

**ESCOAMENTO DE NASCENTES ASSOCIADO À
VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS
FÍSICOS E USO DO SOLO EM UMA BACIA
HIDROGRÁFICA DE CABECEIRA DO RIO
GRANDE - MG**

JOSÉ ALVES JUNQUEIRA JÚNIOR

2006

JOSÉ ALVES JUNQUEIRA JÚNIOR

**ESCOAMENTO DE NASCENTES ASSOCIADO À VARIABILIDADE
ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E USO DO SOLO EM UMA
BACIA HIDROGRÁFICA DE CABECEIRA DO RIO GRANDE - MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras
como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e
Drenagem, para a obtenção do título de "Mestre".

Orientadores

Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello

**LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2006**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Junqueira Júnior, José Alves.

Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande, MG / José Alves Junqueira Júnior. -- Lavras: UFLA, 2006. 84 p. : il.

Orientadores: Antônio Marciano da Silva e Carlos Rogério de Mello
Dissertação (Mestrado) –UFLA.
Bibliografia.

1. Bacia hidrográfica. 2. Nascente. 3. Variabilidade espacial. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD- 551.48

JOSÉ ALVES JUNQUEIRA JÚNIOR

**ESCOAMENTO DE NASCENTES ASSOCIADO À VARIABILIDADE
ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS E USO DO SOLO EM UMA
BACIA HIDROGRÁFICA DE CABECEIRA DO RIO GRANDE - MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras
como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e
Drenagem, para a obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 10 de agosto de 2006

Prof. Dr. José Maria de Lima

DCS/UFLA.

Pesq. Dr. Gilberto Coelho

DEG/UFLA.

Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello

Orientadores

**LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL**

Aos meus filhos Pedro e Ranielly,
Aos quais desejo uma vida mais justa

OFEREÇO

Aos meus pais
José Alves Junqueira & Zélia de Souza Junqueira,
Aos irmãos
Betinha, Déte, Valdir, Dôra, Glorinha, Lele, Marlene, Eduardo & Eliane,
A minha esposa Karla,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Lavras, pela estrutura oferecida, a CEMIG/ANEEL, (projeto P&D 076) à FAPEMIG (projeto CAG 117/03) e CNPq (projeto 472453/20041) pelos recursos disponibilizados, à CAPES e CNPq-CT/HIDRO pela concessão da bolsa de estudo.

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

Primeiro a Deus, pela dádiva da minha vida.

Aos Professores Antônio Marciano da Silva e Carlos Rogério de Mello pela orientação, amizade e confiança.

Aos amigos Gilberto, Renato, Hugo, Sato e Carlinhos, pela amizade e convivência nos tempos de iniciação científica na Fazenda Muquém.

Aos amigos Natalino, Daniel Brasil, Viola, Célio, Marcos Paulo, Piu, Anderson, Natan e a memória do amigo Ralph, que prestaram grande contribuição para a realização dos testes de campo.

Aos funcionários Neném, 'Seu Berg' e José Luís, pela amizade e convivência desde a graduação.

Aos proprietários das áreas da Bacia Hidrográfica da Lavrinhas e em especial à RPPN "Ave Lavrinhas" onde nos hospedamos por várias semanas durante as campanhas de campo e ao Sr. Vicente (caseiro), pela confiança, amizade e ajuda.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADO!

SUMÁRIO

	Página
GENERAL ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	2
2.1 Nascentes.....	2
2.2 Atributos físicos e físico-hídricos do solo	4
2.2.1 Porosidade drenável.....	5
2.2.2 Textura.....	6
2.2.3 Densidade do solo (Ds).....	6
2.2.4 Condutividade hidráulica do solo saturado (k_o).....	7
2.2.5 Matéria Orgânica (MO)	8
2.2.6 Capacidade total de armazenamento de água no solo (CTA)	9
2.2.7 Volume total de poros (VTP).....	10
2.3 Geoestatística aplicada ao mapeamento de atributos físico-hídricos do solo.	11
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Localização da área de estudo	14
3.2 Clima	14
3.3 Caracterização físico-hídrica do solo	14
3.3.1 Densidade do solo (Ds).....	14
3.3.2 Densidade de partículas (Dp).....	15
3.3.3 Textura.....	15
3.3.4 Porosidade total calculada (VTP)	15
3.3.5 Matéria Orgânica (MO)	16
3.3.6 Condutividade hidráulica do solo saturado (k_o).....	16
3.3.7 Umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto	

de murcha permanente (θ_{pmp}).....	17
3.3.8 Porosidade drenável (μ).....	17
3.3.9 Capacidade total de armazenamento de água no solo (CTA).....	17
3.4 Análise espacial dos atributos do solo.....	18
3.5 Unidades pedológicas presentes na sub-bacia.....	19
3.6 Uso atual do solo.....	21
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22
CAPÍTULO 2.....	28
1 RESUMO.....	28
2 ABSTRACT.....	29
3 INTRODUÇÃO.....	30
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1 Plano Amostral.....	31
4.2 Estudo da continuidade espacial.....	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1 Análise exploratória e ajuste de semivariogramas aos atributos físico-hídricos do solo.....	35
5.2 Análise exploratória e ajuste de semivariogramas aos atributos físicos do solo.....	47
6 CONCLUSÕES.....	61
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
CAPÍTULO 3.....	65
1 RESUMO.....	65
2 ABSTRACT.....	66
3 INTRODUÇÃO.....	67
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	68
4.1 Medição de vazão.....	68
4.2 Quantificação das áreas de recarga das nascentes.....	69

4.3 Quantificação da precipitação	69
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
5.1 Uso atual dos solos da sub-bacia	69
5.2.1 Uso do solo das áreas de recarga das nascentes.....	71
5.2.2 Variabilidade espacial do solo nas áreas de recarga das nascentes.....	73
5.2.3 Rendimento específico das nascentes	78
6 CONCLUSÕES	83
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

“a”	Alcance do semivariograma (m)
CA	Coefficiente de assimetria
ADA	Argila dispersa em água
Bi	Horizonte ‘B’ incipiente
C ₀	Efeito pepita
C ₀ +C	Patamar
C.V.	Coefficiente de variação
Cwb	Classificação climática de Köpen
CTA	Capacidade total de armazenamento de água no solo (mm)
Dp	Densidade de partícula (g cm ⁻³)
Ds	Densidade de solo (g cm ⁻³)
GD	Grau de dependência espacial
geoR	Programa geoestatístico em linguagem R
k _o	Condutividade hidráulica do solo saturado (m dia ⁻¹)
MO	Matéria orgânica (%)
MQP	Mínimos quadrados ponderados
MV	Máxima verossimilhança
\sum QME	Somatório do quadrado médio do erro
UTM	Coordenada Universal Transversa de Mercator
VTP	Volume total de poros (cm ³ cm ⁻³)
P	Teste de normalidade de Shapiro-Wilk
θ_{cc}	Umidade volumétrica na capacidade de campo (cm ³ cm ⁻³)
θ_{pmp}	Umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (cm ³ cm ⁻³)
μ	Porosidade drenável (%)
H	Vetor distância (m)

RESUMO GERAL

JUNQUEIRA JÚNIOR, José Alves. **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande – MG.** 2006, 86p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG¹

A distribuição espacial dos atributos do solo é de suma importância no contexto da dinâmica da água em áreas de recarga de aquíferos. No entanto, o mapeamento destes atributos não pode apresentar-se com tendências, como acontece com aqueles produzidos por processos puramente geométricos. Este trabalho visa estudar a variabilidade espacial de alguns atributos do solo e suas implicações no escoamento base de nascentes numa sub-bacia hidrográfica de cabeceira representativa da Serra da Mantiqueira, região Alto Rio Grande – MG. A área de estudo apresenta-se com 687ha compreendendo a sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinhas o qual é afluente do Rio Grande. As amostras para a caracterização físico-hídrica do solo foram coletadas na camada de 0 a 0,15m de profundidade em 198 pontos. Aos dados foram ajustados semivariogramas esférico, exponencial e gaussiano pelas metodologias dos mínimos quadrados ponderados e máxima verossimilhança. A validação cruzada precedeu-se a krigagem dos atributos, para a seleção do melhor modelo. O mapa de uso atual do solo foi gerado a partir da interpretação visual de imagem de satélite Landsat de outubro de 2005, as vazões das nascentes foram determinadas pelos métodos direto ou indireto e os limites de suas áreas de recarga com aparelho GPS. Foram selecionadas duas nascentes em condições distintas de ocupação do solo, mas sob domínio da mesma unidade pedológica. Todos os atributos avaliados apresentaram-se estruturados espacialmente. A maioria dos atributos apresentou melhores ajustes pela metodologia dos mínimos quadrados ponderados, não havendo predominância de nenhum modelo específico de semivariograma para os atributos avaliados. As maiores vazões específicas encontradas ao longo do monitoramento foram da nascente sob mata nativa. Práticas que levam à diminuição da infiltração da água no solo, ou, ao aumento do escoamento superficial, podem diminuir a vazão das nascentes comprometendo a existência das mesmas.

¹ Comitê orientador: Antônio Marciano da Silva e Carlos Rogério de Mello – DEG/UFLA - Orientadores.

GENERAL ABSTRACT

JUNQUEIRA JUNIOR, José Alves. **Flow base springs related to spatial variability of soil physical attributes and soil agricultural use in the headwater watershed of Alto Rio Grande Region, MG.** 2006. 87p. Thesis (Master degree in Agricultural Engineering - Irrigation and Drainage), Federal University of Lavras, MG².

Spatial soil attributes distribution in watershed is of the great importance for water dynamics studies, especially, in springs recharge areas. However, the mapping of these attributes cannot be presented with trends, as it happens with those produced by essential geometric processes interpolation. The purposes of this work is to study the spatial variability of soil attributes and its relationship with springs flow base behavior of a headwater watershed enclosed to Mantiqueira Mountains, Alto Rio Grande region, MG state, Brazil. This study was carried out in Lavrinhas watershed which presents 687 ha of area and it flows towards to Rio Grande River. Soil physical-hydric characterization was determined collecting samples in layer of 0 – 0,15m in 198 points. Spherical, exponential and gaussian semi-variograms models were adjusted to the data, applying Minimum Weighted Square (MQP) and Maximum Likelihood (MV) methodologies. Cross validation was applied for selection the best adjusted model. Current map soil use was generated from visual interpretation of Landsat satellite image of October 2005, flow base springs was monitored by direct and/or indirect method (flume) and borders of its recharge areas with GPS device. Two springs in different agricultural soil use in same pedological soil unit had been selected. All soil attributes evaluated had been presented spatial continuity. Great part of soil attributes had been presented better adjustments by MQP methodology, not having predominance of a specific semi-variogram model. Flow base was more significant for spring under native forest. Soil management practices which lead to reduction of soil water infiltration and to increase the surface runoff can to compromise the perennial flow in that conservation units.

