até 3,99 MPa na camada de 0 a 20 cm ocasionada pelo manejo incorreto destas pastagens.

Não foi apontada correlação entre matéria orgânica e resistência do solo à penetração na profundidade avaliada. A maior correlação foi verificada entre ponto de murcha permanente e teor de areia, sendo esta inversa.

Para a permeabilidade do solo à água, a maior correlação ocorreu em relação à densidade do solo (-0,307), sendo esta inversa.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Programa produtor de água superintendência de usos múltiplos**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2008. 60 p.
- BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001.
- _____. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de capim-Elefante-Anão C.V. Mott. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 1047-1054, maio 2000.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v. 1, p. 363-375.
- COSER, S. M. et al. Análise textural do solo utilizando métodos de dispersão física com agitação lenta e rápida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Anais...** Gramado: SBCS, 2007. 1 CD-ROM.
- DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis I: physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986. p. 443-461.
- ELTZ, F. L. F.; PEIXOTO, R. T. G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno não álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 13, n. 2, p. 259-267, 1989.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Brasília, 1995. 101 p.
- GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, n. 1, p. 892-898, 1980.

GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; DUTRA, A. C. Degradação física de um Latossolo Vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 863-873, set./out. 2007.

GOMES, M. A. et al. Solos, manejo e aspectos hidrológicos na bacia hidrográfica do Araújos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 1, p. 93-102, jan. 2012.

GOMIDE, P. H. O.; SILVA, M. L. N.; SOARES, C. R. F. S. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 567-577, jan./fev. 2011.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, jul. 2000.

LIMA, A. M. N. et al. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 1053-1063, jan./fev. 2008.

LIMA, G. C. **Avaliação de atributos indicadores da qualidade do solo em relação à recarga de água na sub-bacia das Posses**, Extrema, MG. 2010. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

LIMA, J. M. et al. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade da Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 85-90, 1990.

LUZ, L. R. Q. P.; LIMA, S. L. Atributos físicos e hídricos de solos em topossequência de tabuleiros costeiros. **Revista de Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 23, n. 1, p. 44-59, 2008.

MORAES, J. M. et al. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.

PULROLNIK, K. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 1125-1136, jan./fev. 2009.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2006. Software.

RAGHAVAN, G. S. V.; MCKYES, E.; CHASSÉ, M. Effect of wheel slip on soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 22, n. 1, p. 79-83, 1977.

RAIJ, B. V. et al. **Análise química de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. et al. (Ed.). **Methods of soil analysis**: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison: ASASSSA, 1965. p. 128-152.

SIDIRAS, N.; VIEIRA, S. R.; ROTH, C. H. Determinação de algumas características físicas de um latossolo roxo distrófico sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 8, n. 1, p. 265-268, 1984.

SILVA, A. M. et al. Simulação da variabilidade espacial da erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica de latossolos no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 2125-2134, jan./fev. 2008.

SILVA, M. A. et al. Sistema de informações geográficas no planejamento de uso do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, 2013. No prelo.

SILVA, M. A. S. et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um argissolo vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 544-552, maio/jun. 2005.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de Cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 18-23, 2003.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial da textura de um latossolo vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Sorocaba, v. 24, n. 2, p. 309-319, 2004.

SPERA, S. T. et al. Efeito de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos do solo e sua produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 533-542, maio/jun. 2004.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. L. Penetrômetro de impacto IAA/Planalsucar-STOLF: recomendações para seu uso. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 3, p. 18-23, 1983.

TAVARES FILHO, J. et al. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 393-399, 1999.

TORMENA, C. A. et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.

TWERDOFF, D. A. et al. Impacts of forage grazing and cultivation on near-surface relative compaction. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 79, n. 1, p. 465-471, Mar. 1999.

VERECKEN, H. et al. Estimating the soil moisture retention from characteristic texture, bulk density and carbon content. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 148, n. 1, p. 389-403, 1989.

WANG, G. X. et al. Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Falls Church, v. 69, n. 1, p. 889-898, 2003.

CAPÍTULO 3 Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de solo sob uso de pastagens e com remanescentes de Mata Atlântica, na sub-bacia hidrográfica das posses, Extrema, MG

RESUMO

O bioma mata atlântica está constantemente sob ameaça de desastres como enchentes e a erosão hídrica, isso ocorre devido ao uso e manejo incorreto dos recursos naturais água, solo e florestas dos quais o homem retira elementos essenciais para sua sobrevivência. Nos biomas, o solo é um dos recursos naturais de maior importância e sua heterogeneidade reflete na variabilidade de seus atributos químicos e físicos. Sua heterogeneidade é decorrente do processo de formação natural e do uso e manejo realizado pelo homem. Assim, os objetivos com este estudo foram avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo e elaborar mapas de distribuição espacial, utilizando técnicas estatísticas descritivas e procedimentos geoestatísticos na análise dos dados, na sub-bacia hidrográfica das Posses, no município de Extrema, representativa do Bioma Mata Atlântica presente no sul de Minas Gerais. Para isso, foram coletadas amostras em 150 pontos nas profundidades 0-0,20 m, onde se determinou os teores dos elementos Ca, Mg, K, P, pH e carbono orgânico, este último expresso na forma de matéria orgânica (MO), e realizou testes físicos de estabilidade de agregados avaliada pelo diâmetro médio geométrico com (DMG_{cp}) e sem (DMG_{sp}) pré-umedecimento e diâmetro médio ponderado com (DMP_{cp}) e sem (DMP_{sp}) pré-umedecimento e índice de floculação (IF). As variáveis: Ca, Mg, K, P, pH, MO, DMG, DMP e IF apresentaram estrutura de dependência espacial, o que permitiu o seu mapeamento a partir de técnicas geoestatísticas. O P, DMG_{sp} e DMP_{sp} apresentaram estrutura com efeito pepita puro, possivelmente decorrente a uma distância insuficiente para captar dependência espacial na amostragem para estes atributos, e interferências antrópicas. A variação verificada para o Ca pode ser explicada pela aplicação localizada de calcário, a qual foi realizada em algumas pequenas propriedades localizadas nas sub-bacias. O DMG_p , DMP_p , e IF avaliados foram ajustados em conformidade entre si, indicando boa agregação do solo. O índice de estabilidade de agregados (IEA) se correlacionou positivamente com os teores de matéria orgânica.

Palavras-Chave: Geoestatística. Mata atlântica. Agregação do solo. Pastagem.

ABSTRACT

The Atlantic forest biome is constantly under threat from disasters such as floods and erosion. This occurs due to incorrect use and management of water, soil and forests, in which man removes essential elements for their survival. In the biomes, soil is one of the most important natural resource and its heterogeneity reflects in the variability of its chemical and physical attributes. Soil heterogeneity occurs due to the natural formation process and the use and management from men. Thus, the objectives of this study were to evaluate the spatial variability of physical and chemical soil attributes and elaborate spatial distribution maps using descriptive statistical techniques and geostatistical data analysis procedures, in Posses sub-basin, Extrema, representative of the Atlantic Forest biome present in southern Minas Gerais, Brazil. In order to do this, samples were collected at 150 points at 0-0.20 m of depth, in which we determined the content of the elements Ca, Mg, K, P, pH and organic carbon, the last in the form of organic matter (OM). We also performed physical tests to evaluate aggregate stability measured by geometric average diameter with (GAD_{wp}) and without (GAD_{op}) pre-wetting, pondered average diameter with (GAD_{wp}) and without (GAD_{op}) pre-wetting and flocculation index (FI). Variables Ca, Mg, K, P, pH, OM, GAD_{wp} , GAD_{wp} and FI presented spatial dependence structure, which allowed its mapping using geostatistical techniques. P, GAD_{op} and GAD_{op} presented structure with nugget effect, possibly due to an insufficient distance to capture spatial dependence for these attributes in the sample, and also human interferences. The variation verified for Ca may be explained by calcareous localized application, which occurred in a few small properties located in the sub-basin. The evaluated GAD_{wp} , GAD_{wp} , and FI were adjusted according to each other, indicating good soil aggregation. The aggregate stability index (ASI) was positively correlated with soil organic matter.

Key words: Geostatistics. Atlantic rainforest. Soil aggregation. Pasture.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país rico em recursos naturais, distribuídos em seus diversos biomas. A Mata Atlântica é atualmente considerada seu bioma mais importante devido a seu estado crítico – nela se concentra cerca de 70% da população brasileira e o percentual de remanescentes bem conservados é de apenas 7,26% (BRASIL, 2007).

Apesar da devastação acentuada, a Mata Atlântica ainda é responsável por garantir o abastecimento de água de mais de 120 milhões de brasileiros. Seus rios e córregos constituem importantes bacias e sub-bacias hidrográficas responsáveis por regular o fluxo de importantes mananciais hídricos do Brasil (BRASIL, 2007).

A Mata Atlântica, bem como os demais biomas, em suas condições naturais de equilíbrio, de forma gratuita e contínua, proporciona uma série de benefícios ao homem. Estes incluem a regulação climática, que ameniza desastres como as tempestades, as enchentes, as secas e o ciclo das águas; a prevenção da erosão hídrica, mantendo o solo em boas condições de estrutura e estabilidade; ciclagem de nutrientes e a manutenção das condições dos recursos ambientais naturais, em especial a biodiversidade e a variabilidade genética, das quais o homem retira elementos essenciais para a melhoria da produção animal e vegetal.

As consequências causadas pela perda desses recursos oferecidos pela natureza têm sido muitas vezes catastróficas. Estudos relacionados ao desastre ocorrido na região serrana do Rio de Janeiro em janeiro de 2011 mostraram que as maiores perdas e destruições ocorreram em áreas consideradas por lei como de preservação permanente, as quais estavam ocupadas inadequadamente por uso antrópico (BRASIL, 2011).

A alteração ou redução das áreas naturais afeta toda a sustentabilidade dos processos ecológicos comprometendo a sobrevivência do homem. Dessa maneira, nota-se a importância de se ter áreas preservadas e conservadas, mantendo as relações entre espécies e o meio e, assim, promovendo o equilíbrio ecológico e os meios de produção relacionados aos recursos naturais de forma sustentada.

Na sub-bacia das Posses, localizada no município de Extrema, sul do estado de Minas Gerais, a ocupação antrópica em área de preservação permanente vem comprometendo os remanescentes de Mata Atlântica na região, danificando o solo, a água e as florestas.

Atualmente, a ocupação antrópica na sub-bacia é bem visível. Aproximadamente 70% da área são ocupadas por gramíneas do tipo braquiária, sendo alguns pontos caracterizados como pastagem degradada (LIMA, 2010). A sub-bacia das Posses encontra-se inserida no Bioma da Mata Atlântica, fazendo parte do Sistema Cantareira, o maior sistema produtor de água do mundo. A disponibilidade de água na região pode ser afetada pela condição degradada dos atributos solo, cobertura vegetal e topografia da região (WHATELY; CUNHA, 2007). Sendo a topografia inerente ao ambiente, cabe à população, preservar quando possível e recuperar os recursos naturais. Nesse seguimento, entende-se a necessidade de estudos relacionados à caracterização dos recursos naturais para preservá-los e recuperá-los quando necessário.

Uma técnica que auxilia a avaliação e compreensão dos recursos naturais é a geoestatística que permite descrever a continuidade espacial, característica essencial de muitos fenômenos naturais. A geoestatística oferece um conjunto de ferramentas estatísticas que incorporam no processamento dos dados as coordenadas espaciais das observações (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

A espacialização de atributos do solo possibilita conhecer melhor a variação e o comportamento destes no ambiente. Segundo Berge e Klamt (1997) e Couto, Klamt e Stein (2000), estes estudos podem ser feitos em grandes áreas, abrangendo diversos tipos de solo, desde que haja uma malha amostral adequada. Estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo são importantes não apenas em amostragens ou interpretação dos dados, mas também auxiliam o levantamento e classificação de solos (NOVAES FILHO et al., 2007).

O interesse da análise geoestatística não se limita à obtenção de um modelo de semivariograma e seus parâmetros, desejando-se também prever valores em pontos não amostrados. Nesse segmento, Souza et al. (2010) avaliaram o comportamento de atributos químicos do solo interpolando pontos amostrados e não amostrados em Alegre, ES.

Estudos desenvolvidos a partir da espacialização de atributos químicos e físicos do solo mostrou que a geoestatística foi uma ferramenta viável para identificar áreas de inconsistência em termos de correção da acidez do solo e definir melhores dosagens e tipos de calcário para diferentes zonas de acidez (HURTADO et al., 2009).

A avaliação da variabilidade espacial dos atributos do solo vem sendo utilizada, por meio de ferramentas da geoestatística, como uma fonte eficiente para o conhecimento da relação das propriedades do solo no espaço (GREGO; VIEIRA, 2005). Sendo adequada no estudo de um manejo que vise aperfeiçoar as práticas culturais na produção e a conservação do solo (CAMBARDELLA et al., 1994).

Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo e elaborar mapas de distribuição espacial, utilizando técnicas estatísticas descritivas e procedimentos geoestatísticos na análise dos dados, para subsidiar a identificação das áreas com maior

suscetibilidade a erosão hídrica, na sub-bacia hidrográfica das Posses, no município de Extrema, MG, representativa do Bioma Mata Atlântica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo possui 1.196,70 ha e compreende a Sub-bacia Hidrográfica das Posses, localizada no município de Extrema, no Sul do Estado de Minas Gerais (Figura 1). Esta sub-bacia está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari, um dos rios que abastece o Reservatório do Sistema Cantareira no Estado de São Paulo. Encontra-se dentro do bioma da Mata Atlântica (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA, 2008).

Situa-se entre as coordenadas UTM 374.500 e 371.500 de longitude E e entre 7.468.200 e 7.474.800 de latitude S (Datum SAD 69, Zona 23S) e entre as altitudes de 1.144 e 1.739 m (bacia de cabeceira). O clima na sub-bacia é do tipo Cwb, de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado como mesotérmico de verões brandos e suaves, e estiagem de inverno. A temperatura média anual é de 18 °C, tendo nos meses mais quente e mais frio temperaturas médias de 25,6 °C e 13,1 °C, respectivamente, com ocorrência de geadas anuais, e precipitação média anual de 1.477 mm (ANA, 2008).

As classes de solo predominantes na sub-bacia são: Neossolo Litólico (RL), Neossolo Flúvico (RY), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Cambissolo Háplico (CX) e Cambissolo Húmico (CH) (Figura 2a). Sendo que o Cambissolo Háplico ocupa 351,95 ha (29% da área), o Cambissolo Húmico ocupa 108,85 ha (10%), o Argissolo Vermelho-Amarelo ocupa 478,61 ha (40%), o Neossolo Flúvico 108,85 ha (10%) e o Neossolo Litólico 135,98 ha (11%). As fases de relevo predominantes são; ondulado e forte ondulado (Figura 2b). Atualmente o principal uso do solo é pastagem (LIMA, 2010), sendo que grande parte encontra-se mal manejada. Há também povoamentos de eucalipto, culturas anuais (culturas de ciclo curto como batata e milho) e mata nativa, sendo grande área ocupada por mata de araucária (SILVA et al., 2013) (Figura 3a).