² Guindace Committee: Antônio Marciano da Silva and Carlos Rogério de Mello– DEG/UFLA.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

Poucos ecossistemas no Brasil apresentam uma situação de degradação semelhante à que ocorre na extensa formação conhecida como Mata Atlântica. Ao longo da Serra da Mantiqueira esta vem sendo submetida à pressão de fatores físicos e ambientais determinados pela orientação de encostas e histórico de ocupação do solo.

A ocupação do solo nesta região tem influenciado diretamente a produção de água. O reflexo desta influência na quantidade e qualidade de água das nascentes, assim como, no curso anual de sua vazão, está diretamente relacionado à declividade do terreno, uso e ocupação do solo, além de seus atributos físico-hídricos.

As atividades antrópicas em bacias hidrográficas, principalmente nas áreas de recarga das nascentes, contribuem para o rompimento do equilíbrio, proporcionando especialmente, diminuição da quantidade de água. O uso do solo com pastagem tem alterado a paisagem na região da Serra da Mantiqueira, expondo o solo aos agentes erosivos, modificando as condições de infiltração, propiciando perda de água e de solo pelo escoamento superficial direto, comprometendo a recarga dos aquíferos e produzindo assoreamento de cursos d'água nas partes mais baixas.

A análise geoestatística é utilizada para detecção de variabilidade espacial do objeto de estudo em um campo amostral. A variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo vem sendo intensamente estudada por esta ferramenta, visando melhor analisar seu comportamento e sua distribuição no espaço. De acordo com Gomes (2005), a Krigagem, interpolador geoestatístico, é uma importante ferramenta para o mapeamento dos atributos do solo, sendo

fundamental no auxílio à tomada de decisões no que concerne ao uso, conservação e manutenção da qualidade dos recursos presentes em bacias hidrográficas. Segundo Lima et al. (1999), os atributos físicos do solo não são distribuídos espacialmente de modo desordenado, apresentando estrutura de correlação espacial.

O manejo adequado de bacias hidrográficas, notadamente em regiões ambientalmente frágeis, como a Serra da Mantiqueira, é de importância capital para a manutenção do escoamento subterrâneo da mesma, sendo este fundamental na perenização dos cursos d'água, cuja existência é função de condições satisfatórias de recarga dos aquíferos superficiais (sob pressão atmosférica) e por consequência, produção de água nas nascentes.

Neste contexto, neste trabalho objetivou-se monitorar a vazão em nascentes da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinhas, Serra da Mantiqueira, mapear a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo nesta sub-bacia e associar a produção de água das mesmas ao uso atual do solo nas áreas de recarga de duas nascentes representativas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Nascentes

De acordo com Pinto (2003), nascentes são pontos iniciais dos cursos d'água formadores dos pequenos e grandes rios. Também são conhecidas como minas, fio d'água, olho d'água e fontes, sendo caracterizadas como os pontos nos quais a água subterrânea aflora naturalmente através da superfície do solo, mesmo que de forma intermitente.

Segundo Alvarenga (2004), a maioria das nascentes está localizada nas regiões montanhosas, nas chamadas bacias de cabeceira. A água que jorra de uma nascente formará um pequeno ribeirão que irá contribuir para o volume de

água de outro curso e, assim, sucessivamente, formando grandes cursos d'água, fundamentais para o abastecimento urbano, agrícola, geração de energia, dentre outras funções. Portanto o desaparecimento de uma nascente resultará na redução do número de cursos d'água, significando a diminuição da disponibilidade de água para os diversos usos (Castro, 2001). Este mesmo pesquisador relata que as nascentes podem ser classificadas quanto à periodicidade na produção de água, em perenes, para aquelas que apresentam um fluxo de água contínuo, até mesmo na estação seca; intermitentes para aquelas que apresentam produção de água principalmente na estação das chuvas, e efêmeras para aquelas que apresentam fluxo apenas durante ou logo após uma determinada chuva. A perenidade de uma nascente é resultante da manutenção do nível do aquífero e de sua recarga subterrânea, e, quando suas áreas de acumulação sofrerem intervenções de impacto, a qualidade e a quantidade de água podem ficar comprometidas (Pinto, 2003).

Segundo Davide (2002), as nascentes podem ser classificadas quanto ao tipo de reservatório a que estão associadas, podendo ser classificadas em pontuais ou difusas. As nascentes pontuais são aquelas que apresentam a ocorrência do afloramento de água em um único ponto do terreno, sendo caracterizado pelo encontro da superfície do solo com sua camada impermeável, localizadas geralmente em grotas e em regiões montanhosas. As nascentes difusas são caracterizadas por não apresentarem um ponto bem definido da ocorrência de seu afloramento, geralmente encontradas em brejos, voçorocas e matas localizadas na parte baixa do terreno.

Uma outra classificação de nascentes, diz respeito às características do aquífero. Neste caso existem nascentes muito susceptíveis ao ciclo hidrológico, com grande variabilidade temporal das vazões ao longo do ano, onde os aquíferos são considerados superficiais, sob influência da pressão atmosférica. Nestas nascentes, verifica-se a existência de água sob temperatura ambiente e

com baixa concentração de sais e outros elementos químicos, sendo, no entanto passíveis de contaminação biológica. É este tipo de nascente que será abordado neste trabalho, pois são encontradas com maior frequência na paisagem.

Existem também nascentes cujo aquífero é dito confinado, sob pressão maior que a atmosférica. Nesta situação, não há variação significativa da vazão ao longo do ano, as águas são normalmente mais quentes e apresentam elevado teor de sais. Estas nascentes são mais raras e não fazem parte deste estudo.

2.2 Atributos físicos e físico-hídricos do solo

O solo é um corpo natural complexo e dinâmico resultante da atuação conjunta de muitos fatores de formação como clima, organismos vivos, material de origem, relevo e tempo. Os atributos físicos e físico-hídricos do solo variam de um lugar para outro, apresentando continuidade espacial, dependendo do manejo adotado e das próprias características de origem do solo (Grego et al, 2005). O manejo do solo afeta diretamente o equilíbrio das condições de infiltração de água (Souza et al., 2004). Para Bertol et al. (2000), os atributos físicos do solo precisam ser monitorados, pois o uso intensivo deste recurso pode provocar mudanças indesejáveis no seu comportamento físico-hídrico.

A degradação dos atributos físicos do solo é um dos principais processos responsáveis pela perda da qualidade estrutural e aumento da erosão hídrica (Bertol et al., 2001). Algumas práticas de manejo do solo provocam alterações nesses atributos, principalmente a estrutura, podendo tais alterações ser permanentes ou temporárias. De acordo com Camargo & Alleoni (1997), as principais alterações são evidenciadas por aumento da densidade do solo (Ds), redução do teor de matéria orgânica (MO), diminuição da porosidade (VTP), tamanho de agregados, taxa de infiltração de água e resistência à penetração das raízes.

Bertol et al. (1995), estudando alterações em atributos físico-hídricos do solo, relatam que, em geral solos intensamente cultivados apresentam camadas compactadas, com redução do volume de macroporos e aumento de microporos, determinando uma diminuição do volume de poros ocupados por ar e um aumento da retenção de água. Em decorrência disso, observa-se uma diminuição da taxa de infiltração de água no solo, com conseqüente aumento das taxas de escoamento superficial e de erosão hídrica (Schick et al. 2000). A redução da taxa de infiltração de água no solo é a propriedade que melhor reflete o grau de degradação do sistema poroso do solo. A seguir apresenta-se um breve relato sobre alguns atributos do solo fundamentais para o manejo em bacias hidrográficas.

2.2.1 Porosidade drenável

Mello et al. (2002), relatam que um dos atributos físico-hídricos importantes para o manejo e estudo de fluxos hidráulicos no solo é a porosidade drenável, sendo vital na modelagem da contaminação do aquífero e na drenagem propriamente dita. Este atributo é também conhecido como porosidade efetiva, e define-se como a fração da porosidade total na qual a água move-se livremente, equivalendo ao conteúdo de ar presente no solo na capacidade de campo (Queiroz, 1995).

Queiroz et al. (1999), estudando a variabilidade espacial da porosidade drenável em um solo de várzea, relata que este atributo apresenta distribuição normal com fraca estrutura de dependência espacial, com alcance médio de 23 m. A dependência espacial encontrada pelo mesmo autor mostra que a porosidade drenável, embora tenha apresentado grande aleatoriedade, não pode ser tratada como aleatória, uma vez que já foi constatada continuidade espacial da mesma, com grau de dependência variando de forte a moderado (Gomes, 2005).

2.2.2 Textura

Conforme Libardi et al. (1986), a fração textural constitui elemento fundamental para identificação e classificação de um solo, pois é um atributo que apresenta características físicas estáveis, sendo pouco dependente do uso e manejo do solo. Sua variação é proveniente da própria formação do solo e modifica-se pouco por ação do intemperismo ao longo do tempo.

De acordo com Libardi et al. (1986), a classe textural de um solo pode ser indicativa do seu potencial de uso, pois, de maneira geral, solos argilosos apresentam elevada capacidade de troca catiônica (CTC), o que é garantia de bom suprimento nutricional às plantas e também elevada microporosidade, o que ajuda a aumentar a capacidade de retenção e armazenamento de água. Isto significa que os solos argilosos levarão mais tempo para esgotar a quantidade de água armazenada do que os arenosos, oferecendo boas condições de suprimento hídrico às plantas. No entanto, podem apresentar baixa porosidade drenável e baixa macroporosidade, dificultando a aeração e o fluxo em direção dos aquíferos.

2.2.3 Densidade do solo (Ds)

A maioria das culturas é seriamente afetada em solos cuja densidade seja maior do que $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$, essencialmente por duas razões: falta de O_2 para a respiração das raízes devido à baixa porosidade e má drenagem; além disso, o impedimento mecânico para o crescimento das raízes limita a zona de absorção de água e nutrientes, (Fernandez, 1987).

A densidade é um importante atributo no estudo dos fluxos hidráulicos, fornecendo informações indiretas sobre estrutura, porosidade, armazenamento e condução de água. Segundo Reichardt (2004), este atributo varia de acordo com o volume total de poros, portanto representa um índice do grau de compactação

do solo. A densidade é muito usada na avaliação do estado estrutural do solo (Scapini et al., 1998).

Gomes (2005), em estudo realizado em sub-bacia hidrográfica no Alto Rio Grande, observou grande variabilidade para este atributo, com menores valores em glebas cultivadas com lavouras e eucaliptal, sendo o contrário constatado nas glebas ocupadas com pastagens. A presença de maior densidade do solo nas regiões de recarga de nascentes é indicativo 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 d'água, aumenta a resistência mecânica à penetração radicular e reduz a aeração e a disponibilidade de água às plantas (Camargo & Alleoni, 1997).

2.2.4 Condutividade hidráulica do solo saturado (k_s)

Alguns estudos sobre variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo de parcelas agrícolas ou de vertentes de bacias hidrográficas (Lima et al. 1999; Grego et al. 2005; Gomes 2005), indicam que os solos, mesmo de aparência homogênea, apresentam considerável variabilidade. A consequência dessa variabilidade sobre a resposta hidrológica de uma sub-bacia ainda não está bem entendida. No entanto, a condutividade poder ser considerada como um dos mais importantes atributos relativos ao manejo da água no solo e de suma importância na recarga dos aquíferos.

Farias (1999) relata que a condutividade hidráulica não apresenta estrutura de dependência espacial definida. Para Macedo et al. (1998), este é um atributo de alta variação, apresentando C.V. superior a 40%. Os mesmos autores relatam que esta variabilidade pode estar associada aos procedimentos e métodos de sua obtenção. Kamara & Rao (1985) afirmam que os métodos de campo fornecem resultados com variações menores do que os métodos de laboratório.

Eguchi (2002) cita que o permeâmetro de Ghelph mostra ser mais versátil e preciso, podendo representar as reais características da condutividade hidráulica. O Permeâmetro de Guelph é um permeâmetro de furo e de carga hidráulica constante que mede a condutividade hidráulica do solo saturado em condições de campo acima do aquífero. Segundo Reynolds et al. (1983), este aparelho foi visto como uma nova tentativa para o uso de permeâmetros de furo, já que por muitos anos este método não foi utilizado, pois subestimava em até 60% o valor da condutividade hidráulica. Algumas das vantagens deste método de campo são: a leveza do aparelho, a facilidade de operação por uma única pessoa, a rapidez e a pouca quantidade de água por ensaio (Aguiar, 2001). Após algum tempo, que dependerá, dentre outros fatores, da umidade antecedente do solo e da sua textura, uma pequena área em torno do furo estará saturada e, então, o fluxo torna-se constante, sendo este valor o utilizado no cálculo da permeabilidade. Na realidade, durante o ensaio, não é conseguida a saturação total, e sim uma “saturação de campo”, pois no campo não se consegue expulsar completamente o ar dos vazios do solo. Isto não chega a ser uma desvantagem visto que a saturação total é muito difícil de ser atingida em uma situação real (Aguiar 2001).

2.2.5 Matéria Orgânica (MO)

Moraes et al. (2003), relatam que a presença da matéria orgânica no solo reduz a compactação e erosão hídrica, pois atenua o impacto das gotas de chuva e o salpicamento do solo. O aumento de sua quantidade no 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), trabalhando com Cambissolo Álico sob mata nativa em Santa Catarina, mostraram que, com o aumento do teor de MO, há uma

diminuição da densidade do solo e aumento da porosidade e, conseqüentemente, maior capacidade de infiltração de água no solo.

O teor de matéria orgânica sofre influência direta do tipo de manejo empregado no uso e ocupação das terras além da declividade do terreno. Segundo Souza et al. (2004), pequenas variações no gradiente do declive e nas formas de relevo condicionam variabilidade espacial diferenciada em relação ao teor de MO. Os mesmos autores relatam que nas áreas onde o relevo apresenta formas lineares, o teor de MO é menor além de menor variabilidade espacial; já em áreas com curvaturas côncavas e convexas a variação espacial é relativamente maior.

A variabilidade espacial do teor de MO, no contexto de bacias hidrográficas, foi estudada por Gomes (2005), que relatou que este atributo do solo apresentou considerável estrutura de dependência espacial.

2.2.6 Capacidade total de armazenamento de água no solo (CTA)

A água é dinâmica no solo, movimentando-se em função do gradiente de seu potencial entre dois pontos quaisquer no solo. De acordo com Bernardo (2005), a água disponível para as plantas, classicamente definida como uma característica estática representa a quantidade de água que um solo poderia reter ou armazenar entre a umidade na capacidade de campo e a umidade no ponto de murcha permanente. Esse conceito pressupõe que a água do solo, entre as umidades correspondentes a saturação e capacidade de campo não é disponível para as plantas, perdendo-se nas partes mais profundas do perfil do solo, por ação da gravidade, alimentando os aquíferos.

A disponibilidade total de água no solo foi estudada por Miranda et al. (2001) em um solo de textura fina. Segundo os pesquisadores, os valores de disponibilidade situam-se entre 1,2 e 2,4 mm cm⁻¹. Já para Gomes (2005), trabalhando em sub-bacia com predominância de Latossolos, os valores ficaram entre 1,4 e 1,9 mm cm⁻¹.

Souza et al. (1999) relatam que os valores de capacidade de campo e ponto de murcha permanente possuem magnitude de variabilidade semelhante. Já a CTA, apesar de derivada das anteriores, possui variabilidade ligeiramente maior. Este fato também foi comprovado por Moraes et al. (1993), os quais afirmaram que nem sempre uma variável obtida de forma algébrica possui o mesmo comportamento das variáveis que lhe deram origem.

Grego et al. (2005) estudando as propriedades físicas do solo em uma parcela experimental, observaram correlação positiva entre a retenção de água e a densidade do solo (Ds). Apesar de não estudar a variabilidade espacial, Beutler et al. (2002) também encontraram correlação positiva para CTA e Ds. Estes estudos demonstram a inter-relação entre estes atributos físico-hídricos do solo, sendo importantes no contexto de recarga dos aquíferos.

2.2.7 Volume total de poros (VTP)

O espaço poroso do solo é a fração volumétrica ocupada com ar e água, representando o local onde circulam a solução (água e nutrientes) e o ar, sendo, portanto, o espaço em que ocorrem os processos dinâmicos da solução do solo (Hillel, 1971). A distribuição do diâmetro dos poros no solo tem um papel preponderante em seu comportamento físico-hídrico. A porosidade do solo está relacionada com sua textura, estrutura e teor de matéria orgânica. Solos de textura fina possuem maior VTP e seu alto volume de microporos confere boa retenção de água e menor drenagem. Apesar de um solo arenoso apresentar porosidade total relativamente reduzida, a movimentação da água e do ar é mais rápida devido ao predomínio de macroporos, permitindo maior movimento da água e do ar (Buckman & Brady, 1989).

2.3 Geoestatística aplicada ao mapeamento de atributos físico-hídricos do solo.

A geoestatística é definida como sendo a aplicação da teoria das funções aleatórias para o reconhecimento e estimação de fenômenos naturais (Journel & Huijbregts, 1991), ou o estudo das variáveis numéricas distribuídas no espaço.

No campo da física do solo é comum encontrar variáveis distribuídas espacialmente. Para o estudo destas variáveis são usados diversos procedimentos geostatísticos de estimação e simulação, a partir de um conjunto de amostras localizadas no domínio espacial em que o fenômeno se manifesta em condições consideradas representativas de sua realidade. Estes procedimentos permitem a descrição e caracterização das variáveis estudadas, primeiro, proporcionando valores estimados em locais de interesse e segundo, gerando mapas de superfície ou isolinhas para uma melhor visualização do fenômeno.

Segundo Trangmar et al. (1985), Fietz (1998) e Gonçalves (1997), a estatística clássica assume que a variabilidade de um atributo do solo em torno da média é aleatória e independente da posição espacial dos valores amostrais. No entanto, Souza et al. (2006) mostraram que a variabilidade de atributos do solo é espacialmente dependente, ou seja, dentro de certo domínio, as diferenças entre os valores de um atributo do solo podem ser expressas em função da distância de separação entre as observações medidas. Conseqüentemente, os valores em locais mais próximos entre si são mais semelhantes, até um determinado limite, que aqueles tomados a maiores distâncias. Caso isto ocorra, os dados não podem ser tratados como independentes e um tratamento estatístico mais adequado será necessário (Eguchi, 2002).

O emprego da geoestatística com o objetivo de identificar e avaliar a estrutura espacial de variáveis introduz uma nova e importante dimensão para análise da interação entre atributos físicos do solo. As ferramentas da geoestatística permitem a análise de dependência espacial, a partir do ajuste de

semivariogramas experimentais a uma função simples, segundo um modelo matemático, e a caracterização da variabilidade espacial, por meio do mapeamento da variabilidade a partir da estimativa, sem tendenciosidade, de dados para locais não amostrados. Com a utilização destas ferramentas pode-se analisar adequadamente dados de experimentos, com a possibilidade de obter informações não reveladas pela estatística clássica (Salviano, 1996). Segundo Folegatti (1996), para o ajuste de semivariogramas, a normalidade dos dados não é necessária, mas desejável. Caso a distribuição não seja normal, mas seja razoavelmente simétrica, podem-se admitir as hipóteses necessárias à construção do semivariograma. De acordo com Vieira et al. (1995) os cálculos utilizados em geoestatística não requerem o conhecimento da distribuição de frequências da variável analisada.

A obtenção de informações a respeito da variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos do solo é de grande importância para avaliação da recarga de aquíferos, levantamento, mapeamento e classificação de solos, desenvolvimento de esquemas mais adequados de amostragens, entre outros, visando à melhoria das condições de manejo e o incremento de produtividade das culturas (Souza, 1992).

A estimativa da dependência entre amostras vizinhas no espaço pode ser realizada através da autocorrelação que é de grande utilidade quando se está fazendo amostragem em uma determinada direção. Quando a amostragem envolve duas direções o instrumento mais indicado na estimativa da dependência entre amostras é o semivariograma (Silva, 1988). O semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre amostras dentro de um campo experimental, além de definir parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados, (Salviano, 1996). Segundo Gonçalves et al. (2001), o interpolador geoestatístico pondera os vizinhos do ponto a ser estimado, obedecendo aos critérios de não tendenciosidade e mínima variância.

A condição de não tendenciosidade significa que, em média, a diferença entre valores estimados e medidos para o mesmo ponto deve ser nula. A condição de variância mínima significa que, embora possam existir diferenças ponto por ponto entre o valor medido e o estimado, essas diferenças devem ser mínimas (Fietz, 1998). Sendo assim, a krigagem é uma técnica usada na geoestatística com o objetivo de estimar valores de variáveis para locais onde as mesmas não foram medidas a partir de valores adjacentes interdependentes. Para que esta ferramenta seja usada é necessário que exista a dependência espacial, definida pelo semivariograma (Salviano, 1996).