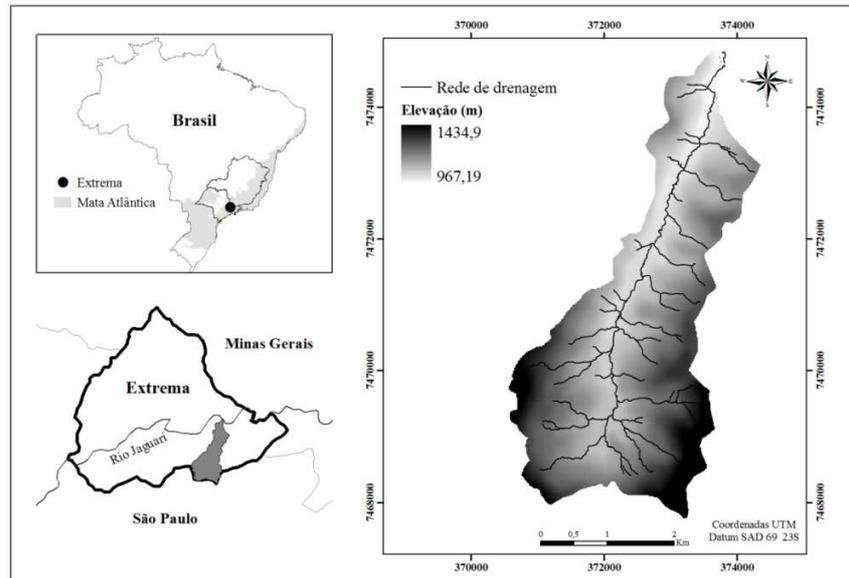


Figura 1 Mapa de localização da Sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

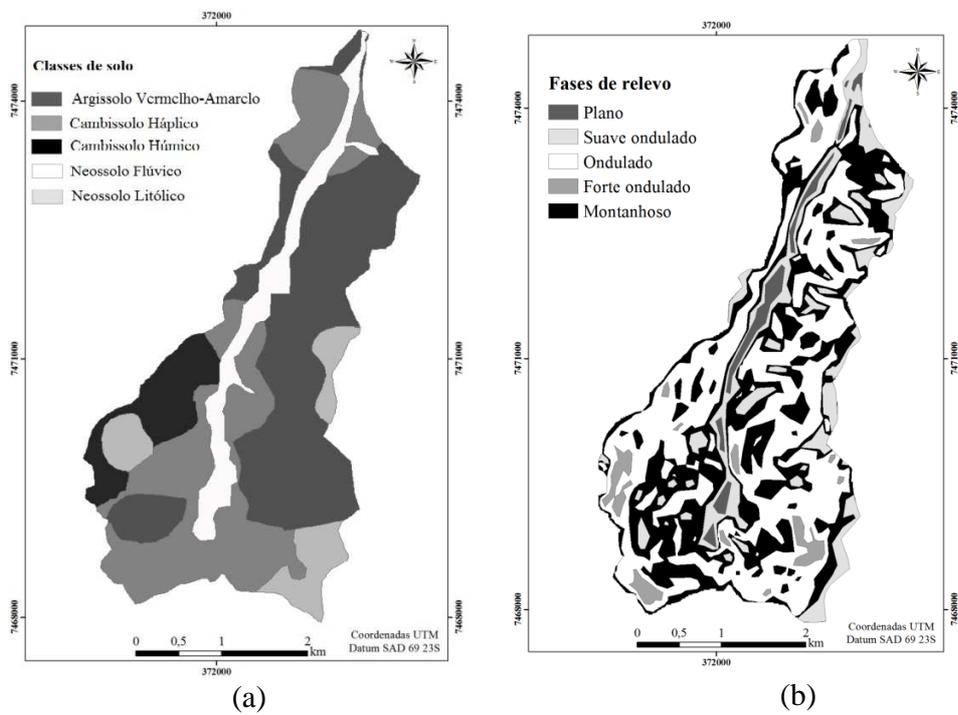


Figura 2 Mapa das classes de solos (a) e relevo (b) da sub-bacia das Poses, Extrema (MG)

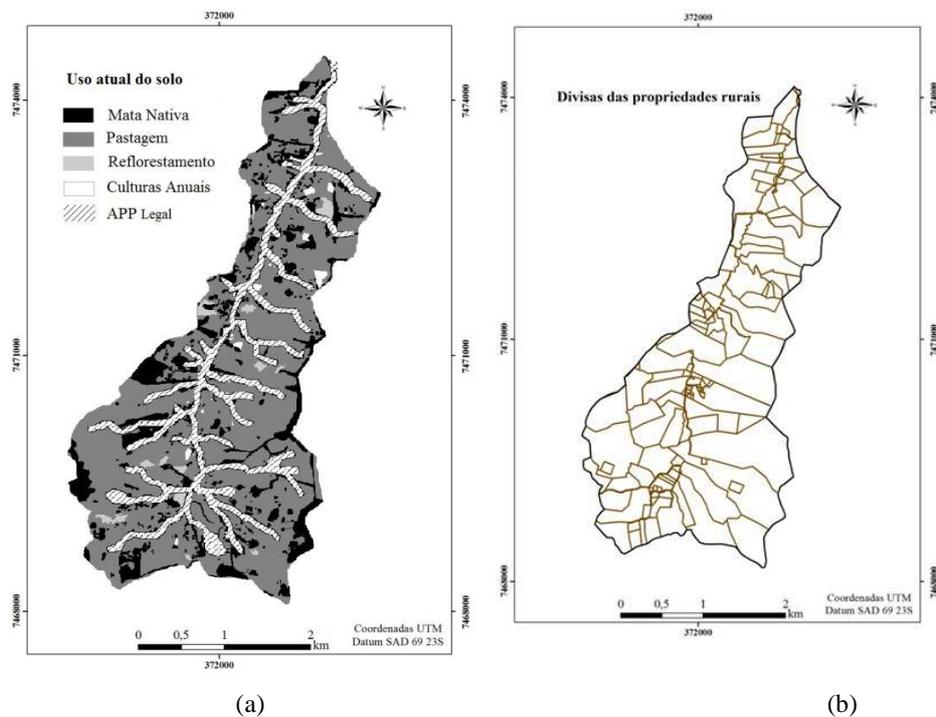


Figura 3 Mapa de uso atual do solo (a) e da divisa das propriedades rurais (b) na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

Anteriormente à coleta das amostras, foi gerada uma malha regular de amostragem do solo contendo 150 pontos, espaçados em até 350 m e distribuídos em uma área de aproximadamente 1.200 ha (Figura 4). É importante salientar que a malha dita “regular”, não foi gerada com pontos equidistantes entre si, como deveria, devido a problemas de locação. Alguns pontos eram inacessíveis por se situarem em elevadas altitudes e matas densas, por exemplo. Além disso, objetivou-se coletar amostras de maneira representativa para as cinco classes de solos predominantes na sub-bacia e principais usos. Dessa maneira, foi coletada uma amostra por ponto, ou seja, 150 amostras na área de estudo.

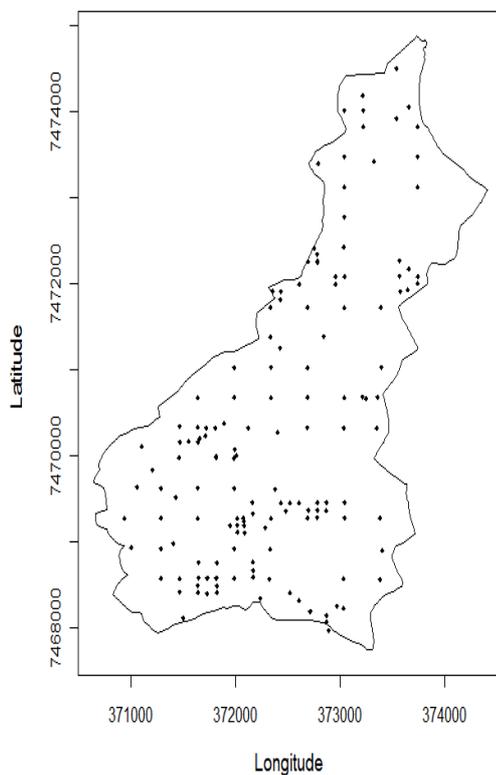


Figura 4 Mapa dos pontos amostrados na sub-bacia das Posses, Extrema MG

Para o processo de marcação dos pontos foi utilizado o sistema de posicionamento global (GPS). A marcação das coordenadas em cada ponto foi realizada pelo aparelho de GPS GARMIN eTrex Vista. O solo foi coletado em cada ponto de amostragem na profundidade de 0 - 0,20 m.

Foram analisados os seguintes atributos químicos do solo: cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis, fósforo (P) e potássio (K) disponível, pH e carbono orgânico, este, na forma de matéria orgânica (MO). No caso dos atributos físicos, foram considerados: textura, estabilidade de agregados para determinação do diâmetro médio geométrico com (DMG_{cp}) e sem (DMG_{sp}) pré-

umedecimento e diâmetro médio ponderado com (DMP_{cp}) e sem (DMP_{sp}) pré-umedecimento; e argila dispersa em água para determinação do índice de floculação (IF).

As análises dos atributos químicos foram realizadas de acordo com o manual proposto pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997). Os teores de Ca e Mg trocáveis foram extraídos com KCL 1 mol L^{-1} e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica de chama ar-acetileno. O P disponível foi extraído pela solução Mehlich 1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$). Após a extração de P, ácido ascórbico e molibdato de amônio foram usados para o desenvolvimento da cor, cuja intensidade foi medida por colorímetro. O K trocável foi extraído com HCL $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ e determinado por fotometria de chama. O pH foi determinado em água e a MO foi determinada pela oxidação úmida em $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 0,8 \text{ mol L}^{-1}$. Após oxidação completa, mediu-se a absorbância em colorímetro, a 650 nm (RAIJ et al., 1987).

As análises dos atributos físicos foram realizadas de acordo com o manual proposto pela EMBRAPA (1997). A análise textural foi realizada pelo método de Bouyoucos. A estabilidade de agregados foi determinada por meio de peneiramento em água com agregados pré-umedecidos lentamente por capilaridade e agregados os quais não foram submetidos a um pré-umedecimento (KEMPER; ROSENAU, 1986). A fração de agregados que passou na peneira de 7,93mm e ficou retida na peneira de 4,76 mm foi separada em classes utilizando-se jogo de peneiras de malhas: 2 mm; 1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,105 mm. Os resultados foram expressos em termos de diâmetro médio geométrico com pré-umedecimento (DMG_{cp}) e sem pré-umedecimento (DMG_{sp}), diâmetro médio ponderado com pré-umedecimento (DMP_{cp}) e sem pré-umedecimento (DMP_{sp}).

Os cálculos dos índices de agregação do solo DMP, DMG e índice de estabilidade de agregados (IEA) foram realizados para as cinco classes de solo e usos correspondentes da seguinte maneira:

a) Diâmetro Médio Geométrico (DMG):

$$DMG = 10^X \quad (1)$$

$$X = \left[\frac{\sum (n \log d)}{\sum n} \right] \quad (2)$$

Onde, n: porcentagem dos agregados retidos em uma determinada peneira; d: diâmetro médio de uma determinada faixa de tamanho do agregado em milímetros.

b) Diâmetro Médio Ponderado (DMP):

$$DMP = \sum_{i=1}^n n_i d_i \quad (3)$$

Onde, n_i: porcentagem dos agregados retidos em uma determinada peneira (forma decimal); d_i: diâmetro médio de uma determinada faixa de tamanho do agregado em milímetros.

c) Índice de Estabilidade de Agregados (IEA):

$$IEA = \left(\frac{\text{Peso da amostra seca} - wp25 - \text{areia}}{\text{Peso da amostra seca} - \text{areia}} \right) * 100 \quad (4)$$

Onde, wp25: peso dos agregados da classe < 0,25.

A argila dispersa em água foi determinada pelo método de Boyoucos. Os valores de argila dispersa em água foram utilizados para cálculo do índice de floculação, o qual expressa o grau de dispersão das partículas do solo, sendo importante na agregação do solo (EMBRAPA, 1997).

O cálculo dos índices de floculação do solo foi realizado da seguinte maneira:

$$IF = \frac{(a-b)}{a} * 100 \quad (5)$$

Onde, IF: índice de floculação em porcentagem; a: argila dispersa em NaOH; b: argila dispersa em água.

Os dados foram analisados em ambiente GeoR (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006), que forneceu os principais momentos estatísticos: média, desvio-padrão, coeficiente de variação e assimetria. A razão de dependência espacial entre amostras foi determinada conforme Cambardella et al. (1994):

$$RD = \frac{(C_0)}{(C_0 + C_1)} * 100 \quad (6)$$

Onde, RD: razão de dependência espacial; C_0 : efeito pepita; $(C_0 + C_1)$: patamar.

O estudo da variabilidade espacial foi realizado com base na análise de semivariogramas em relação às pressuposições da hipótese intrínseca, que diz que a relação de dependência espacial é a mesma em qualquer posição de “h” dentro de um determinado alcance da continuidade espacial.

O semivariograma foi estimado pela equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{\sum_{i=1}^{n(h)} [z(xi) - z(xi+h)]^2}{2n(h)} \quad (7)$$

Onde: $n(h)$: número de pares experimentais de dados separados por uma distância h ; $z(xi)$: valor determinado em cada ponto amostrado; $z(xi+h)$: valor medido num ponto mais distância h .

Para cada atributo do solo foram realizados os cálculos das semivariâncias $\gamma(h)$, em todas as direções atendendo à hipótese de isotropia. Após o ajuste de um modelo matemático realizado visualmente (“a sentimento”) foram definidos os seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0), valor de γ quando h é zero; alcance (a), valor de h quando a semivariância (γ) se estabiliza próximo a um valor constante sendo considerado o limite da dependência espacial da grandeza medida; (C_1), variância estrutural; e patamar ($C_0 + C_1$), valor da semivariância (γ) quando se obtém um valor constante próximo à variância dos dados (é o máximo da semivariância). O patamar é atingido quando a variância dos dados se torna constante com as distâncias entre as amostras e esse parâmetro permite a determinação da distância limite entre a dependência e a independência entre as amostras. Após a seleção do semivariograma da variável em estudo e havendo dependência espacial, podem-se interpolar valores em qualquer posição na área estudada, sem tendência e com variância mínima.

De posse dos dados necessários para originar a krigagem, foram construídos os mapas utilizando-se também o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006). Utilizando o mesmo software, foi realizada a matriz de correlação de Pearson entre os atributos matéria orgânica e índice de agregação do solo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes à textura do solo em relação às classes de solo presentes na sub-bacia das Posses são apresentados na Tabela 1. Nota-se que apenas para o Neossolo Flúvico (RY) a classe textural foi caracterizada como arenosa. Nas demais classes de solo a textura variou de média a argilosa.

A textura influencia o comportamento dos demais atributos do solo, tanto químicos, quanto físicos. O aumento da área superficial específica, proporcional à diminuição do tamanho da fração, confere maior capacidade de atração e sorção de íons ou partículas. O menor tamanho das partículas do solo associado a uma maior porosidade e teor de matéria orgânica condiz com uma melhor agregação do solo e consequente infiltração de água. Neste sentido, a textura arenosa implica em uma menor retenção de água, matéria orgânica e nutriente no solo.

Tabela 1 Teores de areia, silte, argila para solos ocorrentes na Sub-bacia das Posses, município de Extrema - MG

Classe de solo	Areia	Silte	Argila
PVA	36,11	25,23	38,66
CX	41,42	23,32	35,26
CH	34,44	26,10	39,46
RY	64,41	16,47	19,12
RL	41,05	25,52	33,43

PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; CX: Cambissolo Háplico; CH: Cambissolo Húmico; RY: Neossolo Flúvico; RL: Neossolo Litólico.