Gomes (2005) relata que a qualidade estrutural dos solos tem sido associada às condições favoráveis a infiltração e movimento de água no perfil do solo. O estudo da variabilidade de atributos físico-hídricos do solo pela geoestatística, tem se mostrado uma ferramenta adequada na compreensão da dinâmica destes, podendo ser fundamental no auxílio à tomada de decisões no que tange ao uso, conservação e preservação da qualidade do recurso natural solo e dos demais recursos que apresentam alguma relação com o solo em sub-bacias hidrográficas. Esta técnica permitirá avaliar as condições de recarga dos aquíferos neste trabalho.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização da área de estudo

A área de estudo possui 687 hectares e compreende a sub-bacia hidrográfica do Ribeirão da Lavrinhas, o qual deságua diretamente no Rio Grande, principal formador do Reservatório da UHE de Camargos/CEMIG e Furnas, MG. Situa-se entre as coordenadas UTM “553842” e “557742” de longitude W e “7551369” e “7554369” de latitude S e entre as altitudes de 1144m e 1739m, no município de Bocaina de Minas. Esta sub-bacia foi escolhida previamente como sendo representativa da região da Serra da Mantiqueira, para estudos hidrológicos na região do Alto Rio Grande, sendo caracterizada como uma bacia hidrográfica de cabeceira (Silva & Mello, 2005).

3.2 Clima

Segundo Giarola et al. (1997), o clima na região da sub-bacia hidrográfica, 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 em torno de 18°, tendo no mês mais quente e no mês mais frio temperaturas médias de 25,6° e 13,1°, respectivamente, com ocorrência de geadas anualmente.

3.3 Caracterização físico-hídrica do solo

3.3.1 Densidade do solo (Ds)

A Ds foi calculada seguindo metodologia descrita em EMBRAPA (1997):

$$D_s = \frac{m_s}{V} \quad (01)$$

em que D_s é a densidade do solo (g cm^{-3}), m_s representa a massa de solo seco em estufa (g) e V o volume de solo (cm^3).

3.3.2 Densidade de partículas (D_p)

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico por meio da relação entre a massa de solo seco e o volume ocupado pelos sólidos do solo seco (EMBRAPA, 1997).

Os valores de D_p foram obtidos pela relação:

$$D_p = \frac{m_s}{V_s} \quad (02)$$

em que D_p é a densidade de partículas (g cm^{-3}), m_s é a massa de solo seco em estufa (g) e V_s é o volume de sólidos no solo seco (cm^3).

3.3.3 Textura

A textura foi obtida pelo método da pipeta, conforme descrito em EMBRAPA (1997), com separação da areia em peneiras de 0,053mm e secagem em estufa da suspensão de argila coletada com pipeta, descontando-se o peso de hidróxido de sódio presente na amostra.

3.3.4 Porosidade total calculada (VTP)

A porosidade total calculada ou volume total de poros (VTP) foi obtido em porcentagem pela relação:

$$VTP = 100 \cdot \left(1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (03)$$

3.3.5 Matéria Orgânica (MO)

As análises para a obtenção do teor de matéria orgânica do solo foram feitas utilizando-se o bicromato de sódio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 4N+ H_2SO_4 10N) como agente oxidante, multiplicando-se a concentração de carbono orgânico por 1,724, conforme descrito em Walkley & Black (1934).

3.3.6 Condutividade hidráulica do solo saturado (k_0)

As medidas de condutividade hidráulica do solo saturado foram obtidas utilizando-se o permeâmetro de fluxo constante (Permeâmetro de Ghelph – modelo 2800KI). Adotou-se o seguinte procedimento para realização dos testes em campo:

a) em cada ponto amostral foi feito um furo de 0,03m de raio e 0,15m de profundidade;

b) fixaram-se cargas hidráulicas de 0,05m e 0,10m dentro do furo para a realização das leituras de fluxo;

c) foram feitas as leituras da altura da água em intervalos de tempo constantes (2 minutos), até que estas ficassem constantes, para ambas as cargas hidráulicas.

Os valores de k_0 foram obtidos pela expressão (04), de acordo com Aguiar (2001):

$$k_0 = 0,0041 \cdot X \cdot R_2 - 0,0054 \cdot X \cdot R_1 \quad (04)$$

em que k_0 é a condutividade hidráulica do solo saturado (cm seg^{-1}), posteriormente convertida para m dia^{-1} , X é a área do reservatório do aparelho ($35,39\text{cm}^2$), R_1 e R_2 são constantes de fluxo para as cargas hidráulicas de 0,05m e 0,10m, respectivamente ($\text{cm}^3 \text{seg}^{-1}$).

3.3.7 Umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp})

A umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) é o resultado de um comportamento dinâmico da água no perfil do solo e não uma característica intrínseca de sua matriz. Variações nas condições iniciais e de contorno do processo de drenagem interna levam a valores distintos de capacidade de campo. Não é, portanto, um conceito universal. Para os propósitos deste trabalho, adotou-se como θ_{cc} a umidade de equilíbrio de amostras indeformadas quando submetidas à tensão 10kPa, conforme sugerido por Medina et al. (1987). A umidade no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) foi considerada a umidade de equilíbrio em amostras deformadas submetidas à pressão a 1500kPa na câmara de pressão, conforme Reichardt & Timm (2004).

3.3.8 Porosidade drenável (μ)

A porosidade drenável “ μ ” foi considerada como a diferença entre a VTP e a θ_{cc} , conforme trabalho de Queiroz (1995).

3.3.9 Capacidade total de armazenamento de água no solo (CTA)

A capacidade total de armazenamento foi considerada a diferença entre a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) e a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), multiplicando-se esta diferença pela espessura da camada de solo considerada (150mm), segundo Bernardo (2005):

$$CTA = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * Z; \quad (05)$$

em que, CTA é a capacidade total de água no solo (mm), θ_{cc} é a capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_{pmp} é o ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e Z é a espessura da camada de solo considerada (mm).

3.4 Análise espacial dos atributos do solo

As análises espaciais foram compostas por um conjunto de procedimentos partindo do armazenamento dos dados de cada atributo e suas respectivas coordenadas geográficas em planilhas eletrônicas. Os procedimentos iniciais de análise dos dados incluíram a análise exploratória com a visualização dos dados através da confecção de gráficos para verificação de tendências, histogramas de frequência da diferença entre pares de pontos para verificação de normalidade bivariada e “boxplot” para a identificação de observações atípicas (*outliers*), conforme Mello (2004).

A partir da análise exploratória de dados, a geoestatística foi utilizada para estudar a variabilidade espacial bem como a escolha do modelo de semivariograma que melhor descrevesse a variabilidade dos dados. Após o cálculo das semivariâncias, foram ajustados os modelos de semivariogramas esférico, exponencial e gaussiano pelo método dos mínimos quadrados ponderados (MQP) e máxima verossimilhança (MV).

Para análise e escolha do melhor método e modelo foram considerados dois procedimentos. Inicialmente utilizou-se o grau de dependência espacial (GD), que considera a razão entre a variância estrutural e o patamar. Segundo Zimback (2001), o GD é considerado forte quando for $> 75\%$, moderado quando estiver entre 25% e 75% , e fraco se for $\leq 25\%$. O outro procedimento realizado foi a validação cruzada, que seguiu as recomendações propostas por Cressie (1993) e Vieira (1998). Como a interpolação por krigagem está fortemente associada ao modelo de semivariograma escolhido, a validação cruzada pode ser usada para a decisão do modelo a ser ajustado, conforme Vieira et al. (1995). A decisão da escolha do melhor modelo ficou então condicionada ao erro médio reduzido (\overline{ER}), desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) e do

somatório do quadrado médio do erro ($\sum QME$), (Mc Bratney & Webster, 1986).

Após a escolha do modelo de semivariograma, foram realizadas interpolações por krigagem, para prever e mapear os valores dos atributos em estudo. O programa R, por meio do pacote GeoR, desenvolvido por Ribeiro Júnior & Diggle (2001), foi utilizado em todas as etapas das análises geoestatísticas, tanto exploratórias dos dados quanto geoestatísticas, seguindo instruções de Ribeiro Júnior & Diggle (2001) e Mello et al. (2005).

3.5 Unidades pedológicas presentes na sub-bacia

A sub-bacia hidrográfica em questão é representativa dos ambientes associados aos Cambissolos da região da Serra da Mantiqueira, Alto Rio Grande, tendo sido escolhida como representativa desta região para realização de estudos hidrológicos associados à produção de água subterrânea. Na sub-bacia estudada existem oito especificidades de solos as quais são apresentadas na Figura 1 e Tabela 1.

Segundo Giarolla (1997), os cambissolos são solos desde rasos a profundos, de seqüência de horizontes 'A', 'Bi' (B incipiente) e 'C'. O horizonte 'A' possui textura de média a argilosa e argila de atividade baixa (Tb), o horizonte 'B' tem espessura máxima de 50 cm. Nesta região, esses solos ocorrem em relevos acidentados como mares de morros. É comum a inexistência de enraizamentos profundos bem como a limitação a processos de mecanização, já que apresentam elevada pedregosidade e instabilidade mecânica. O percentual elevado de silte, principalmente no horizonte 'C' de seu perfil, confere ao cambissolo elevada vulnerabilidade aos processos de ravinamento (voçorocamentos), demandando redobrados cuidados no uso e manejo deste solo na sub-bacia dado à instabilidade desta unidade pedológica.