A estrutura do solo é resultado da agregação de suas partículas primárias que originam os agregados. A estabilidade dos agregados da camada superficial é um parâmetro físico de importância reconhecida no estudo do processo

erosivo. Essa estabilidade depende, principalmente, da textura do solo, da sua mineralogia, do teor e tipos de matéria orgânica e da sua umidade (LIER; ALBUQUERQUE, 1997). A dimensão dos agregados do solo dá uma ideia da suscetibilidade deste à erosão e se relaciona também ao espaço poroso dos solos.

O índice de estabilidade dos agregados (IEA) representa uma medida da agregação total do solo, assim como o diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP), porém, o IEA não considera a distribuição por classes de agregados (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998).

Considerando-se os três índices avaliados, concluiu-se maior agregação em solo sob mata nativa, seguido por plantio de eucalipto. Os menores índices foram verificados nos solos sob culturas anuais (51, 42% e 54, 65%) e estão relacionados ao menor teor de matéria orgânica encontrado nesses sistemas de uso (Tabela 2 e Figura 5).

Em relação ao DMG e DMP, obtiveram-se melhores resultados quando se realizou o pré-umedecimento das amostras (Tabela 2). Tal procedimento simula uma contínua presença de água nos poros das partículas de solo agindo como a ocorrência de uma precipitação. Já a avaliação das amostras do solo sem pré-umedecimento simula o oposto. Condiz com um solo completamente seco que quando ocorre uma precipitação a qual há muito não ocorria, o solo facilmente desagrega podendo causar erosão hídrica. Segundo Andrade e Rando (1981), a rápida absorção de água pela compressão do ar no interior dos agregados em tratamentos sem pré-umedecimento faz com que a pressão exceda a coesão das partículas, ocorrendo à quebra (slaking).

Nas classes de solos e usos avaliados foram obtidos maiores valores para os agregados quando analisados com pré umedecimento (Tabela 2). Solos que apresentam maior agregação podem ser considerados superiores aos com menor agregação, considerando-se a mesma classe de solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

Tabela 2 Diâmetro médio geométrico com e sem pré-umedecimento (DMG_{cp} e DMG_{sp}), Diâmetro médio ponderado com e sem pré-umedecimento (DMP_{cp} e DMP_{sp}), Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) e teores médios de matéria orgânica para cada classe e uso de solo presente na sub-bacia das Posses, Município de Extrema (MG)

Classe de solo	Uso	DMG _{cp}	DMG _{sp}	DMP _{cp}	DMP _{sp}	IEA	MO
		-----mm-----				%	g kg ⁻¹
PVA	MN	3,982	3,786	4,254	4,012	89,03	4,07
	EUC	3,765	3,369	4,012	3,985	80,54	4,33
	P	3,257	3,125	3,458	3,325	69,36	1,17
	SPM	2,056	1,896	2,569	2,125	51,42	1,53
CX	MN	3,987	3,686	4,554	4,312	86,63	4,83
	EUC	4,012	3,569	4,512	3,996	84,25	3,97
	P	3,965	3,369	3,658	3,278	64,36	2,13
	SPB	2,684	2,012	2,689	2,235	54,65	1,13
CH	MN	4,275	3,578	4,589	3,624	91,23	4,67
	EUC	3,885	3,549	4,222	3,785	75,65	3,37
	P	3,787	3,546	3,895	3,478	71,14	1,57
RY	MN	3,684	3,486	3,987	3,012	76,32	2,21
	EUC	3,665	3,159	4,212	3,885	68,12	2,78
	P	4,087	3,502	4,395	3,678	67,45	1,47
RL	MN	3,454	3,086	4,054	3,112	67,11	4,33
	P	3,187	3,496	4,095	3,378	61,06	2,04

DMG_{cp}: diâmetro médio geométrico com pré-umedecimento; DMG_{sp}: diâmetro médio geométrico sem pré-umedecimento; DMP_{cp}: diâmetro médio ponderado com pré-umedecimento; DMP_{sp}: diâmetro médio ponderado sem pré-umedecimento; IEA: índice de estabilidade de agregados; MO: matéria orgânica; MN: mata nativa; EUC: povoamento de eucalipto; P: pastagem plantada; SPM: solo coberto com palha de milho; SPB: solo preparado para plantio de batata; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; CX: Cambissolo Háplico, CH: Cambissolo Húmico;; RY: Neossolo Flúvico ; RL: Neossolo Litólico.

O índice de correlação entre a matéria orgânica e o índice de estabilidade de agregados foi determinado segundo Pearson. Com 95% de confiança, este foi de 0,78, indicando boa correlação entre essas variáveis, à medida que o teor de matéria orgânica no solo aumenta, eleva-se o índice de

agregação do solo. As mesmas observações foram realizadas por Beutler et al. (2001), os quais verificaram correlação positiva (0,97) entre agregação do solo e matéria orgânica em um Latossolo Vermelho distrófico típico na profundidade de 0 a 5 cm.

Os resultados referentes à análise descritiva para os valores de Ca, Mg, K, P, pH, matéria orgânica, DMG_{cp} , DMG_{sp} , DMP_{cp} , DMP_{sp} e IF são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 Parâmetros Estatísticos para os atributos químicos e físicos do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

Variável/Estatística	Média	Mediana	Desvio padrão	CV (%)	Assimetria
Ca ($cmol_c dm^{-3}$)	2,02	1,8	1,55	74,87	0,53
Mg ($cmol_c dm^{-3}$)	0,72	0,7	0,47	63,44	0,26
K ($mg dm^{-3}$)	97,31	80	63,13	65,16	0,8
P ($mg dm^{-3}$)	7,04	2,6	12,12	172,51	1,1
pH em H ₂ O	5,44	5,5	0,37	6,85	-0,42
MO (Dag kg^{-1})	3,59	3,6	1,27	35,28	-0,03
DMG_{cp} (mm)	4,03	4,21	0,4	9,84	-1,34
DMG_{sp} (mm)	4,02	4,29	0,97	24,21	-0,81
DMP_{cp}	4,53	4,63	0,4	8,83	-0,75
DMP_{sp}	4,05	4,42	0,79	19,61	-1,4
IF (%)	30,37	30,6	8,9	29,32	-0,08

CV: coeficiente de variação; Ca: teor de cálcio; Mg: teor de magnésio; K: teor de potássio; P: teor de fósforo; pH: potencial hidrogeniônico; MO: matéria orgânica do solo; DMG_{cp} : diâmetro médio geométrico com pré-umedecimento; DMG_{sp} : diâmetro médio geométrico sem pré-umedecimento; DMP_{cp} : diâmetro médio ponderado com pré-umedecimento; DMP_{sp} : diâmetro médio ponderado sem pré-umedecimento; IF: índice de floculação.

Um conjunto de dados tem distribuição normal quando os valores de sua média aritmética e mediana apresentam valores semelhantes (LITTLE; HILLS, 1978). A mediana é o valor central quando os valores são arranjados em ordem crescente. Considerando essas estatísticas, tem-se que uma distribuição normal

apresenta coeficiente de assimetria próximo ao zero (SNEDECOR; COCHRAN, 1974).

Os valores de assimetria demonstram distribuições assimétricas para os atributos estudados. O coeficiente de assimetria é mais sensível a valores extremos que a média e desvio padrão já que um único valor pode influenciar fortemente esse coeficiente (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

Apesar de os atributos apresentarem assimetria, nota-se que os dados não apresentam assimetria acentuada, pois apresentam valores de média e mediana, em sua maioria, próximos ao banco de dados, atendendo à condição de normalidade, ou seja, os valores não são dominados por valores atípicos de distribuição e são mais adequados para uso da geoestatística (CAMBARDELLA et al., 1994). Isaacs e Srivastava (1989) destacam que apesar de importante, a normalidade não é considerada uma exigência para aplicação da geoestatística, sendo que a ocorrência de média e variabilidade dos dados constantes é mais importante, pois permitem que a krigagem não seja comprometida.

De acordo com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), o coeficiente de variação (CV) quando maior que 35% indicamos uma série heterogênea, CV maior que 65%, estão relacionados a um material ainda mais heterogêneo. Contudo, média inferior a 35% representa uma série mais homogênea.

Nota-se a partir da Tabela 4 que a maioria dos atributos químicos avaliados obteve CV superior a 65%. O CV encontrado para o fósforo foi superior a 170%. Apenas o pH do solo obteve CV baixo, de 6,85%, o que condiz uma área mais homogênea para este atributo.

O alto CV para atributos químicos pode estar relacionado ao manejo do solo. Na sub-bacia das Posses, ocorrem diversos usos do solo (LIMA, 2010), como: pastagem, mata de eucalipto, culturas anuais como batata e milho e há presença de faixas com mata nativa. Essa diversidade de ambientes condiciona

diferenças nas propriedades do solo, em especial dos atributos químicos. Atributos químicos do solo são influenciados pela cultura e práticas agrícolas (SILVA; LIMA, 2012).

Ambos os atributos físicos do solo avaliados comportaram-se como atributos mais homogêneos em relação ao CV (WARRICK; NIELSEN, 1980). Ainda assim, nota-se maior CV para os atributos relacionados à agregação do solo (DMG e DMP) quando estes não foram submetidos a um pré-umedecimento.

Os parâmetros de ajuste do semivariograma são apresentados na tabela 5. Os resultados da análise geoestatística mostraram que os atributos químicos estudados apresentaram dependência espacial com exceção do P. O fósforo é um elemento químico essencial ao crescimento das plantas. Possui uma característica peculiar quanto à sua necessidade no plantio. Além de ser requerido pela planta é requerida pelo solo. Tal elemento é pouco disponível em solos do Brasil e é extremamente reativo, dessa maneira, quando aplicado ao solo, tende a reagir formando compostos de baixa solubilidade. Portanto, ao contrário dos demais nutrientes, a adubação com fósforo assume a particularidade de ter-se que aplicar uma quantidade maior do que aquela exigida pelas plantas, pois, primeiramente, torna-se necessário satisfazer a exigência do solo.

O manejo do solo, principalmente relacionado à adição de matéria orgânica é muito importante para a disponibilidade deste nutriente. Em razão do comportamento peculiar do fósforo, não foi possível, no presente trabalho, identificar uma dependência espacial do fósforo. A distância máxima de até 350 m entre cada ponto coletado não foi o suficiente para indicar uma dependência espacial desse nutriente. Este resultado também foi verificado em Souza, Cogo e Vieira (1998), os quais observaram maior variabilidade espacial e ausência de

dependência espacial para o fósforo quando avaliado em solo preparado com escarificação.

Tabela 4 Parâmetros de ajuste do semivariograma experimental para os atributos físicos e químicos relacionados com a qualidade do solo em relação erosão hídrica, para a sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

Variável	Modelo	C ₀	C ₁	C ₀ + C ₁	A	RD
Ca	wave	1,62	2,12	3,74	706,50	43,31
Mg	exponencial	0,09	0,33	0,42	3532,00	21,42
K	exponencial	2212,00	4267,00	6479,00	3091,00	34,14
P		Efeito Pepita Puro				
pH	esférico	0,03	0,11	0,14	794,50	21,42
MO	exponencial	1,24	1,04	2,28	3621,00	54,38
DMG _{cp}	exponencial	0,18	0,45	0,63	1128,00	28,57
DMG _{sp}		Efeito Pepita Puro				
DMP _{cp}	exponencial	0,02	0,18	0,20	1074,00	10,00
DMP _{sp}		Efeito Pepita Puro				
IF	exponencial	58,61	87,91	146,52	6444,00	59,99

C₀: efeito pepita; C₁: variância estrutural; C₀ + C₁: patamar, a: alcance; RD: razão de dependência espacial; MO: matéria orgânica do solo; DMG_{cp}: diâmetro médio geométrico com pré-umedecimento; DMG_{sp}: diâmetro médio geométrico sem pré-umedecimento; DMP_{cp}: diâmetro médio ponderado com pré-umedecimento; DMP_{sp}: diâmetro médio ponderado sem pré-umedecimento; IF: índice de floculação.

Em relação aos atributos físicos avaliados, para o DMG_{sp} e DMP_{sp} não foi possível verificar uma dependência espacial, diferentemente de quando avaliados com pré-umedecimento. Este fato pode ser explicado pela grande variabilidade dos resultados quando não foi realizado pré-umedecimento antes da análise de estabilidade de agregados. Agregados pré-umedecidos anteriormente à análise têm comportamento diferente. Quando não é realizado tal procedimento, ou seja, quando estão completamente secos, estes agregados são bastante influenciados ao entrar em contato com água.

Verificou-se esta situação principalmente para o Neossolo Flúvico, porém, os demais solos também apresentaram menor DMG e DMP sem pré-umedecimento. Este condicionamento diferente gera grandes variações nos resultados obtidos, demonstrando uma insuficiência na distância máxima entre pontos utilizados, para indicar dependência espacial, originando efeito pepita puro para os atributos DMG_{sp} e DMP_{sp} .

Torna-se de extrema importância a presente avaliação, tendo em vista que as mesmas variáveis que indicam capacidade de agregação do solo, quando analisadas de maneiras diferentes, poderão não indicar dependência espacial (Figuras 5 e 6, Tabela 4).

O alcance da autocorrelação espacial, ou seja, a distância máxima nas quais os atributos estão espacialmente correlacionados (VIEIRA et al., 1983) foi comparada para os diferentes atributos avaliados. Na Tabela 4, pode-se observar que os valores do alcance obtido variam de 706,50 a 6.444,00 m, os quais correspondem aos raios das áreas consideradas homogêneas para cada variável estudada. Desta forma, todos os vizinhos situados dentro de um círculo com esses raios podem ser usados para estimar valores para qualquer ponto entre eles (VIEIRA; LOMBARDI NETO, 1995). Observa-se que os atributos que apresentaram menor e maior alcance foram o teor de Ca e o índice de floculação (IF), respectivamente.

A partir da razão de dependência espacial (RD) proposta por Cambardella et al. (1994) classificou-se os atributos avaliados com forte e moderada dependência espacial. Semivariogramas que apresentam razão de dependência (RD) espacial menor ou igual a 25% têm forte dependência espacial. A dependência é moderada quando esta relação variar de 25 a 75% e fraca quando esse valor for superior a 75% de acordo com essa classificação.

A maioria dos atributos ajustou-se ao modelo exponencial, em concordância com Carvalho, Takeda e Freddi (2003), Oliveira et al. (1999) e

Souza et al. (2003), os quais estudando a variabilidade espacial de atributos do solo obtiveram resultados semelhantes. Para o Ca e pH os modelos ajustados foram respectivamente “wave” e esférico. O P apresentou estrutura , ”com efeito,” pepita puro, possivelmente decorrente a uma distância insuficiente para captar dependência espacial na amostragem para este atributo.

Os modelos esféricos e exponenciais apresentam-se como modelos mais comuns atribuídos ao comportamento do solo e da planta segundo Alvarenga et al. (2011), Cambardella et al. (1994) e Trangmar et al. (1985). Os atributos químicos têm maior variabilidade espacial, possivelmente devido à interferência antrópica como o uso de práticas agrícolas na área (KAVIANPOOR et al., 2012).

O ajuste do Ca ao modelo “wave” pode ser explicado pela aplicação de calcário pontualmente na sub-bacia das Posses. Na presente sub-bacia vivem aproximadamente 100 proprietários rurais e estes utilizam a agricultura familiar e pecuária extensiva como subsistência (Figura 3b). Para tal, são plantadas culturas anuais e cultivados pastos (Figura 3a). A sub-bacia é caracterizada por agricultura e pecuária de baixo nível tecnológico, porém, em algumas áreas, os proprietários fazem durante o preparo do solo, a calagem para corrigir a elevada acidez do solo. Ao serem aplicadas dosagens de calagem em alguns pontos da sub-bacia, ocorre variação do teor de cálcio ora elevado, nesses pontos, e ora muito baixo, nas demais localidades da sub-bacia das Posses, estando o Ca presente em elevado teor, pontualmente, e em menor teor na maior parte da sub-bacia, como ocorre com os demais atributos químicos do solo.