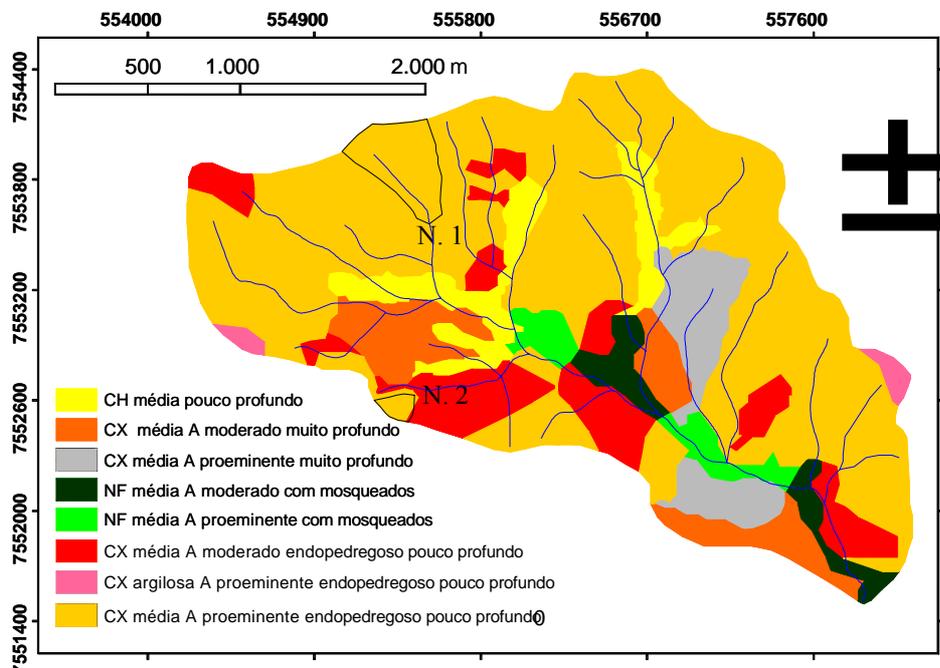


FIGURA 1. Unidades pedológicas presentes na sub-bacia do Ribeirão Lavrinhas.

TABELA 1. Ocorrência das unidades pedológica na sub-bacia.

Unidades pedológicas	Área (ha)	Área (%)
CH média pouco profundo	49,2	7,2
CX média A moderado muito profundo	53,7	7,8
CX argilosa A proeminente endopedregoso pouco profundo	5,5	0,8
CX média A moderado endopedregoso pouco profundo	81,4	11,8
CX média A proeminente endopedregoso pouco profundo	410,8	59,8
CX média A proeminente muito profundo	43,7	6,4
NF média A moderado com mosqueados	22,7	3,3
NF média A proeminente com mosqueados	20,1	2,9
Total	687,1	100,0

CH=Cambissolo húmico, CX=Cambissolo háplico, NF=Neossolo flúvico.

O cambissolo háplico (CX) textura média com horizonte “A” proeminente endopedregoso pouco profundo, é o solo de maior expressão espacial na sub-bacia, perfazendo um total de 60% da área, predominantemente na margem esquerda e na cabeceira do curso d’água principal.

3.6 Uso atual do solo

O mapa de uso atual do solo foi gerado a partir da interpretação visual em meio digital de imagem de satélite LANDSAT de outubro de 2005, com resolução espacial de 30 x 30 m. Para individualização das principais classes de uso na área foram utilizados os diferentes elementos de interpretação visual e também fichas de campo e fotos da área em estudo. As classes de uso definidas no trabalho foram: Mata Nativa (correspondentes aos fragmentos florestais), regeneração natural (representadas pelas áreas cobertas por vegetação em estágio médio a longo de regeneração), pastagem e vegetação de várzea.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A.B. **O emprego do permeâmetro de guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura**, 2001, 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- ALVARENGA, A. P. **Avaliação inicial da recuperação de mata ciliar em nascentes**. 2004, 175 p. Dissertação (Mestrado em Manejo Ambiental), UFLA, Lavras, MG.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: UFV. Imprensa Universitária, 2005. 656 p.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. M. Utilização dos penetrômetros de impacto e anel dinamométrico em Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 191-199, maio 2002.
- BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. de.; ALMEIDA, E. X.; KURTZ, C. 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.
- BERTOL, I.; BEUTLER, J. F. LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo. **Sientia Agrícola**, v. 58, n. 3, p. 555-560, jul/set 2001.
- BERTOL, I.; SANTOS, J. C. P. Uso do solo e propriedades físico-hídricas na Planalto Catarinense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília** v. 30, p. 263-267, 1995.
- BUCKMAN, H.O.; BRADY, C.A. **Natureza e propriedades dos solos**. 4 ed. São Paulo: Freitas Bastos, 1989. 594p.
- CAMARGO, O. T. de.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, 1997. 132 p.
- CASTRO, P. S.; GOMES, M. A. Técnicas de conservação de nascentes. **Ação ambiental**. Viçosa. V. 4. n. 20. p. 24-26. out./nov. 2001.
- CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1993. 900p

DAVIDE, A.C.; PINTO, L. V. A.; MONNERAT, P. F.; BOTELHO, S. A. **Nascente: o verdadeiro tesouro da propriedade rural – o que fazer para conservar as nascentes nas propriedades rurais**. Lavras; UFLA/CEMIG, 2002. 20p

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L. da.; OLIVEIRA, M. S. de. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 242-246, maio/ago. 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Centro Nacional de solos**. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento. 1997. 212 p.

FARIAS, M. S. S. de. **Diagnóstico da necessidade de drenagem no perímetro irrigado de São Gonçalo**. 1999. 75 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Paraíba, Campina Grande.

FERNANDEZ, B.M. **Prática de Física do Solo**. Programa de Treinamento e Capacitação de Recursos Humanos em Agricultura Irrigada. Escola Superior de Agricultura de Mossoró - RN, 98p. 1987.

FIETZ, C.R. **Variabilidade espacial do armazenamento de água no solo visando o manejo da irrigação por aspersão**. Piracicaba, 1998. 97p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

FOLEGATTI, M.V. **Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade e do armazenamento de água em solo siltoso**, 1996. Piracicaba, 84p. Tese (Livre - Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

GIAROLA, M. F. B.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O. CHAGAS, C. S.; FERREIRA, M. M. **Solos da região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/Camargos (MG): perspectiva ambiental**. Convênio CEMIG/UFLA/FAEPE. Lavras: UFLA, 1997. 101 p.

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)- UFLA, Lavras, MG.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; MATA, J.D.V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um argissolo vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.23, n.5, p.1149-57, 2001.

GONÇALVES, A.C.A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação**. Piracicaba, 1997. 118p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

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

HILLEL, D. **Soil and water - Physical principles and process**. Academic Press, NY, 1971.

JOURNAL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1991. 600 p.

KAMARA, S. K.; RAO, K. V. G. K. Selection of representative hydraulic conductivity value for frainage sustêm desin. Irrigation and Power, **Simla**, v. 42, n. 4, p. 355-359, 1985.

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

LIBARDI, P. L.; PREVEDELLO, C. L.; PAULETO, E. A.; MORAES, S. O. Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Cmpinas, SP, v. 10, n. 2, p. 85-90, 1986.

MACEDO, J. R. de.; OTONNI FILHO, T. B.; MENEGUELLI, N. A. Variabilidade de características físicas, químicas e físico-hídricas em solo Podzólico vermelho-amarelo de Seropédica, RJ. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 33, n. 12, p. 2043-2053, dez. 1998.

Mc BRATNEY, A.G.; WEBSTER, A.G. Choosing functions for semivariograms and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, p.617-639, 1986.

MEDINA, P. F.; OLIVEIRA JR, R. C. de. Relações entre capacidade de campo determinada in situ e em laboratório em Latossolo Amarelo muito argiloso. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 91-95, jan./abr. 1987.

MELLO, J. M. **Geostatística aplicada ao inventário florestal**. 2004, 110 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais, com opção em Silvicultura e Manejo Florestal)- ESALQ, Piracicaba, SP.

MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; OLIVEIRA, M. S.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 113-126, abr/jun. 2005.

MIRANDA, J. O.; GONÇALVES, A. C.; CARVALHO, D. F. de. Água no solo. In: MIRANDA, J. O.; PIRES, R. C. de. M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP/SBEA, 2001. p. 1-63.

MORAES, J. M.; SCHULER, A. E.; GUANDIQUE, M. E. G.; MILDE, L. C.; GROppo, J. D.; MARTINELLI, A. L.; VICTORIA, R. L. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 61-70, jan./mar. 2003.

MORAES, S. O.; LIBARDE, P. L.; Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção de água pelo solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 50, n. 3, p. 383-392, 1993.

PINTO, L. V. A. **Caracterização física da sub-bacia do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG, e proposta de recuperação de suas nascentes**. 2003. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-UFLA, Lavras, MG.

QUEIROZ, J. E. **Parâmetros hidro-dinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea**. 1995. 167 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

QUEIROZ, J. E. CRUCIANE D.E.; LIBARDE. P.L. Variabilidade espacial da porosidade drenável de um solo de várzea, no município de Piracicaba, Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 135-139, 1999 Campina Grande, PB, DEAg/UFPB.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the a parameter using the Guelph permeameter. **Soil Science**, Baltimore, v.140, n.4, p.292-302, Oct. 1983.

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

RIBEIRO JR, P. P.; DIGGLE, P. P. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R - News**, Rochester, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.

SALVIANO, A.A.C. **Variabilidade de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* em solo degradado do município de Piracicaba-SP**. Piracicaba, 1996. 91p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

SCAPINI, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ZANETTE, A.; SILVA, V. R. **Medição da densidade e porosidades do solo pelo método do cilindro e torrão parafinado em sistema de preparo do solo e pastejo animal**. In: Reunião sul-brasileira de ciência do solo, 2., Santa Maria, 1998. **Anais**. Santa Maria, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1998. p.7-10.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JÚNIOR, A.A. Erosão hídrica em Cambissolo húmico álico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 24, p. 427-436, 2000.

SILVA, A. M.; MELLO, C. R. Estudos hidrológicos sobre o regime de escoamento das sub-bacias hidrográficas de drenagem da região Alto Rio Grande à montante da UHE de Camargos/CEMIG. Relatório final do Projeto P&D 076, CEMIG/ANEEL, 2005. 500 p.

SILVA, A.P. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo**. Piracicaba, 1988. 105p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

SOUZA, J. R.; QUEIROZ, J.E.; GHEYI, H.R. Variabilidade espacial de características físico-hídricas e de água disponível em um solo aluvial na semi árido paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 140-144, 1999, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PERREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Influência da pedofoma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 1, p. 1-11, jan./abr. 2004.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, I. H. L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134, jan./fev. 2006.

SOUZA, L.S. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo**. Porto Alegre, 1992. 162p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

VIEIRA, S.R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v.54, n.2, p.405-412, 1995.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Campinas: IAC, 1998.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, p. 29-38, 1934.

ZIMBACK, C.R.L. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia), FCA/UNESP, 2001. 114p.

CAPÍTULO 2

CONTINUIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO NUMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DE CABECEIRA

1 RESUMO

JUNQUEIRA JÚNIOR, José Alves. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo numa sub-bacia hidrográfica de cabeceira. In: **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande - MG**, 2006, Cap.2, p. 28 – 64. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG³.