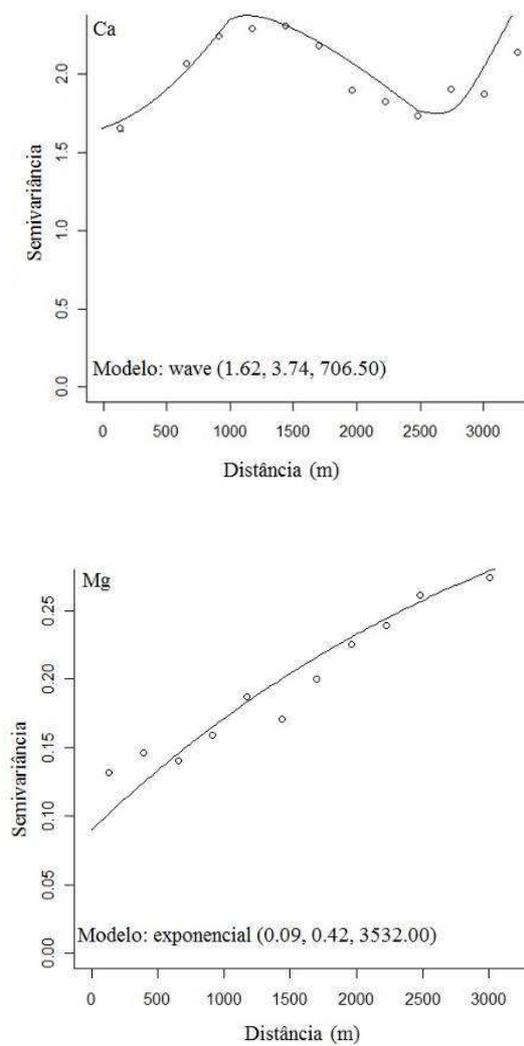
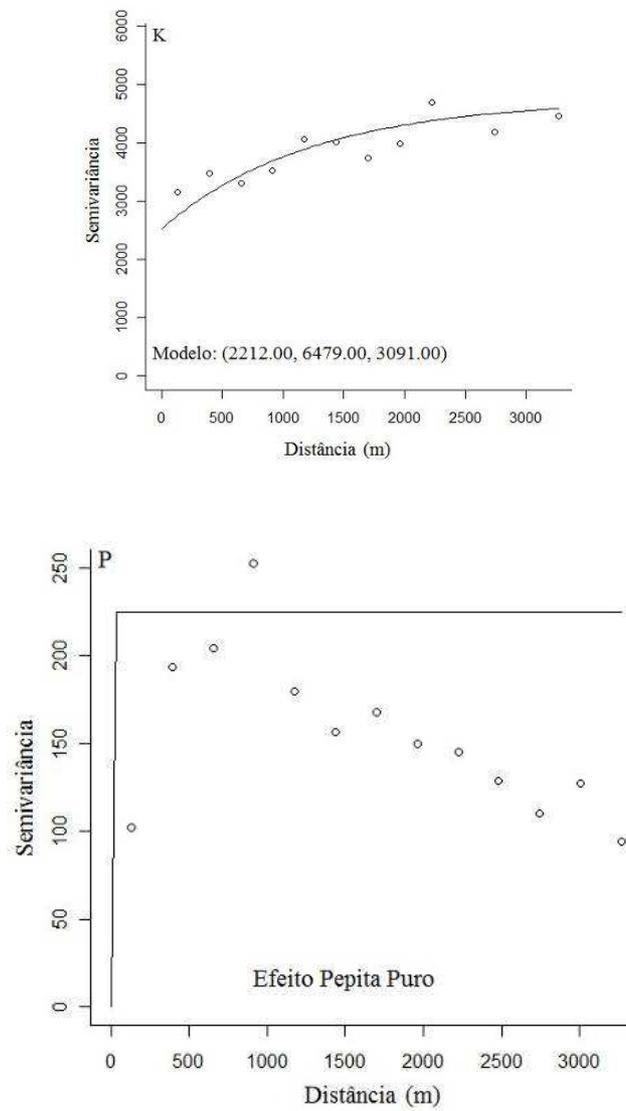


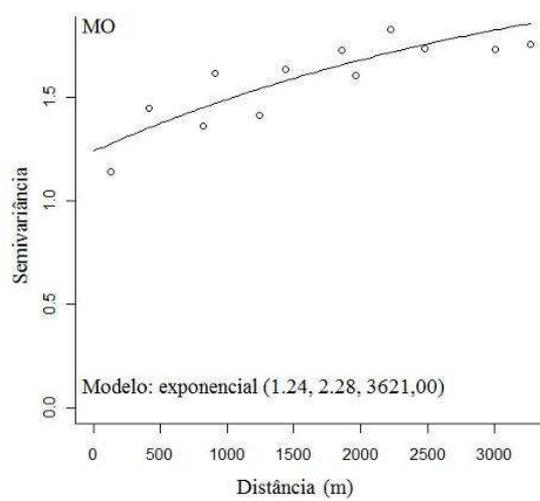
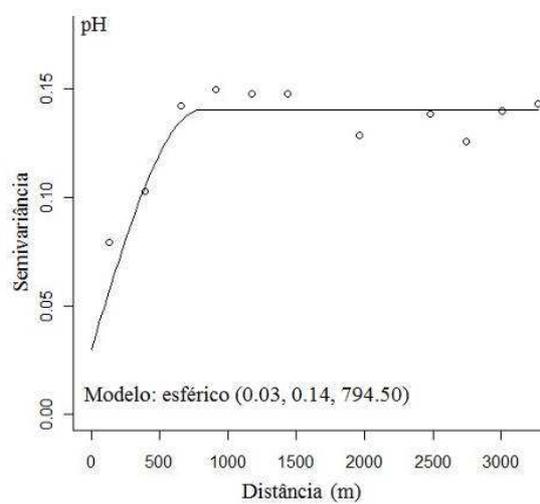
Figura 5 Semivariogramas dos atributos químicos do solo: cálcio, magnésio, potássio, fósforo, pH e matéria orgânica do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

(...continua...)

“Figura 5, continuação”



“Figura 5, conclusão”



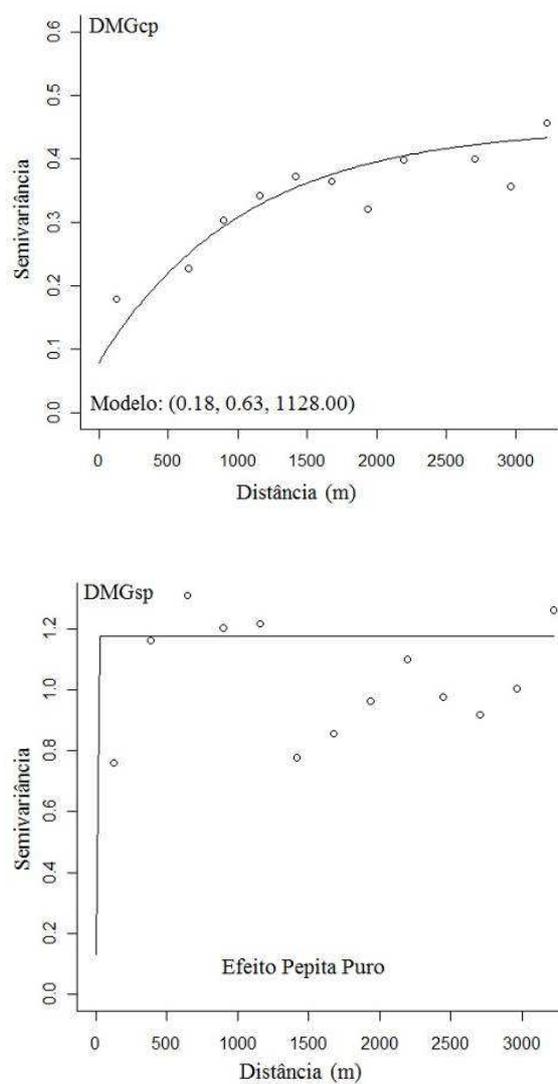
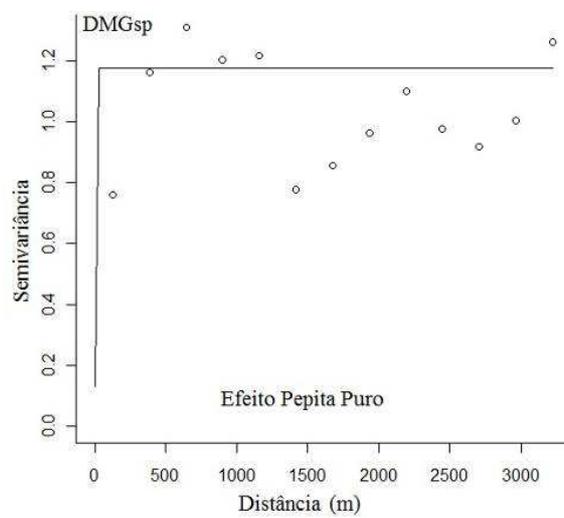
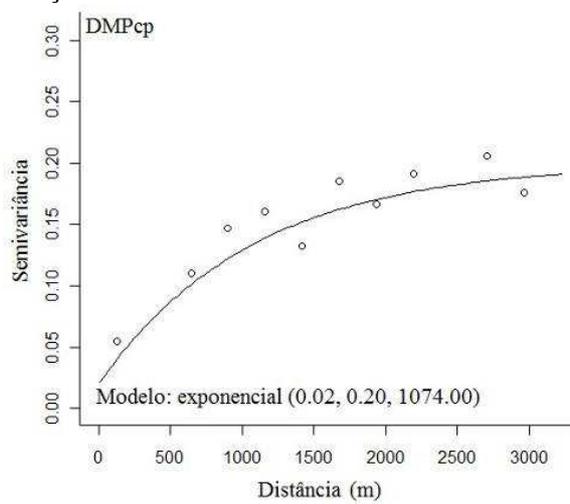


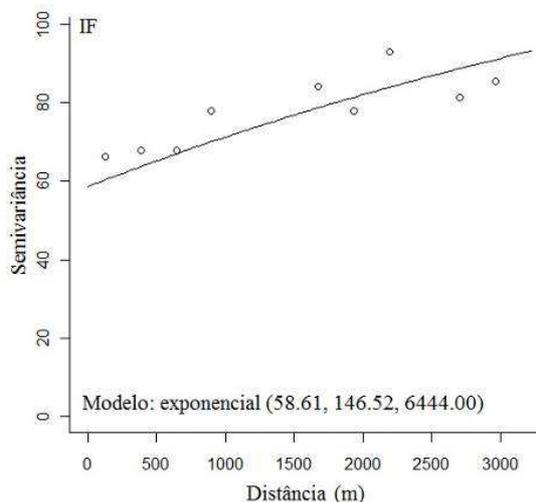
Figura 6 Semivariogramas dos atributos físicos do solo: diâmetro médio geométrico com e sem pré-umedecimento (DMG_{cp} e DMG_{sp}), diâmetro médio ponderado com e sem pré-umedecimento (DMP_{cp} e DMP_{sp}), índice de flocculação (IF) na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

(...continua...)

“Figura 6, continuação”



“Figura 6, conclusão



Para a maioria dos atributos avaliados houve dependência espacial, como mostram os semivariogramas, sendo possível, dessa maneira, realizar a interpolação de valores em qualquer posição no campo em estudo, elaborando-se os mapas por meio do processo da krigagem ordinária (VIEIRA, 2000). A krigagem é uma técnica de estimação de locais não amostrados, usando propriedades estruturais do semivariograma confeccionados a partir de locais amostrados. Mapas de krigagem podem ser elaborados para aqueles atributos que apresentam dependência espacial e, esta informação é usada para visualizar e melhor entender o padrão de distribuição espacial, além de definir diferentes zonas de manejo em uma determinada área (ÖZGÖZ et al., 2012).

Os mapas de distribuição obtidos por meio da interpolação dos dados, pelo método da krigagem ordinária, são fundamentais na avaliação da agregação do solo de áreas sejam elas degradadas ou não, sejam potenciais para recarga de água, utilizadas na agropecuária ou de preservação permanente. A agregação do solo é influenciada, principalmente, por atributos químicos e físicos do solo bem como o manejo e uso do mesmo. A variabilidade espacial dos atributos físicos e

químicos do solo possui relação direta com a formação e manutenção dos seus agregados (VIEIRA et al., 2011). Estes mapas gerados possibilitam um manejo adequado da área e indicam áreas prioritárias de recuperação, ou seja, aquela as quais possuem deficiências nutricionais e impedimentos físicos quanto à agregação do solo que podem ocasionar perdas de solo por erosão hídrica e diminuir a infiltração de água no solo, diminuindo assim a recarga do lençol freático.

A sub-bacia das Posses está localizada em área com remanescentes de Mata Atlântica e está inserida no Sistema Cantareira, sendo de importância capital a avaliação dos atributos físicos e químicos do solo para conservar e proteger ecossistemas e recuperar áreas que possuem solos com baixo teor de nutrientes e baixos teores de indicadores físicos. Assim, são dadas condições a esses solos para a infiltração de água bem como a possibilidade de crescimento e desenvolvimento de espécies, conservando, assim, uma área de grande importância ecológica, econômica e social (BRASIL, 2007).

Nos mapas gerados, pode-se visualizar na área amostrada a distribuição espacial dos teores dos nutrientes avaliados bem como, pH, matéria orgânica, diâmetro médio ponderado e índice de floculação. Os mapas de distribuição mostram-se mais homogêneos para Ca, Mg e K, e apresentam forte dependência espacial (Figuras 7 e 8 e Tabela 4) indicando baixo teor dos mesmos em grande parte da sub-bacia. Gontijo et al. (2012) verificaram variação no teor de matéria orgânica do solo ocasionada por ação antrópica, indicando dependência espacial deste atributo.

Segundo Oliveira et al. (1999), o conhecimento dos valores do alcance e as localizações das áreas onde estão concentrados os maiores e/ou menores valores de determinada variável química, são importantes para o planejamento do manejo da fertilidade do solo, tanto na agricultura quanto na manutenção da conservação da área. Mesmo a área possuindo baixa fertilidade, é possível, a

partir das Figuras 7 e 8, mostrar as subáreas mais críticas em relação a esses baixos teores. Esse fato pode indicar as áreas prioritárias de conservação, ou seja, aquelas mais pobres quanto à presença de nutrientes e matéria orgânica.