O conhecimento da estrutura de continuidade espacial dos atributos físico-hídricos de solos é uma importante ferramenta para o manejo do solo em sub-bacias hidrográficas. No entanto, o mapeamento produzido não pode apresentar-se enviesado, com tendências, como acontece com aqueles puramente geométricos. Desta forma neste trabalho objetivou-se avaliar modelos de semivariogramas, bem como, métodos de ajuste dos mesmos, para densidade do solo (D_s), matéria orgânica (MO), porcentagem de areia, silte, argila, argila dispersa em água (ADA), volume total de poros (VTP), condutividade hidráulica do solo saturado (k_o), porosidade drenável (μ), umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}), umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e capacidade total de armazenamento de água (CTA), numa sub-bacia hidrográfica na cabeceira do Rio Grande, na Serra da Mantiqueira. Para isto, foram feitas amostragens em 198 pontos na camada de 0-0,15m em grids de 300m x 300m, 60m x 60m e 20m x 20m. Foram ajustados os modelos de semivariogramas esférico, exponencial e gaussiano ao semivariograma experimental, pelos métodos dos mínimos quadrados ponderados e máxima verossimilhança. A análise variográfica mostrou que todos os atributos estudados apresentaram-se estruturados espacialmente. A maioria dos atributos físicos e físico-hídricos apresentou melhor ajuste pela metodologia dos MQP, exceção feita aos atributos silte, areia, porosidade drenável e θ_{pmp} . Não houve predominância de nenhum modelo específico de semivariogramas para os atributos avaliados.

³ Comitê orientador: Antônio Marciano da Silva, Carlos Rogério de Mello – DEG/UFLA - Orientadores

2 ABSTRACT

JUNQUEIRA JÚNIOR, Jose Alves. Spatial continuity of soil physical-hydric attributes in the headwater watershed. In: Flow base springs related to spatial variability of soil physical attributes and soil agricultural use in the headwater watershed of Alto Rio Grande Region, MG. Chap.2, p. 28 - 64. Thesis (Master degree in Agricultural Engineering- Irrigation and Drainage) Federal University of Lavras, Lavras - MG⁴.

Spatial continuity of soil physical-hydric attributes is an important tool for the soil management in watershed. However, the mapping cannot have bias and trends, as it happens with essential geometric interpolator. This work objectives to evaluate adjustment of semi-variograms models and respective methods of adjustment for bulk density (Ds), organic matter (MO), sandy, silt, clay, water dispersion clay (ADA), total volume of pores (VTP), hydraulic conductivity saturated (k_o), drainable porosity (μ), soil moisture in field capacity (θ_{cc}), soil moisture in permanent wilt point (θ_{pmp}) and water storage total capacity (CTA) in a headwater watershed of Mantiqueira Mountain. For this, samples were collected in layer of 0-0.20 m, in 198 points, following the grids of 300m x 300m, 60m x 60m and 20m x 20m. Weighted minimum squared (MQP) and Maximum Likelihood (MV) methods were used to adjust spherical, exponential and gaussian semi-variograms models. Cross validation demonstrated that all attributes had been presented spatial continuity. Great part of physical and physical-hydric soil attributes presented better adjustments by MQP methodology, except to soil attributes silt, sandy, drainable porosity and θ_{pmp} . None specific model of semi-variogram presented better adjustment for soil attributes evaluated.

⁴ Guidance committee, Antônio Marciano da Silva, Carlos Rogério de Mello – DEG/UFLA.

3 INTRODUÇÃO

Compreender a distribuição espacial de fenômenos naturais constitui-se hoje num desafio para a elucidação de questões importantes em diversas áreas do conhecimento. O avanço do conhecimento científico tem evidenciado as limitações dos métodos tradicionais da estatística no tratamento da variabilidade espacial de variáveis físicas e físico-hídricas do solo. As técnicas da estatística clássica partem do pressuposto de que todas as amostras são aleatórias e sua aplicação não envolve qualquer conhecimento da posição atual das mesmas ou do relacionamento entre essas posições. Já a geoestatística tem como pressuposto que as propriedades naturais da superfície terrestre são espacialmente contínuas (Druck et al. 2004), necessitando-se da aplicação de preceitos importantes associados à dependência espacial das variáveis continuamente distribuídas no espaço.

A Krigagem é a ferramenta geoestatística que possibilita a inferência de valores, a partir de amostras pontuais, usada geralmente com finalidade de mapeamento digital de variáveis num espaço geométrico amostrado. Para a utilização desta técnica, é essencial que haja um bom estudo da continuidade espacial da variável em questão, para a geração da melhor modelagem possível da mesma.

O semivariograma é a ferramenta que possibilita o estudo da dependência espacial entre amostras num campo experimental e define os parâmetros necessários para realização da krigagem (Brundson et al. 1996). Segundo Lamparelli et al. (2001), o semivariograma é uma ferramenta básica que permite descrever quantitativamente a variação no espaço de um fenômeno regionalizado. Existem vários métodos de ajuste de semivariogramas, destacando-se os Métodos dos Mínimos Quadrados Ordinários, Ponderados e Máxima Verossimilhança, (Mello et al., 2005).

Gomes (2005), trabalhando com atributos físicos do solo numa sub-bacia hidrográfica, relata que os melhores resultados do ajuste de semivariogramas foram obtidos pelo método da máxima verossimilhança (MV) quando comparados aos ajustes feitos pelos mínimos quadrados ponderados. No entanto, Vieira (2005) destaca a melhor modelagem do semivariograma obtida pelo método dos MQP para uma série de atributos físicos do solo numa microbacia hidrográfica da região de Lavras, ocupada por Cambissolo e Argissolo.

Neste contexto, neste trabalho propõe-se a estudar a estrutura de continuidade espacial de alguns atributos físicos e físico-hídricos do solo comparando e avaliando os procedimentos de ajuste por Máxima Verossimilhança (MV) e Quadrados Mínimos Ponderados (MQP), empregando-se modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano. O estudo visa a fornecer uma boa modelagem do semivariograma para que se possa produzir mapas de boa qualidade estatística e representatividade espacial.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Plano Amostral

A amostragem de solo e os testes de condutividade hidráulica foram realizados na camada de 0 a 0,15m de profundidade, seguindo um grid regular de 300 x 300m com refinamento da escala em grid's de 60 x 60 e 20 x 20, além de dois transectos com distância de 20 metros entre pontos, perfazendo um total de 198 pontos amostrados. Na Figura 2.1, apresenta-se o plano amostral adotado neste estudo.

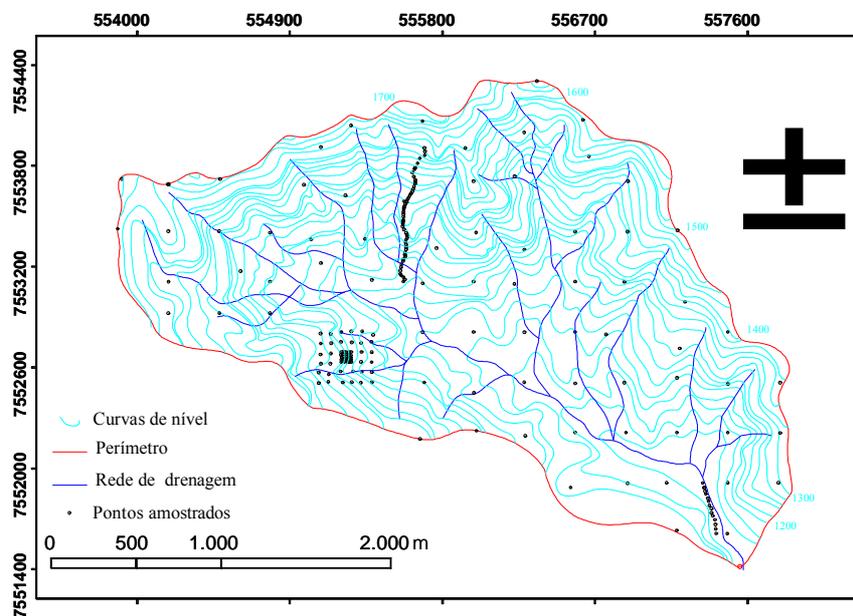


FIGURA 2.1. Plano amostral para coleta do solo e teste de condutividade hidráulica na Sub-bacia Lavrinhas – Alto Rio Grande – MG.

4.2 Estudo da continuidade espacial

A análise exploratória dos dados é uma etapa obrigatória dentro de qualquer estudo geostatístico, sendo requisito para se averiguar as propriedades estatísticas e matemáticas dos dados (Burrough & McDonell, 1998). A análise exploratória dos dados incluiu a estatística clássica com a determinação do coeficiente de variação (C.V.), coeficiente de assimetria (C.A.), média, mediana, desvio padrão e teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5 % de significância. A análise exploratória contou ainda com a visualização dos dados em mapas para verificação de tendências e histogramas de frequência da diferença entre pares de pontos, além de “boxplot” para a identificação de observações atípicas (*outliers*).

Os valores de semivariância foram obtidos pela equação:

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

em que $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h . O gráfico de $\gamma^*(h)$ em função dos valores correspondentes de h é chamado de semivariograma.

Após o cálculo das semivariâncias (semivariograma experimental), foram ajustados os modelos teóricos de semivariogramas do tipo esférico, exponencial e gaussiano, respectivamente:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h < a \quad (2)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{a}\right) \right] \quad 0 < h < a \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{a}\right)^2 \right] \quad 0 < h < a \quad (4)$$

em que, C_0 é o efeito pepita; C_1 é o patamar e 'a' o alcance do semivariograma.

A avaliação do desempenho de cada modelo se deu através de dois critérios. Avaliou-se a razão entre a variância estrutural (C) e o patamar (C_0+C), expressa em porcentagem, pelo grau de dependência espacial (GD). Segundo Zimback (2001), o GD é dado por:

$$GD = \left(\frac{C}{C + C_0} \right) \times 100 \quad (5)$$

sendo que o GD é considerado fraco se essa razão for $\leq 25\%$, moderado quando a razão estiver entre 25% e 75% , e forte se a razão for $> 75\%$.

O outro critério de comparação do desempenho foi o procedimento de validação cruzada ("*cross validation*"), seguindo as recomendações de Cressie (1993) e Vieira (1998). Como a interpolação por krigagem está fortemente

associada ao modelo de semivariograma escolhido, a validação cruzada foi usada para a decisão do modelo a ser ajustado, (Vieira et al., 1981).

A comparação entre os modelos, em cada método de ajuste, foi efetuada através do erro médio reduzido (\overline{ER}), desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) e do somatório do quadrado médio do erro ($\sum QME$). Segundo Mc Bratney & Webster (1986) e Cressie (1993), o erro médio reduzido é definido como:

$$\overline{ER} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{z(x_{i0}) - \hat{z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \quad (6)$$

Onde $z(x_{i0})$ é o valor observado no ponto $i0$; $\hat{z}(x_{i0})$ é o valor estimado para o ponto $i0$ e $\sigma(x_{i0})$ é o desvio padrão da krigagem no ponto $i0$. O desvio padrão dos erros reduzidos foi obtido a partir da seguinte equação:

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{z(x_{i0}) - \hat{z}(x_{i0})}{\sigma(x_{i0})} \right\}^2} \quad (7)$$

O erro reduzido médio mais próximo de zero e o desvio padrão próximo de um são os critérios para escolha do melhor modelo, além do menor somatório do quadrado médio do erro, representado pela equação 8.

$$\sum QME = \left(\frac{\sum_{i=1}^n [z(x_{i0}) - \hat{z}(x_{i0})]^2}{n} \right) \quad (8)$$

Todas as análises efetuadas no presente trabalho foram realizadas com o programa R, utilizando-se pacote GeoR (Ribeiro Júnior & Diggle, 2001)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise exploratória e ajuste de semivariogramas aos atributos físico-hídricos do solo

Na Tabela 2.1 estão apresentados os resultados referentes à estatística clássica para cada atributo físico-hídrico avaliado. Detecta-se pequena variabilidade dos dados, representada pelos relativamente baixos coeficientes de variação, exceto para o atributo k_o . Esta variabilidade pode ser classificada de acordo com os critérios propostos por Warrick & Nielsen (1980), que consideram os valores do coeficiente de variação menores que 12% como baixa variabilidade, de 12% a 60% média variabilidade e os valores acima de 60% alta variabilidade. Assim, os atributos VTP, θ_{cc} , “ μ ”, θ_{pmp} e CTA apresentaram média variabilidade e k_o , alta variabilidade. A alta variabilidade encontrada para k_o está em consonância com o comportamento do histograma de frequência da diferença entre pares de pontos para este atributo (Figura 2.2b) e com o alto coeficiente de assimetria comparando-se com os demais atributos. A semelhança entre as medidas de posição (média e mediana) dos atributos, também expressa simetria na distribuição dos dados.

Verifica-se pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk, que os atributos k_o , θ_{pmp} e “ μ ” não apresentaram distribuição normal, uma vez que os valores de p apresentaram-se altamente significativos, aceitando-se a hipótese H_0 de não normalidade. Este comportamento pode ser mais bem interpretado observando o comportamento dos histogramas das diferenças entre pares de pontos apresentados na Figura 2.2, principalmente para o atributo k_o . Assim, é possível que haja dificuldades no ajuste dos semivariogramas pela metodologia da máxima verossimilhança, devido ao fato de o ajuste do modelo de semivariograma por esta metodologia não se basear nos pontos do

semivariograma e, sim, nas diferenças dos dados originais (Diggle & Ribeiro Junior, 2000). Os demais atributos apresentaram valores de p não significativos a 1%, ou seja, apresentaram distribuição simétrica com tendência à normalidade, rejeitando-se, portanto, a hipótese H_0 . Este fato também pode ser constatado pela semelhança entre as medidas de posição (\bar{x} e Med.) dos atributos.

TABELA 2.1. Parâmetros estatísticos dos atributos físico-hídricos estudados.

Variável	\bar{x}	Med.	C.V.(%)	C.A.	p<0,05
θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)	0,3249	0,3190	20,0	0,409	0,03524 ^{ns}
k_o (m dia ⁻¹)	1,69	1,01	180,7	6,692	2,436E-10*
CTA (mm)	23,56	23,97	41,5	-0,039	0,0377 ^{ns}
θ_{pmp} (cm ³ cm ⁻³)	0,2000	0,1673	35,4	0,548	0,002325*
M O(%)	26,96	27,141	42,5	0,329	0,02668 ^{ns}
VTP (%)	59,44	58,932	13,2	0,100	0,0006297*

*=significativo a 1%, ^{ns}= não significativo a 1%.

A análise exploratória dos atributos físico-hídricos está representada nas Figuras 2.2, 2.3 e 2.4. Inicialmente observa-se uma boa distribuição espacial dos dados em todas as direções da sub-bacia hidrográfica, ou seja, não existe nenhum tipo de tendenciosidade direcionada. A existência de tendências pode inviabilizar a aplicação da geoestatística, uma vez que a condição de não tendenciosidade é de fundamental importância, sendo exigida para aplicação da geoestatística.

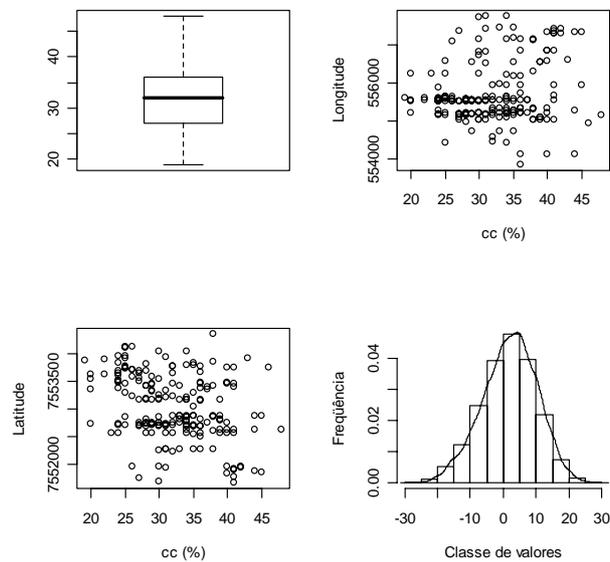
A análise exploratória permitiu detectar que houve valores candidatos a “outliers” para dois atributos analisados (k_o e μ). Estes pontos produzem maior variabilidade dos dados e maior dispersão dos mesmos em torno da média, prejudicando a normalidade. Quando detectados pelos gráficos “boxplot”, estes valores foram comparados com seus vizinhos mais próximos, seguindo as recomendações de Libardi et al. (2006), e foram retirados quando apresentaram diferenças acentuadas. Desta forma os novos gráficos são apresentados sem a

presença destes, exceção feita ao atributo μ que não teve seu “outlier” retirado porque este ponto não apresentou diferenças acentuadas com seus vizinhos.

O atributo k_0 (Figura 2b) apresentou o maior número de “outliers”, sete no total. Este fato também foi observado por Gomes (2005), o qual relata que tal atributo apresenta grande variabilidade espacial e estrutura de dependência espacial indefinida. É possível observar que, mesmo após a remoção dos “outliers”, este atributo apresentou grande distorção em seu gráfico “boxplot” e distribuição assimétrica, com comportamento do histograma da diferença entre pares de pontos, indefinido, o que pode ser um indicio de maior dificuldade no ajuste de semivariogramas, principalmente pelo método da máxima verossimilhança.

Os demais atributos avaliados (θ_{cc} , CTA, θ_{pmp} e VTP), não apresentaram valores discrepantes, notando-se boa distribuição de frequências em termos de normalidade e do gráfico “boxplot” para os atributos θ_{cc} , CTA, e VTP e uma ligeira distorção para θ_{pmp} .

a) θ_{cc}



b) k_0

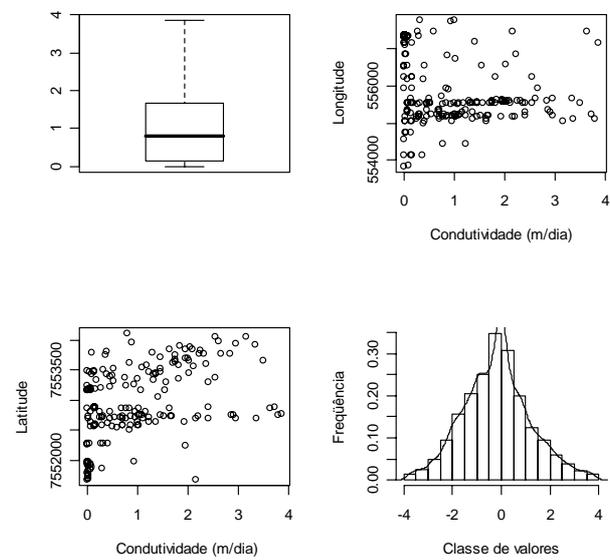
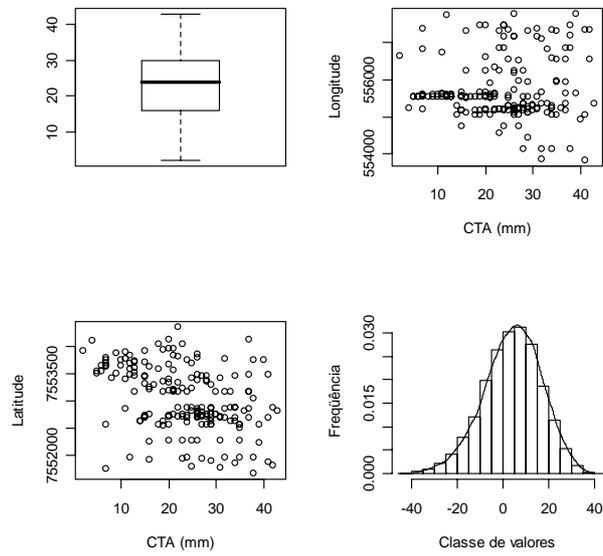


FIGURA 2.2. Gráficos do tipo boxplot, mapas de tendência e histograma das diferenças entre pares de pontos para os atributos θ_{cc} e k_0 .