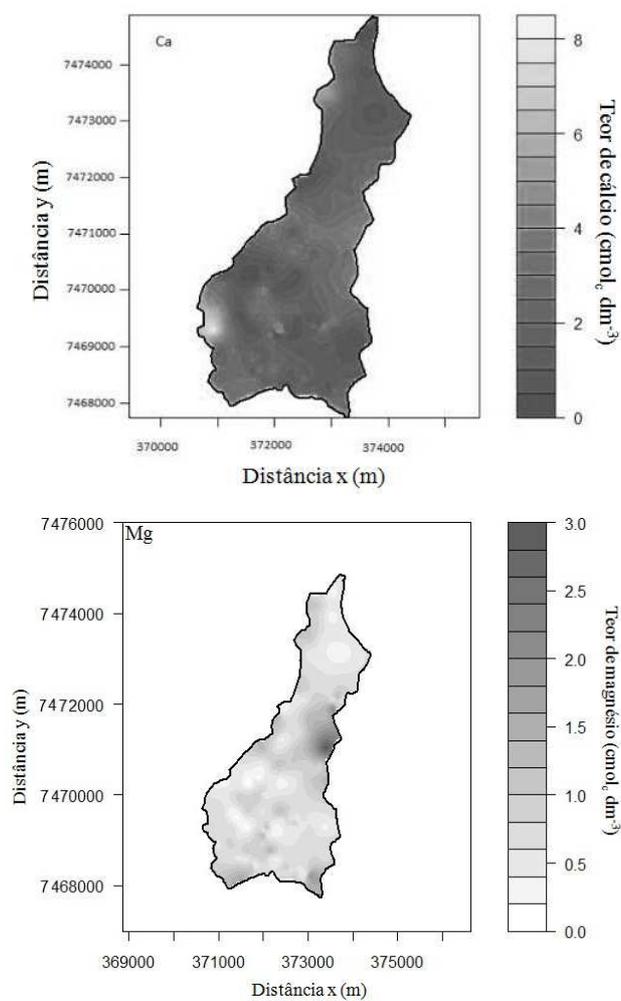
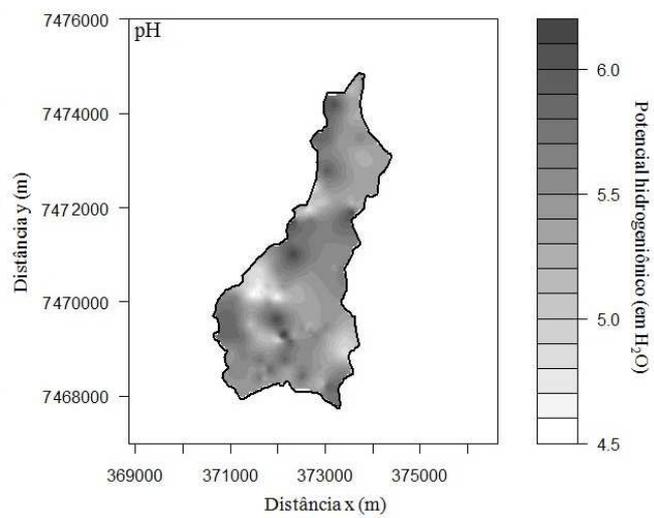
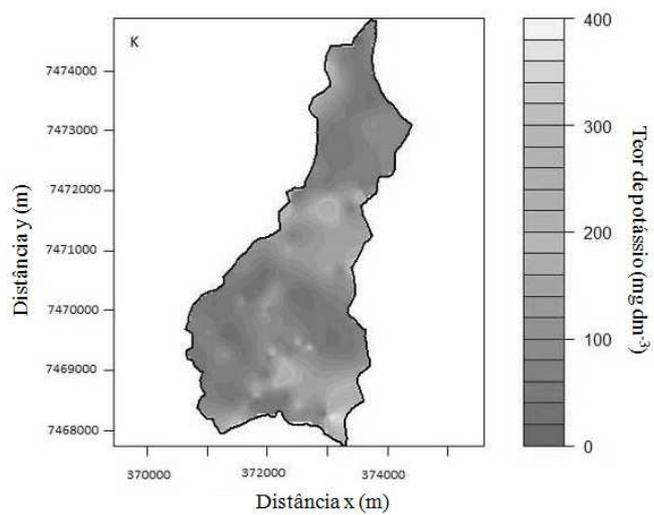
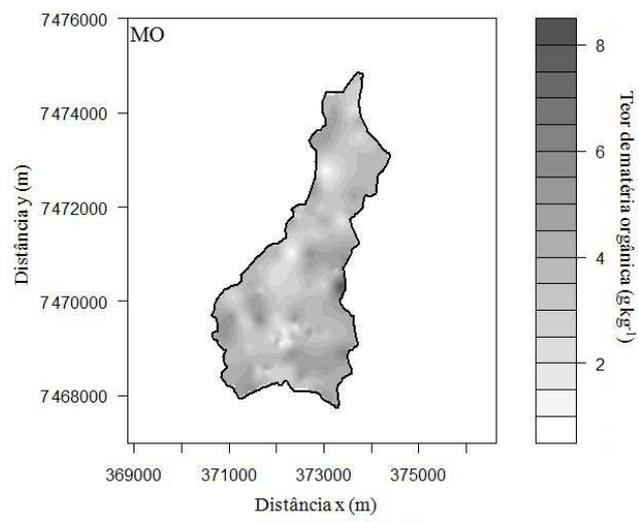


Figura 7 Mapa de distribuição dos atributos químicos do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

“Figura 7, continuação”



“Figura 7, conclusão”



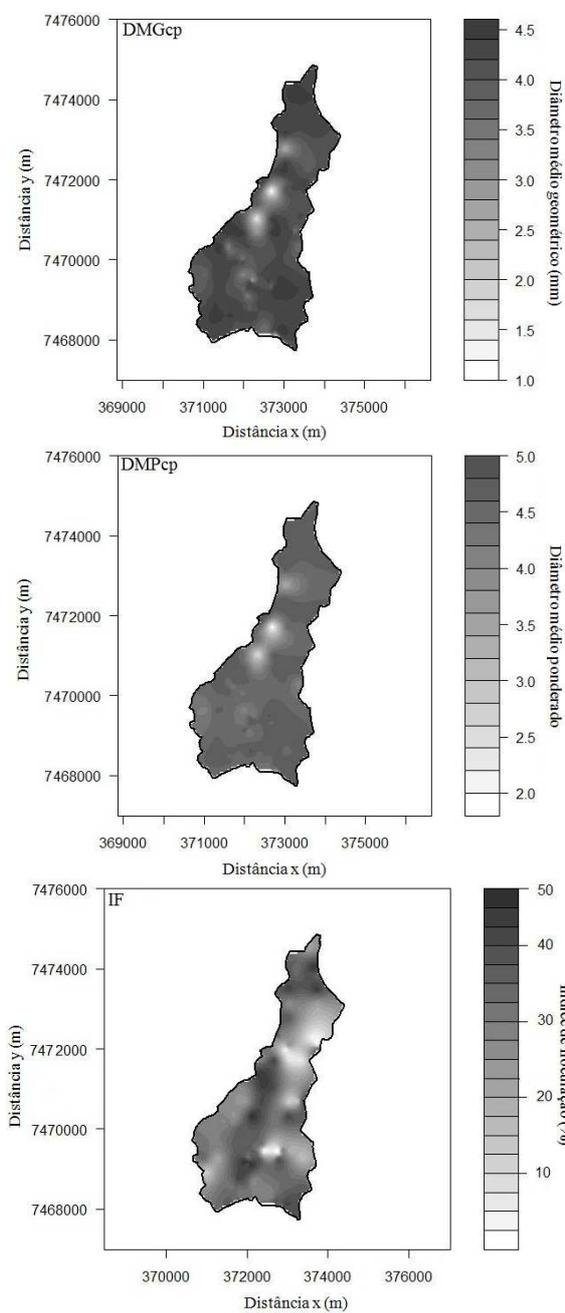


Figura 8 Mapa de distribuição dos atributos físicos do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

Observa-se nos mapas de distribuição (Figuras 7 e 8) que ao norte da área, onde é encontrado relevo montanhoso, predomina a classe de solo Cambissolo (Figura 2a) e pastagem (Figura 3) ocorrem menores valores de cálcio, magnésio, potássio e, conseqüentemente, uma maior acidez evidenciada por menores valores de pH, além de teores medianos de matéria orgânica e de índice de floculação e elevados teores de diâmetro médio ponderado. Desse modo, o complexo de troca é preferencialmente ocupado por cátions de caráter ácido uma vez que os cátions de caráter básico podem ser removidos pela água da chuva para locais mais baixos do terreno.

Dentre os diversos fatores que influenciam na variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo, Souza (2001) relata que, a posição do terreno na paisagem (declividade e forma do relevo – Figura 2b) é uma característica de grande influência. O autor acrescenta que a forma da paisagem pode gerar rotas preferenciais para o fluxo de água, podendo afetar a variabilidade espacial dos atributos do solo.

4 CONCLUSÕES

As variáveis estudadas apresentaram variabilidade espacial de acordo com a posição em que se encontram na paisagem. Esta estrutura de dependência espacial variou de forte a moderada e possibilitou o mapeamento por meio de ferramentas da geoestatística, com exceção do P, DMG e DMP avaliados sem pré-umedecimento.

Os índices DMG_{cp}, DMP_{cp} e o índice de floculação avaliados foram ajustados em conformidade entre si na maior parte da sub-bacia, indicando boa agregação do solo.

A variabilidade natural dos atributos químicos do solo associada à aplicação e incorporação de calcário em pequenas áreas isoladas acarretou, de maneira geral, em baixos teores de nutrientes nos solos da sub-bacia, com concentrações de nutrientes em alguns pontos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Programa produtor de água superintendência de usos múltiplos**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2008. 60 p.
- ALVARENGA, C. C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1745-1758, set./out. 2011.
- ANDRADE, J. C. F. H.; RANDO, E. M. Alterações na consistência e textura de um latossolo do roxo distrófico ocasionado pelo cultivo convencional. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 5, n. 1, p. 40-47, 1981.
- BERG, M. V. D.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solo na região do Planalto Médio, RS: I., análise de variância por amostragem aninhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 393-399, set./out. 1997.
- BEUTLER, A. N. et al. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos cerrados no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, n. 1, p. 129-136, jan. 2001.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Levantamento da cobertura vegetal nativa do bioma Mata Atlântica**. Rio de Janeiro, 2007. 84 p.
- _____. **Relatório de inspeção: área atingida pela tragédia das chuvas região serrana do Rio de Janeiro**. Brasília, 2011. 85 p.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 1, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitorio Brasil, SP. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 4, p. 695-703, jul./ago. 2003.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com teor de carbono orgânico num Latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de cultura e métodos de preparo de amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

COUTO, E. G.; KLAMT, E.; STEIN, A. Estimativa do teor de argila e de potássio trocável em solo esparsamente amostrado no sul do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 1, p. 129-140, out. 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura; EMBRAPA/CNPS, 1997. 212 p.

GONTIJO, I. et al. Variabilidade e correlação espacial de micronutrientes e matéria orgânica do solo com a produtividade da pimenta do reino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 1, p. 1093-1102, jan./fev. 2002.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 2, p. 169-177, jan. 2005.

HURTADO, S. M. C. et al. Spatial variability of soil acidity attributes and the spatialization of liming requirement for corn. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1351-1359, set./out. 2010.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 51 p.

KAVIANPOOR, H. et al. Spatial variability of some chemical and physical soil properties in Nesho Mountainous Rangelands. **American Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 2, n. 1, p. 34-44, Jan. 2012.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis, part 1: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: ASA, 1986. p. 425-441.

LIER, Q. de J. van; ALBUQUERQUE, J. A. Método para calcular o diâmetro médio de agregados de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 699-705, maio 1997.

LIMA, G. C. **Avaliação de atributos indicadores da qualidade do solo em relação à recarga de água na sub-bacia das Posses, Extrema, MG**. 2010. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

LITTLE, T. M.; HILLS, F. J. **Agricultural experimentation**. New York: J. Wiley, 1978. 350 p.

NOVAES FILHO, J. P. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia Meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p. 91-100, nov. 2007.

OLIVEIRA, J. J. et al. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 783-789, maio 1999.

ÖZGÖZ, E. et al. Effect of management on spatial and temporal distribution of soil physical properties. **Journal of Agricultural Sciences**, Cambridge, v. 18, n. 1, p. 70-91, Apr. 2012.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2006. Software.

RAIJ, B. V. et al. **Análise química de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

SILVA, M. A. et al. Sistema de informações geográficas no planejamento de uso do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, 2013. No prelo.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Multivariate analysis and geostatistics of the fertility of a humic rhodic hapludox under coffee cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 2, p. 467-474, mar./abr. 2012.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 7th ed. Ames: Iowa State University, 1974. 507 p.

SOUZA, C. K. **Relação solo-paisagem-erosão e variabilidade espacial de Latossolos em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar no município de Jaboticabal, SP**. 2001. 186 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.

SOUZA, C. K. et al. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de um latossolo em Jaboticabal, SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, p. 486-495, 2003.

SOUZA, G. S. et al. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 73-81, 2010.

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 77-86, jan./fev. 1998.

TRANMAR, B. B. et al. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 45-94, 1985.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 213-223, jan./fev. 2011.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, P. F.; ALVARES, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, p. 1-75, 1983.

_____. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 1, p. 185-195, 2011.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 54, p. 405-412, 1995.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p. 319-344.

WHATELY, M.; CUNHA, P. **Cantareira 2006**: um olhar sobre o maior manancial de água da região metropolitana de São Paulo: resultados do diagnóstico socioambiental participativo do sistema Cantareira. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2007. 67 p.

CAPÍTULO 4 Determinação e espacialização do índice de qualidade do solo em áreas de uso agrícola, florestal, pastagens e remanescentes de Mata Atlântica, na sub-bacia das posses, Extrema (MG)

RESUMO

Dentre as funções que o solo exerce temos: promover meios para crescimento das plantas, regular e compartimentalizar o fluxo de água no ambiente, estocar e promover a ciclagem de elementos e atuar como um tampão ambiental. O entendimento da qualidade do solo é importante tendo em vista a importância da manutenção das funções que o mesmo exerce. O conhecimento da qualidade do solo promove a implantação de um manejo sustentável. A qualidade do solo é definida como sendo a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites do ecossistema, manejado ou natural, para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e a saúde das plantas e animais. Desta forma, contemplando todas as funções para determinação do índice de qualidade do solo (IQS), os atributos químicos considerados na determinação do índice de qualidade do solo foram: Ca, Mg, Al, P, K, pH, matéria orgânica do solo (MO), soma de bases (SB) e saturação por alumínio (m). No caso dos atributos físicos, foram considerados: permeabilidade do solo à água, volume total de poros, microporosidade, macroporosidade, densidade do solo e diâmetro médio geométrico (DMG) com pré-umedecimento. Objetivou-se com este estudo, determinar o índice de qualidade do solo em relação a atributos químicos e físicos do solo utilizando-se o modelo estabelecido na literatura, verificar dependência espacial do mesmo e espacializar em relação aos pontos amostrados na sub-bacia das Posses, município de Extrema (MG). A espacialização dos índices de qualidade solo na sub-bacia das Posses possibilitou a identificação de menores valores nos solos sob pastagens. As áreas sob cultivo de batatas apresentaram IQS próximo ao IQS de Mata Atlântica devido ao manejo da área, o que não caracteriza a mesma como ambiente ideal. O reflorestamento com eucalipto condiciona solos, em sua maioria, com baixas deteriorações físicas e químicas devido ao acúmulo de serrapilheira. O modelo pelo qual o IQS se ajustou foi o exponencial possibilitando a krigagem ordinária.

Palavras-chave: Geoestatística. Deterioração. Pastagem. Mata nativa.

ABSTRACT

Among the functions soil exerts, we may mention the promotion of plant growth, compartmentalization and regulation of the environment's water flow, stocking and promoting element cycling and act as an environmental buffer. The understanding of soil quality is important due to its importance in maintaining these functions. The knowledge of soil quality promotes the implementation of sustainable management. Soil quality may be defined as the capacity of the soil in performing inside an ecosystem boundary, managed or natural, in order to sustain biological productivity, maintain environmental quality and the plant and animal health. Thus, considering all the functions for determining soil quality index (SQI), the chemical attributes considered for determination soil quality index were: Ca, Mg, Al, P, K, pH, soil organic matter (OM), sum of bases (SB) and aluminum saturation (m). For physical attributes, we considered: soil permeability to water, total porosity, microporosity, macroporosity, soil density and geometric average diameter (GAD) with pre-wetting. The objective of this study was to determine soil quality in relation to physical and chemical soil attributes using the model established in literature, verify spatial dependency and spatialize in relation to the sample in the Posses sub-basin in Extrema, Minas Gerais, Brazil. The spatial distribution of soil quality indexes in Posses sub-basin allowed the identification of lower values in soils under pasture. Areas under potatoes cultivation presented SQI similar to that of the Atlantic Forest due to the area's management, even though the area is not characterize as environmentally ideal. Reforestation with eucalyptus conditions the majority of the soils with low physical and chemical deteriorations due to the accumulation of litter. The model to which the SQI was adjusted was the exponential model, which allowed ordinary kriging.

Key words: Geostatistics. Deterioration. Pasture. Native forest.

1 INTRODUÇÃO

O solo é um corpo natural complexo e dinâmico resultante da atuação conjunta de fatores de formação como clima, organismos, material de origem, relevo e tempo (AMUNDSON; JENNY, 1991).

Dentre as funções que o solo exerce temos: prover meios para crescimento das plantas, regular e compartimentalizar o fluxo de água no ambiente, estocar e promover a ciclagem de elementos na biosfera e atuar como um tampão ambiental (LARSON; PIERCE, 1994).

O entendimento da qualidade do solo é importante tendo em vista a importância da manutenção das funções que o mesmo exerce. O conhecimento da qualidade do solo promove a implantação de um manejo sustentável.

A qualidade do solo foi definida por Doran e Parkin (1994) como sendo a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites do ecossistema, manejado ou natural, para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e a saúde das plantas e animais.

A avaliação da qualidade do solo é complexa, pois envolve diversos fatores, ainda assim, sua avaliação tem sido bastante recomendada tendo em vista sua aplicabilidade. Segundo Andréa et al. (2002), a qualidade do solo é um importante instrumento para medir ou monitorar a conservação do solo ou qualquer processo de degradação em curso, pois é útil na avaliação de interferências antrópicas sobre o ambiente, uma vez que consideram a relação entre o solo e os demais componentes do agroecossistema.

Nessa perspectiva é fundamental a escolha de um conjunto mínimo de indicadores que apresentem características com facilidade de avaliação, aplicabilidade em diferentes escalas, capacidade de integração, adequação ao nível de análise da pesquisa, utilização no maior número possível de situações,

sensibilidade às variações de manejo e clima e possibilidade de medições por métodos quantitativos e/ou qualitativos (DORAN; PARKIN, 1996).

Estudos desenvolvidos por Hussain et al. (1999) verificaram a importância da avaliação do índice de qualidade de solo em relação à sustentabilidade de sistemas agrícolas comprovando baixos índices de qualidade do solo em solos manejados incorretamente.

Estudos desenvolvidos sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo localizados em distintas regiões do estado de Minas Gerais obtiveram índices de qualidade do solo comprovando que áreas de manejo florestal sofreram reduções do índice de qualidade quando comparadas aos sistemas nativos avaliados (FREITAS et al., 2012).

Cardoso et al. (2011) avaliaram os índices de qualidade do solo tanto com base nos desvios das propriedades do solo de sistemas de pastagens em relação aos ambientes naturais (ISLAM; WEIL, 2000), como a partir do estabelecimento das funções do solo e indicadores a ela associados (KARLEN; STOTT, 1994) e constataram eficiência dos índices em refletir a variação da qualidade do solo nos diferentes ambientes nas duas formas de determinação. Os índices mostraram degradação dos sistemas de pastagem em relação à floresta nativa.

Como indicadores de qualidade, linhas de pesquisa têm estudado e proposto alguns índices tais como: avaliação da matéria orgânica do solo, que constitui fonte primária de nutrientes às plantas e exerce influência em diversos processos que ocorrem no solo (CONCEIÇÃO et al., 2005); avaliação de atributos físicos (NEVES et al., 2007); avaliação de atributos e processos químicos, biológicos e estes em conjunto (TÓTOLA; CHAER, 2002).

O conjunto de atributos a fim de quantificar o índice de qualidade é relacionado às funções exercidas pelo solo. A utilização de um maior número de atributos químicos e físicos do solo para determinação quantitativa do índice de

qualidade do solo permite uma caracterização mais expressiva em relação a cada ponto amostrado. Segundo Islam e Weil (2000), a qualidade do solo pode também ser avaliada por meio do índice de deterioração do solo, para a qual os desvios das propriedades químicas e físicas do solo de uma área sob ação antrópica são comparados à linha base de uma área natural adjacente ou que apresente condições de solo e clima similares.

Ao se estabelecer um índice de qualidade em pontos georreferenciados, é possível espacializar os índices determinados utilizando-se ferramentas de geoestatística.

A geoestatística permite descrever a continuidade espacial, característica essencial de muitos fenômenos naturais. A geoestatística oferece um conjunto de ferramentas estatísticas que incorporam no processamento dos dados as coordenadas espaciais das observações (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). A espacialização de atributos do solo possibilita conhecer melhor a variação e o comportamento destes no ambiente. Segundo Berge e Klamt (1997) e Couto, Klamt e Stein (2000), estes estudos podem ser feitos em grandes áreas, abrangendo diversos tipos de solo, desde que haja uma malha amostral adequada. Estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo são importantes não apenas em amostragens ou interpretação dos dados, mas também auxiliam o levantamento e classificação de solos (NOVAES FILHO et al., 2007).

A Mata Atlântica, considerada atualmente como bioma mais importante no Brasil devido à sua elevada concentração da população brasileira (70%) e percentual de remanescentes bem conservados é de apenas 7,26% necessita de estudos que envolvam o conhecimento do seu ecossistema tais como determinação de indicadores de qualidade do solo que possibilita o estabelecimento de práticas mais adequadas de manejo (BRASIL, 2007). Dessa maneira, a determinação do índice de qualidade do solo no Brasil, em especial

em áreas com remanescentes de Mata Atlântica constitui-se importante ferramenta visando melhorias da qualidade do ambiente.

Objetivou-se neste estudo, determinar o índice de qualidade do solo em relação a atributos químicos e físicos do solo utilizando-se o modelo estabelecido por Islam e Weil (2000), verificar dependência espacial do mesmo e espacializar em relação aos pontos amostrados na sub-bacia das Posses, município de Extrema (MG).

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo possui 1.196,70 ha e compreende a Sub-bacia Hidrográfica das Posses, localizada no município de Extrema, no Sul do Estado de Minas Gerais (Figura 1). Esta sub-bacia está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari, um dos rios que abastece o Reservatório do Sistema Cantareira no Estado de São Paulo. Encontra-se dentro do bioma da Mata Atlântica (AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA, 2008).

Situa-se entre as coordenadas UTM 374.500 e 371.500 de longitude E e entre 7.468.200 e 7.474.800 de latitude S (Datum SAD 69, Zona 23S) e entre as altitudes de 1.144 e 1.739 m (bacia de cabeceira).

O clima na sub-bacia é do tipo Cwb, de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado como mesotérmico de verões brandos e suaves, e estiagem de inverno. A temperatura média anual é de 18 °C, tendo nos meses mais quente e mais frio temperaturas médias de 25,6 °C e 13,1 °C, respectivamente, com ocorrência de geadas anuais, e precipitação média anual de 1.477 mm (ANA, 2008).

As classes de solo predominantes na sub-bacia são: Neossolo Litólico (RL), Neossolo Flúvico (RY), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Cambissolo Háplico (CX) e Cambissolo Húmico (CH) (Figura 2a). Sendo que o Cambissolo Háplico ocupa 351,95 ha (29% da área), o Cambissolo Húmico ocupa 108,85 ha (10%), o Argissolo Vermelho-Amarelo ocupa 478,61 ha (40%), o Neossolo Flúvico 108,85 ha (10%) e o Neossolo Litólico 135,98 ha (11%). As fases de relevo predominantes são; ondulado e forte ondulado (Figura 2b). Atualmente o principal uso do solo é pastagem (LIMA, 2010), sendo que grande parte encontra-se mal manejada. Há também povoamentos de eucalipto, culturas anuais e mata nativa, sendo grande área ocupada por mata de araucária (SILVA et al., 2013) (Figura 3 e Tabela 1).

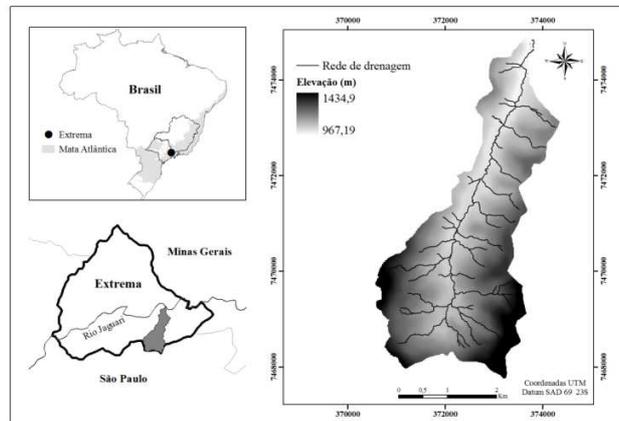


Figura 1 Mapa de localização da Sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

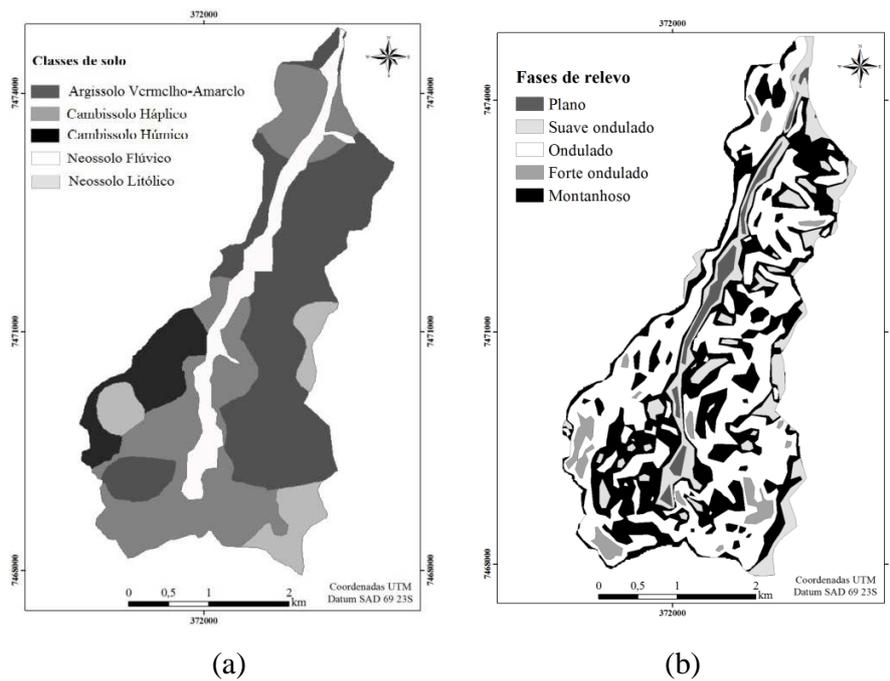


Figura 2 Mapa das classes de solos (a) e relevo (b) da sub-bacia das Posses, Extrema (MG).

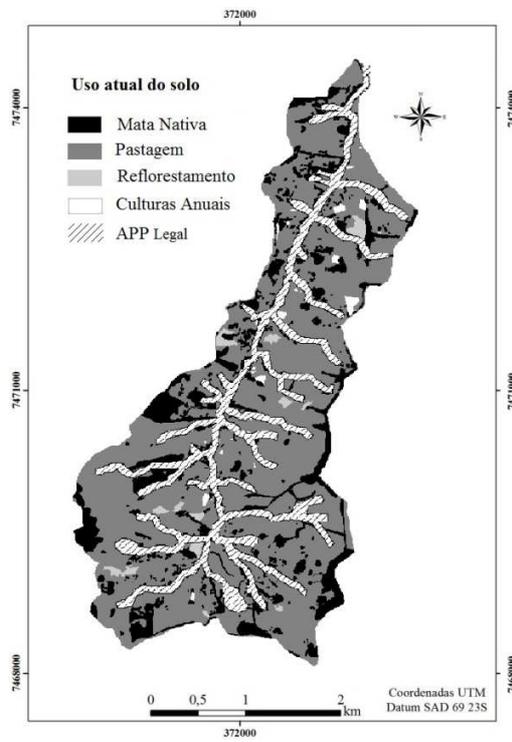


Figura 3 Uso atual do solo na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

Tabela 1 Caracterização dos sistemas nativos de referência demais sistemas avaliados na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

Solo	Uso	Descrição
	MN	Condição original, referencial de sistema em equilíbrio
PVA	EUC	Eucalipto com serrapilheira - 2 anos na amostragem
	P	Ocorrência de pastagem degradada, com ocorrência de erosão
	SPM	Milho pós colheita - palha de milho
	MN	Condição original, referencial de sistema em equilíbrio
CH	EUC	Eucalipto com serrapilheira - 2 anos na amostragem
	P	Ocorrência de pastagem degradada
	MN	Condição original, referencial de sistema em equilíbrio
CX	EUC	Eucalipto com serrapilheira (regeneração)
	P	Ocorrência de pastagem degradada
	SPB	Batata - preparo do solo
	MN	Condição original, referencial de sistema em equilíbrio
RL	P	Ocorrência de pastagem em área de preservação permanente
	MN	Condição original, referencial de sistema em equilíbrio
RY	EUC	Eucalipto com serrapilheira
	P	Ocorrência de pastagem em área de preservação permanente

MN: mata nativa; EUC: povoamento de eucalipto; P: pastagem plantada; SPM: solo coberto com palha de milho; SPB: preparado para plantio de batata PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; CH: Cambissolo Húmico; CX: Cambissolo Háplico; RL: Neossolo Litólico; RY: Neossolo Flúvico.

Anteriormente à coleta das amostras, foi gerada uma malha regular de amostragem do solo contendo 150 pontos, espaçados em até 350 m e distribuídos em uma área de aproximadamente 1.200 ha (Figura 4). É importante salientar que a malha dita “regular”, não foi gerada com pontos equidistantes

entre si, como deveria, devido a problemas de locação. Alguns pontos eram inacessíveis por se situarem em elevadas altitudes e matas densas, por exemplo. Além disso, objetivou-se coletar amostras de maneira representativa para as cinco classes de solos predominantes na sub-bacia e principais usos.

Para o processo de marcação dos pontos foi utilizado o sistema de posicionamento global (GPS). A marcação das coordenadas em cada ponto foi realizada pelo aparelho de GPS GARMIN eTrex Vista. O solo foi coletado em cada ponto de amostragem na profundidade de 0 - 0,20 m. Foram analisados os seguintes atributos químicos do solo: cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis, fósforo (P) e potássio (K) disponível, pH e matéria orgânica (MO). No caso dos atributos físicos, foram considerados: textura, estabilidade de agregados para determinação do diâmetro médio geométrico com (DMG_{cp}) e sem (DMG_{sp}) pré-umedecimento e diâmetro médio ponderado com (DMP_{cp}) e sem (DMP_{sp}) pré-umedecimento; e argila dispersa em água para determinação do índice de floculação (IF).

As análises dos atributos químicos foram realizadas de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997). Os teores de Ca e Mg trocáveis foram extraídos com KCL 1 mol L⁻¹ e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica de chama ar-acetileno. O P disponível foi extraído pela solução Mehlich 1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹). Após a extração de P, ácido ascórbico e molibdato de amônio foram usados para o desenvolvimento da cor, cuja intensidade foi medida por colorímetro. O K trocável foi extraído com HCL 0,05 mol L⁻¹ e determinado por fotometria de chama. O pH foi determinado em água e a MO foi determinada pela oxidação úmida em K₂Cr₂O₇ 0,8 mol L⁻¹. Após oxidação completa, mediu-se a absorbância em colorímetro, a 650 nm (RAIJ et al., 1987).

As análises dos atributos físicos foram realizadas de acordo com o manual proposto pela EMBRAPA (1997). A análise textural foi realizada pelo

método de Bouyoucos. A estabilidade de agregados foi determinada por meio de peneiramento em água com agregados pré-umedecidos lentamente por capilaridade e agregados os quais não foram submetidos a um pré-umedecimento (KEMPER; ROSENAU, 1986). A fração de agregados que passou na peneira de 7,93mm e ficou retida na peneira de 4,76 mm foi separada em classes utilizando-se jogo de peneiras de malhas: 2 mm; 1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,105 mm. Os resultados foram expressos em termos de diâmetro médio geométrico com pré-umedecimento (DMG_{cp}) e sem pré-umedecimento (DMG_{sp}), diâmetro médio ponderado com pré-umedecimento (DMP_{cp}) e sem pré-umedecimento (DMP_{sp}).

O cálculo dos índices de agregação do solo DMP, DMG e índice de estabilidade de agregados (IEA), foram realizados para as cinco classes de solo e usos correspondentes da seguinte maneira:

a) Diâmetro Médio Geométrico (DMG):

$$DMG = 10^x \quad (1)$$

$$X = \left[\frac{\sum (n \log d)}{\sum n} \right] \quad (2)$$

Onde, n: porcentagem dos agregados retidos em uma determinada peneira; d: diâmetro médio de uma determinada faixa de tamanho do agregado (mm).

A densidade do solo, diâmetro médio geométrico dos agregados foram determinados de acordo com o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997).

A avaliação da qualidade do solo foi dada a partir da determinação de um índice denominado índice da qualidade do solo (IQS) foi realizada a partir

do desenvolvimento de um modelo sugerido por Islam e Weil (2000) e aplicado por Araújo et al. (2007). De acordo com Araújo et al. (2007), para aplicação do modelo algumas premissas básicas devem ser assumidas, como: os ecossistemas naturais, caracterizados pelo mínimo de intervenção antrópica e de esperado equilíbrio, foram considerados como referência; as duas categorias de atributos de qualidade do solo (químicos e físicos) contribuem equitativamente para a qualidade do solo, sendo atribuído a cada categoria o mesmo peso ponderado; os indicadores dentro de cada categoria de atributos têm a mesma importância relativa.

Para determinação do índice de qualidade do solo, foram considerados os atributos envolvidos nas principais funções exercidas pelo solo (CARDOSO, 2008):

- a) Atributos relacionados à função de receber, armazenar e suprir água: permeabilidade do solo à água, microporosidade, matéria orgânica do solo, densidade do solo.
- b) Atributos relacionados à função de promover o crescimento de raízes: matéria orgânica do solo, densidade do solo, soma de bases, CTC efetiva e saturação por alumínio.
- c) Atributos relacionados à função de armazenar, suprir e ciclar nutrientes: matéria orgânica, soma de bases, saturação por alumínio e pH.
- d) Atributos relacionados à função de promover a conservação do solo: diâmetro médio geométrico, permeabilidade do solo à água, macroporosidade, porosidade total, matéria orgânica do solo e densidade do solo.

Desta forma, contemplando todas as funções para determinação do IQS, os atributos químicos considerados na determinação do índice de qualidade do solo foram: Ca, Mg, Al, P, K, pH, matéria orgânica do solo (MO), soma de bases (SB) e saturação por alumínio (m). No caso dos atributos físicos, foram considerados: permeabilidade do solo à água, volume total de poros, microporosidade, macroporosidade, densidade do solo e diâmetro médio geométrico (DMG) com pré-umedecimento.

O cálculo do IQS processou-se em duas etapas:

$$Q_A = \left(\frac{\left(\frac{w1-k1}{k1} \right) + \left(\frac{w2-k2}{k2} \right) + \left(\frac{w3-k3}{k3} \right) + \left(\frac{wn-kn}{kn} \right)}{n} \right) \quad (3)$$

$$IQS = 1 - \left(\frac{Q_{aq} + Q_{af}}{2} \right) \quad (4)$$

Onde, Q_A : média dos desvios dos indicadores de cada atributo em relação à referência; w : valor do indicador medido nos sistemas em estudo; k : valor do indicador medido no sistema referência; n : número de indicadores que compõem cada conjunto de atributos; Q_{aq} : média dos desvios dos atributos químicos do solo; Q_{af} : média dos atributos físicos do solo.

Após ser gerado um índice de qualidade do solo por ponto amostrado, determinaram-se os índices de deterioração dos atributos químicos e físicos e o IQS correspondente em relação a cada classe de solo e principais usos correspondentes.

Com o objetivo de se realizar a análise descritiva por classe de solo, o R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006) foi utilizado e forneceu os

momentos estatísticos: média, desvio-padrão, coeficiente de variação e assimetria.

Os parâmetros de ajuste do semivariograma experimental para o índice de qualidade do solo, bem como as análises geoestatísticas foram desenvolvidas com o programa R, no pacote GeoR (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006), sendo realizado pela análise de semivariogramas com base nas pressuposições da hipótese intrínseca, que diz que a relação de dependência espacial é a mesma em qualquer posição de “h” dentro de um determinado alcance da continuidade espacial.

O semivariograma foi estimado pela equação abaixo:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{\sum_{i=1}^{n(h)} [z(xi) - z(xi+h)]^2}{2n(h)} \quad (5)$$

Onde, n(h): número de pares experimentais de dados separados por uma distância h; Z(xi): valor determinado em cada ponto amostrado e Z(xi+h): valor medido num ponto mais distância h.

Para cada atributo do solo foram realizados os cálculos das semivariâncias $\gamma(h)$, em todas as direções atendendo à hipótese de isotropia. Após o ajuste de um modelo matemático realizado “a sentimento” foram definidos os seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0), valor de γ quando h é zero; alcance (a), valor de h quando a semivariância (γ) se estabiliza próximo a um valor constante; (C_1), variância estrutural; e patamar ($C_1 + C_0$), valor da semivariância (γ) quando se obtém um valor constante próximo à variância dos dados.

A razão de dependência espacial entre amostras foi determinada conforme Cambardella et al. (1994):

$$RD = \frac{(C_0)}{(C_0 + C_1)} * 100 \quad (6)$$

Onde, RD: razão de dependência espacial; C_0 : efeito pepita; $(C_0 + C_1)$: patamar.

De posse dos dados necessários para originar a krigagem, os mapas foram construídos utilizando-se também o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006).

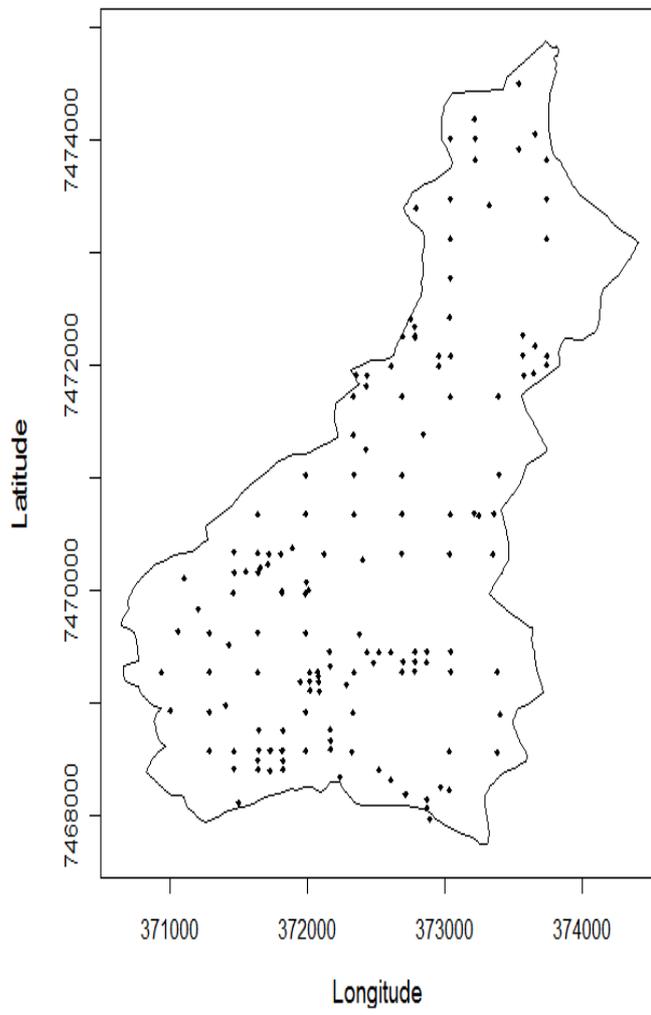


Figura 4 Pontos amostrados na sub-bacia das Poses, Extrema (MG)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da deterioração sofrida pelos atributos químicos e físicos para cada uso em cada classe de solo avaliada e os respectivos índices de qualidade do solo são apresentados na Tabela 2.

Os valores do IQS calculados a partir dos desvios das propriedades do solo dos sistemas de reflorestamento, culturas anuais e pastagens, em relação ao sistema natural de referência (mata nativa), foi influenciados tanto pela substituição da mata nativa por povoamento de eucalipto, quanto por pastagens e culturas anuais refletindo na redução da qualidade do solo na profundidade amostrada nos sistemas avaliados.

Tabela 2 Deterioração dos atributos químicos e físicos em relação aos sistemas nativos de referência e índice de qualidade do solo para diferentes sistemas e uso e manejo do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

Solo	Uso	Deterioração		IQS	
		Físicos	Químicos		
PVA	MN	-	-	1	
	EUC	-0,759	-0,387	0,697	
	P	-0,88	-0,568	0,276	
	SPM	0,248	-0,406	0,821	
CH	MN	-	-	1	
	EUC	-0,065	-0,519	0,708	
	P	-0,201	-0,424	0,688	
CX	MN	-	-	1	
	EUC	0,15	-0,012	1,069	
	P	-0,109	-0,543	0,674	
	SPB	-0,017	0,001	0,992	
RL	MN		-	-	1
	P		-0,298	-0,125	0,888
RY	MN		-	-	1
	EUC		-0,151	0,339	1,094
	P		-0,309	-0,123	0,784

IQS: índice de qualidade do solo; MN: mata nativa; EUC: povoamento de eucalipto; P: pastagem plantada; SPM: solo coberto com palha de milho; SPB: preparado para plantio de batata PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; CH: Cambissolo Húmico; CX: Cambissolo Háplico; RL: Neossolo Litólico; RY: Neossolo Flúvico.

Cardoso et al. (2011) observaram na camada superficial do solo os maiores conteúdos de matéria orgânica, proveniente principalmente da deposição de substrato orgânico na serapilheira; onde o efeito do pisoteio dos animais processou-se mais acentuadamente e onde a atividade da microbiota do solo sobre a decomposição e mineralização da matéria orgânica foi mais intensa.

Portanto, nessa profundidade os atributos químicos, físicos e biológicos foram mais sensíveis às alterações impostas pela ação antrópica.

As alterações nos atributos químicos constituíram em sua maioria por deteriorações em relação ao referencial (Mata Nativa) para todas as classes e usos do solo com exceção dos atributos químicos nos usos cultura anual em área de Cambissolo Háplico e reflorestamento em área de Neossolo Flúvico. O preparo do solo para cultura de batatas envolve a adubação de nutrientes que condiciona melhor fertilidade do solo, neste caso, a qualidade do solo melhorou 0,1% em relação à mata nativa.

A cultura da batata, geralmente, recebe altas doses de fertilizantes e agrotóxicos (REIS JÚNIOR; MONNERAT, 2001). Segundo Pulz (2007), os efeitos da aplicação de fertilizantes para o cultivo de batata estão normalmente associados ao aumento na disponibilidade dos teores de Ca e Mg trocáveis no solo, aumento do pH reduzindo toxidez por alumínio e aumentando a disponibilidade de outros nutrientes. A utilização de fertilizantes no cultivo da batata elevou os teores dos nutrientes.

Ainda considerando o cultivo de batatas em um Cambissolo Háplico, em relação aos atributos físicos do solo, ocorreu uma deterioração de 1,7% em relação à Mata Nativa. Isto ocorreu, possivelmente, devido ao manejo durante a colheita que pode ter configurado alguma desestruturação ao solo. Porém, sob o aspecto ambiental, a melhoria dos atributos químicos e baixa deterioração e consequente elevado IQS (de 0,99), não caracterizam este uso, como adequado.

A produção de batata é considerada um dos sistemas agrícolas mais agressivos ao ambiente e ao homem (FIOREZE, 2006). O cultivo da batata é frequentemente realizado em solo de moderada a alta declividade, o que corresponde à situação ocorrida na sub-bacia das Posses, sendo intensamente preparado e por isso, podendo sofrer perdas de solo por erosão hídrica, compactação do solo, redução nas taxas de infiltração de água e consequente

diminuição na recarga do lençol subterrâneo; danificando o ambiente e até mesmo dificultando a obtenção de elevadas produtividades. A compactação do solo também afeta a cultura da batata, visto que o movimento de água e de ar se torna restrito, sua disponibilidade às plantas fica limitada. As raízes não se desenvolvem e não penetram bem no solo e, assim, ficam localizadas superficialmente, como consequência a planta passa a necessitar de mais energia para o crescimento das raízes e dos tubérculos, o que reduz a energia disponível para o crescimento dos demais órgãos (RAGASSI et al., 2009).

A área com reflorestamento de eucalipto em Neossolo Flúvico apresentou melhoria dos atributos químicos em relação ao referencial (Mata Nativa). A melhoria dos atributos químicos foi de 3,39%. Effgen et al. (2012) observaram variações significativas em relação à capacidade de troca catiônica efetiva (CTC) em solos sob o cultivo de eucalipto. A cultura do eucalipto indicou maiores valores de CTC quando comparada à pastagem independente da posição topográfica. Estudos comprovaram acúmulo de N, P, K, Ca e Mg nas folhas, galhos, cascas, contribuindo assim no aumento da serrapilheira, na ciclagem de nutrientes e de resíduos orgânicos (STAPE et al., 2010).

A serrapilheira acumulada devido ao plantio de eucalipto favorece a melhoria dos atributos químicos. A decomposição da serrapilheira leva de um a três anos. Para produzir 1 tonelada de madeira, a floresta deixa no solo cerca de 0,3 a 0,35 tonelada de serrapilheira (VITAL, 2007).

Em relação aos atributos físicos, ocorreu para o reflorestamento com eucalipto em Neossolo Flúvico uma deterioração de aproximadamente 15%. Considerando-se a estrutura do solo, o eucalipto possui potencial para ser utilizado em recuperação de áreas sem objetivo comercial, contribuindo assim para uma melhoria das propriedades físicas do solo. Quando utilizado para fins comerciais, há possibilidade de compactação após o tráfego de máquinas ou pisoteio animal (SUZUKI et al., 2012). Apesar da deterioração da cultura do

eucalipto representar 15,1%, sendo, dentre as classes de solo avaliadas, para este mesmo uso a maior, esta foi baixa em relação aos demais usos na sub-bacia das Posses para os atributos físicos avaliados. O que pode influenciar na deterioração, principalmente em relação aos atributos físicos, além da classe de solo, é o uso anterior. Sendo assim, o eucalipto nessa região, geralmente é cultivadas em áreas ou já degradadas ou que já tiveram outros usos ou super-utilizadas.

O uso do solo por pastagem, o qual representa mais de 70% da sub-bacia das Posses (LIMA, 2010), foi o uso que apresentou menor IQS quando comparado à mata nativa e aos demais usos em todas as classes de solo avaliadas. Apresentando também maiores deteriorações tanto dos atributos químicos quanto dos atributos físicos.

Nota-se que o menor IQS (0,276) é correspondente ao uso pastagem sob Argissolo Vermelho-Amarelo. Nesta situação, foram encontradas áreas com pastagens degradadas, ou seja, áreas com ocorrência de erosão laminar, em sulco, geralmente em áreas que apresentam relevo ondulado a forte ondulado (LIMA, 2010). Uma das principais causas da degradação das pastagens é a redução da fertilidade do solo, em razão de nutrientes perdidos no processo produtivo (alimentação animal), na erosão, na lixiviação e volatilização (KICHEL; MIRANDA; ZIMMER, 1999). Além disso, um dos principais efeitos provocado pelos animais na pastagem é o da compactação do solo (LIMA et al., 2004), aumentando a densidade do solo e diminuindo a macro e micro porosidade comprometendo o movimento de água no solo e o crescimento das raízes. A redução do espaço poroso é provocada pelo aumento da densidade do solo, que por definição representa a compactação adicional do solo, ou seja, promove degradação da estrutura do solo (DIAS JÚNIOR, 2000).

Os resultados referentes à análise descritiva para os valores de IQS em relação a cada classe de solo são apresentados na Tabela 3.

Os valores de assimetria demonstram distribuições assimétricas para os atributos estudados. O coeficiente de assimetria é mais sensível a valores extremos que a média e desvio padrão já que um único valor pode influenciar fortemente esse coeficiente (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

Apesar de os atributos apresentarem assimetria, nota-se que os dados não apresentam assimetria acentuada, pois apresentam valores de média e mediana, na maioria, próximos aos resultados obtidos em todos os pontos analisados. Atendendo à condição de normalidade, ou seja, os valores não são dominados por valores atípicos de distribuição e são mais adequados para uso da geoestatística (CAMBARDELLA et al., 1994). Isaacs e Srivastava (1989) destacam que apesar de importante, a normalidade não é considerada uma exigência para aplicação da geoestatística, sendo que a ocorrência de média e variabilidade dos dados constantes é mais importante, pois permitem que a krigagem não seja comprometida.

Tabela 3 Parâmetros Estatísticos para o índice de qualidade do solo avaliado em cada classe de solo estudada na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

Variável/Estatística	Solo	Média	Mediana	Desvio padrão	CV (%)	Assimetria
IQS	PVA	0,58	0,51	0,35	60,47	0,61
	CH	0,73	0,71	0,10	14,04	0,67
	CX	0,86	0,84	0,14	16,89	0,41
	RL	1,00	0,99	0,31	31,27	0,05
	RY	1,02	1,00	0,19	18,47	0,30

IQS: índice de qualidade do solo; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; CH: Cambissolo-Húmico; CX: Cambissolo Háplico; RL: Neossolo Litólico; RY: Neossolo Flúvico; CV: coeficiente de variação.

Os parâmetros de ajuste do semivariograma são apresentados na tabela 4. Os resultados da análise geoestatística mostraram que o índice de qualidade do solo apresentou dependência espacial.

O alcance da autocorrelação espacial, ou seja, a distância máxima na qual os atributos estão espacialmente correlacionados (VIEIRA et al., 1983) foi de 870,84 m, o qual corresponde ao raio da área da sub-bacia considerada homogênea para o índice de qualidade do solo. Desta forma, todos os vizinhos situados dentro de um círculo com esse raio pode ser usado para estimar valores para qualquer ponto entre eles (VIEIRA; LOMBARDI NETO, 1995).

A partir da razão de dependência espacial (RD) proposta por Cambardella et al. (1994) classificou-se o índice de qualidade do solo com moderada dependência espacial. Semivariogramas que apresentam razão de dependência (RD) espacial menor ou igual a 25% têm forte dependência espacial. A dependência é moderada quando esta relação variar de 25 a 75% e fraca quando esse valor for superior a 75% de acordo com essa classificação.

Tabela 4 Parâmetros de ajuste do semivariograma experimental para índice de qualidade do solo (IQS) para a sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

Variável	Modelo	C_0	C_1	$C_0 + C_1$	a	RD
IQS	exponencial	0,02	0,03	0,05	870,84	40,00

Onde, IQS: Índice de qualidade do solo; C_0 : efeito pepita; C_1 : Variância estrutural; ($C_0 + C_1$): patamar; a: alcance; RD: razão de dependência espacial.

O IQS foi ajustado ao modelo exponencial. O modelo exponencial, juntamente com o esférico, apresentam-se como modelos mais comuns atribuídos ao comportamento do solo e da planta segundo Alvarenga ET al. (2011), Cambardella et al. (1994) e Trangmar et al. (1985).

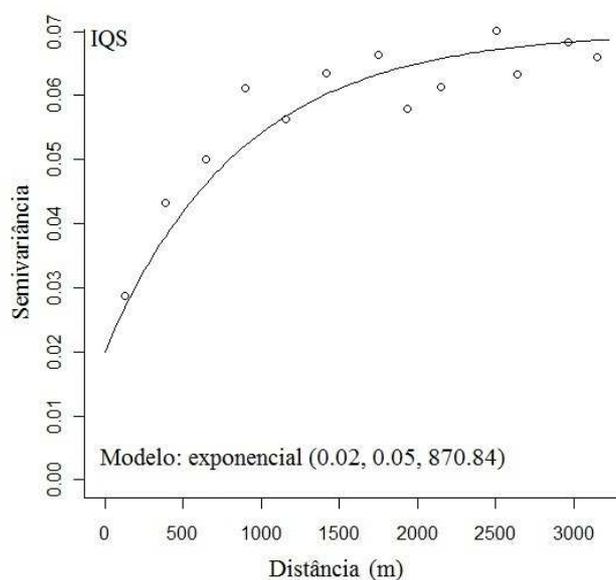


Figura 5 Semivariogramas do índice de qualidade do solo da sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

Por ter sido verificada dependência espacial para o índice de qualidade do solo, foi possível realizar a interpolação de valores em qualquer posição no campo em estudo, elaborando-se os mapas por meio do processo da krigagem ordinária (VIEIRA, 2000). A krigagem é uma técnica de estimação de locais não amostrados, usando propriedades estruturais do semivariograma confeccionados a partir de locais amostrados. Mapas de krigagem podem ser elaborados para aqueles atributos que apresentam dependência espacial e, esta informação é usada para visualizar e melhor entender o padrão de distribuição espacial, além de definir diferentes zonas de manejo em uma determinada área (ÖZGÖZ et al., 2012).

O mapa de distribuição obtido por meio da interpolação dos dados, pelo método da krigagem é fundamental na avaliação da do comportamento do conjunto de atributos físicos e químicos do solo.

A sub-bacia das Posses está localizada em área com remanescentes de Mata Atlântica e está inserida no Sistema Cantareira, sendo de importância capital a avaliação de indicadores de qualidade do solo a fim de e proteger ecossistemas e recuperar áreas que possuem solos com baixos índices de qualidade do solo.

No mapa gerado, pode-se visualizar na área amostrada a distribuição espacial dos índices de qualidade do solo. A distribuição do índice de qualidade do solo na sub-bacia das Posses ocorreu de maneira que, predominaram índices variando de 0,400 a 0,800, ocorrendo algumas áreas pontuais com elevados índices e algumas com índices superiores a 1,00 (mata nativa).

Já os menores valores dos índices de qualidade estão relacionados ao uso do solo por pastagem (Figuras 3 e 6)

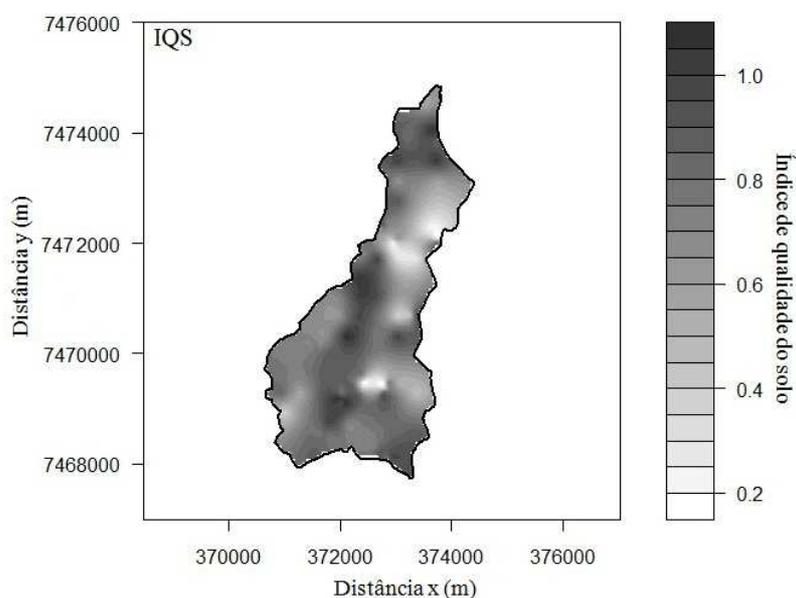


Figura 6 Mapa de distribuição do índice de qualidade do solo na sub-bacia das Posses, Extrema (MG)

O mapa de distribuição apontou áreas na sub-bacia das Posses as quais, devido principalmente ao manejo, apresentam baixo índice de qualidade do solo quando comparados com a mata nativa (referência). Nota-se nas Figuras 6 que, por a sub-bacia das Posses apresentar mais de 70% da área ocupada por pastagem (Figura 3), na mesma predominam índices medianos de qualidade do solo. Este comportamento está relacionado a menores valores obtidos após análise dos atributos físicos e químicos do solo e conseqüentes deteriorações. Sendo, a avaliação de um índice de qualidade do solo levando-se em consideração principalmente as funções: receber, armazenar e suprir água; promover o crescimento de raízes; armazenar, suprir e ciclar nutrientes e promover a conservação do solo (CARDOSO, 2008) uma importante ferramenta para indicar usos corretos para o solo, bem como enfatizar a importância de práticas conservacionistas na área.

4 CONCLUSÕES

A espacialização dos índices de qualidade solo na sub-bacia das Posses possibilitou a identificação de menores valores nos solos sob pastagens.

As áreas sob cultivo de batatas apresentaram IQS próximo ao IQS de Mata Atlântica devido ao manejo da área, o que não caracteriza a mesma como ambiente ideal.

O reflorestamento com eucalipto condiciona solos, em sua maioria, com baixas deteriorações físicas e químicas devido ao acúmulo de serrapilheira.

O modelo pelo qual o IQS se ajustou foi o exponencial possibilitando a krigagem ordinária.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Programa produtor de água superintendência de usos múltiplos**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2008. 60 p.
- ALVARENGA, C. C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1745-1758, set./out. 2011.
- AMUNDSON, R.; JENNY, H. The place of humans in the state factor theory of ecosystems and their soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 151, n. 1, p. 99-109, 1991.
- ANDRÉA, A. F. d' et al. Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos cerrados no sul do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 1047-1054, 2002.
- ARAÚJO, R. et al. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 1099-1108, set./out. 2007.
- BERG, M. V. D.; KLAMT, E. Variabilidade espacial de características de solo na região do Planalto Médio, RS: I., análise de variância por amostragem aninhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 393-399, set./out. 1997.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Levantamento da cobertura vegetal nativa do bioma Mata Atlântica**. Rio de Janeiro, 2007. 84 p.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 1, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.

CARDOSO, E. L. **Qualidade do solo em sistemas de pastagens cultivada e nativa na sub-região da Nhecolândia, Pantanal Sul Mato-Grossense**. 2008. 155 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

CARDOSO, E. L. et al. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens do pantanal sul-Matogrossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 612-622, mar./abr. 2011.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, n. 5, p. 777-788, set./out. 2005.

COUTO, E. G.; KLAMT, E.; STEIN, A. Estimativa do teor de argila e de potássio trocável em solo esparsamente amostrado no sul do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 1, p. 129-140, out. 2000.

DIAS JÚNIOR, M. de S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: UFV, 2000. p. 55-94.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (SSSA Special Publication, 35).

_____. Quantitative indications of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 25-37. (SSSA Special Publication, 49).

EFFGEN, E. M. et al. Atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo distrófico sob cultivo de eucalipto e pastagem no sul do Espírito Santo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 375-381, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura; EMBRAPA/CNPS, 1997. 212 p.

FIGUEIREDO, C. Fontes orgânicas de nutrientes em sistemas de produção de batata. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1788-1793, nov./dez. 2006.

FREITAS, D. A. F. et al. Índice de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 417-428, 2012.

HUSSAIN, I. et al. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 50, n. 1, p. 237-249, May 1999.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 51 p.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ames, v. 55, n. 1, p. 69-79, 2000.

KARLEN, D. L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 53-72. (SSSA Special Publication, 35).

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis, part 1: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: ASA, 1986. p. 425-441.

KICHELO, A. N.; MIRANDA, C. H. B.; ZIMMER, A. H. Degradação de pastagens e produção de bovinos de corte com a integração agricultura x pecuária. In: SIMPOSIO DE PRODUÇÃO DE GADO DE CORTE, 1., 1999, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: UFV, 1999. p. 201-234.

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

LIMA, C. L. R. et al. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 945-951, jan./fev. 2004.

LIMA, G. C. **Avaliação de atributos indicadores da qualidade do solo em relação à recarga de água na sub-bacia das Posses, Extrema, MG**. 2010. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

NEVES, C. M. N. N. et al. Atributos indicadores da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no noroeste do estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 74, p. 45-53, 2007.

NOVAES FILHO, J. P. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia Meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p. 91-100, nov. 2007.

ÖZGÖZ, E. et al. Effect of management on spatial and temporal distribution of soil physical properties. **Journal of Agricultural Sciences**, Cambridge, v. 18, n. 1, p. 70-91, Apr. 2012.

PULZ, A. L. **Estresse hídrico e adubação silicatada em batata (*Solanum tuberosum* L.) cv. BINTJE**. 2007. 57 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal, 2007.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2006. Software.

RAGASSI, C. F. et al. Efeito da descompactação profunda de solo na produção da cultura da batata. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 4, p. 484-489, out./dez. 2009.

RAIJ, B. V. et al. **Análise química de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

REIS JÚNIOR, R. A.; MONNERAT, P. H. Exportação de nutrientes nos tubérculos de batata em função de doses de sulfato de potássio. **Revista Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 360-364, 2001.

SILVA, M. A. et al. Sistema de informações geográficas no planejamento de uso do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, 2013. No prelo.

STAPE, J. L. et al. The Brazil eucalyptus potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1684-1694, 2010.

SUZUKI, L. E. et al. Caracterização do uso e manejo do solo de pequenas propriedades agrícolas da bacia do Rio Dourado, município de Erechim, Rio Grande do Sul. In: CONGRESO EN CO-INNOVACIÓN DE SISTEMAS SOSTENIBLES DE SUSTENTO RURAL, 1., 2012, Lavallega. **Anales...** Lavallega: CCSSSR, 2012. 1 CD-ROM.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo. In: ALVAREZ, V. V. H. et al. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 195-276.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, P. F.; ALVARES, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

VIEIRA, S. R. et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 54, p. 405-412, 1995.

VITAL, M. H. F. Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 28, p. 235-276, 2007.