a) CTA



b) θ_{pmp}

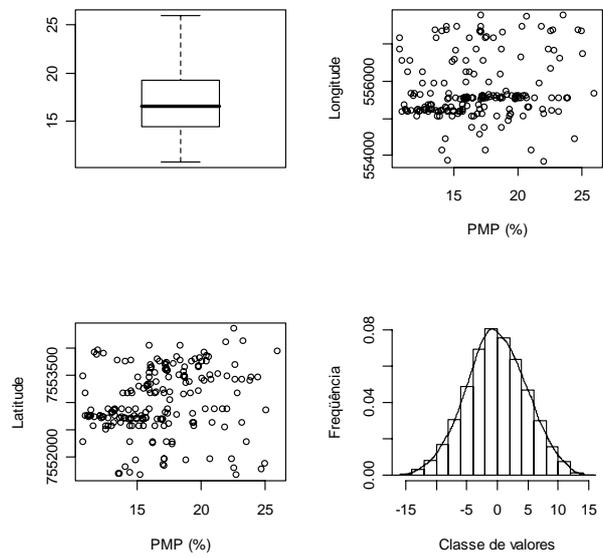
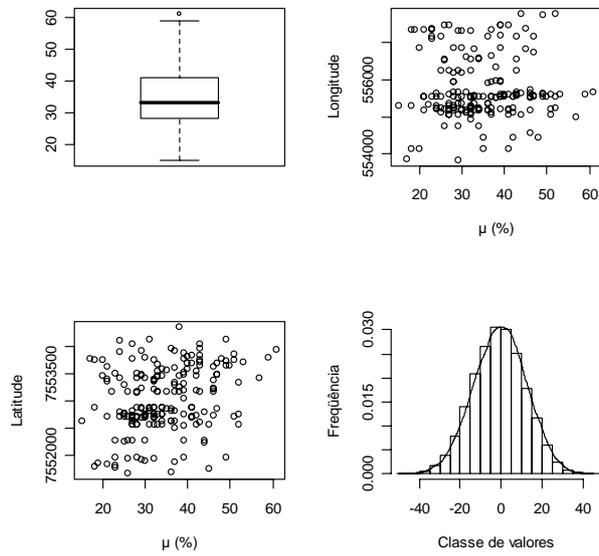


FIGURA 2.3. Gráficos do tipo boxplot, mapas de tendência e histograma das diferenças entre pares de pontos para os atributos CTA e θ_{pmp} .

a) “ μ ”



b) VTP

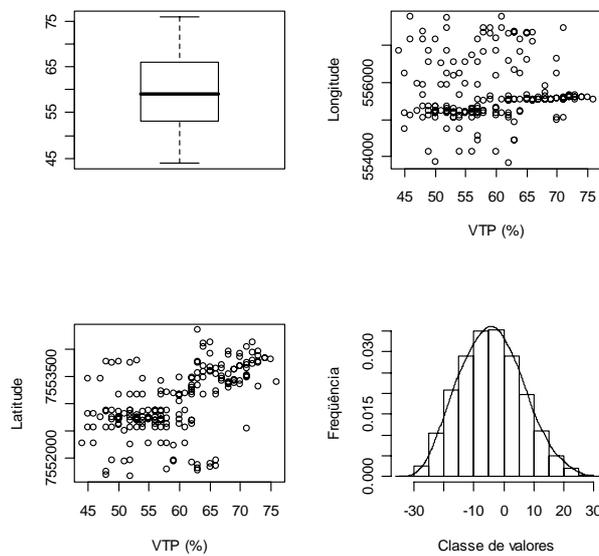
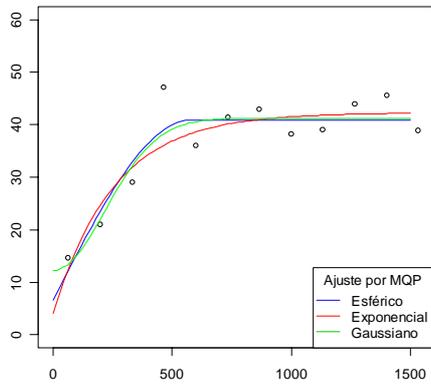


FIGURA 2.4. Gráficos do tipo boxplot, mapas de tendência e histograma das diferenças entre pares de pontos para os atributos “ μ ” e VTP .

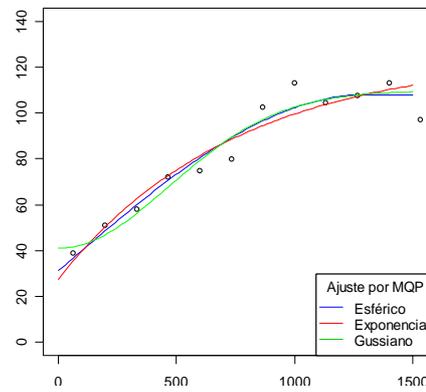
Nas Figuras 2.5 e 2.6, apresentam-se os modelos de semivariogramas ajustados pelas metodologias empregadas, para os atributos físico-hídricos estudados na sub-bacia hidrográfica. Percebe-se que alguns atributos não se ajustaram por MV, caso específico de CTA, VTP e θ_{cc} . Os demais atributos (θ_{pmp} , k_o , μ) se ajustaram por ambas as metodologias.

Analisando os semivariogramas visualmente, nota-se grande semelhança em seus comportamentos, principalmente àqueles ajustados por MQP, sendo muito difícil se determinar qual o melhor modelo para cada atributo avaliado. Percebe-se que em toda a extensão do semivariograma as curvas mantêm-se próximas, chegando a se tangenciarem em alguns casos, apresentando comportamento semelhante. É interessante destacar que o atributo μ apresenta comportamento diferenciado em relação aos demais, pois é o único atributo que apresenta similaridade no comportamento dos semivariogramas ajustados por ambas as metodologias. Esta mesma análise para os modelos ajustados por MV revela também que há semelhança entre os modelos, mais não tão pronunciada como o ajuste por MQP. Para o atributo θ_{pmp} , a partir da distância de 750m os modelos exponencial e gaussiano ajustados por MV apresentam comportamento semelhante, com as curvas mantendo-se próximas, mas, não se tangenciando. Já para o atributo k_o , os modelos esférico e gaussiano ajustados por MV são os que mais se assemelham, sugerindo que para estes atributos deve haver uma melhor metodologia, a partir da qual se produzirá um mapa de krigagem mais consistente, representativo da realidade físico-hídrica da sub-bacia hidrográfica.

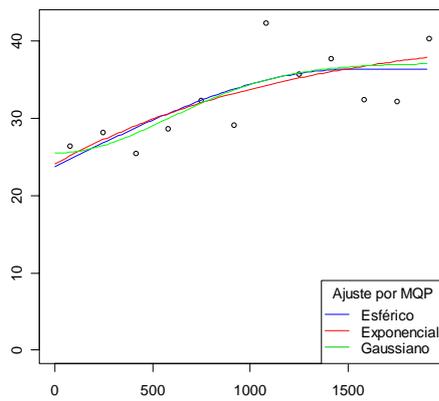
a) VTP



b) CTA



c) θ_{cc}



d) k_0

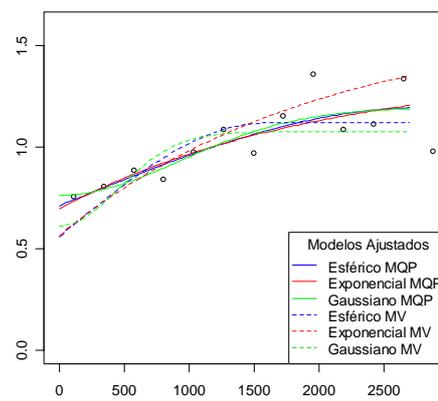


FIGURA 2.5. Semivariogramas ajustados para os atributos VTP, CTA, θ_{cc} e k_0 na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinhas.

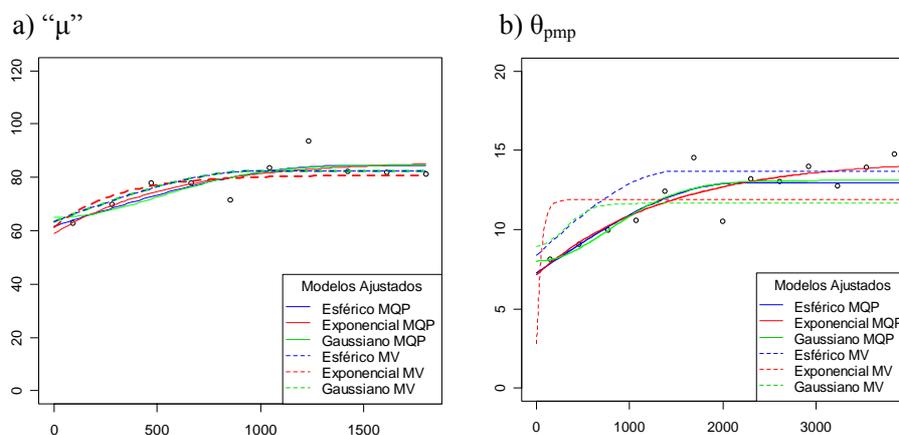


FIGURA 2.6. Semivariogramas ajustados para os atributos “ μ ” e θ_{pmp} na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinhas.

Encontram-se na Tabela 2.2 os parâmetros dos semivariogramas ajustados com base em cada uma das metodologias empregadas. Desta forma, pode-se observar que para os atributos (k_o , θ_{pmp} e μ), cujo ajuste se deu por ambas as metodologias, não houve grandes discrepâncias em relação ao GD, principalmente para k_o que apresentou, segundo Zimback (2001), moderada dependência espacial, ficando a escolha do método de ajuste e modelo de semivariograma dependente da validação cruzada. Para o atributo θ_{pmp} , o modelo exponencial por MV apresentou alto grau de dependência espacial e menor efeito pepita, sendo possivelmente o melhor modelo. Para o atributo “ μ ”, sobressaiu-se a metodologia dos MQP apresentando moderado grau de dependência espacial para os modelos esférico e exponencial, este apresentando ligeira superioridade sobre o primeiro devido ao menor efeito pepita. Os demais atributos (θ_{cc} , CTA e VTP) apresentaram ajuste apenas por MQP. Este melhor desempenho da metodologia MQP pode ser atribuído à falta de normalidade bivariada, como é o caso do atributo VTP, que só apresentou ajuste por esta metodologia. É importante destacar que os atributos k_o e θ_{pmp} , apesar de não terem apresentado normalidade dos dados, apresentaram ajuste por MV.

TABELA 2.2. Parâmetros de ajuste dos modelos de semivariogramas e respectivos graus de dependência espacial.

Atributos	Método	Modelo	Parâmetros			GD (%)
			C_o	C_o+C	a (m)	
θ_{cc}	MQP	Esf	23,72	36,3459	1516	35
		Exp	24,06	41,7764	1259	42
		Gaus	25,48	37,0827	831	31
k_o	MQP	Esf	0,71	1,1961	2798	40
		Exp	0,70	1,385	2000	50
		Gaus	0,76	1,1957	1316	36
	MV	Esf	0,56	1,1195	1588	50
		Exp	0,56	1,6282	2000	65
		Gaus	0,61	1,0755	640	43
CTA	MQP	Esf	31,21	108,0201	1301	71
		Exp	27,61	125,2784	749	78
		Gaus	41,05	109,643	663	63
θ_{pmp}	MQP	Esf	7,26	12,9357	2154	44
		Exp	7,14	14,4455	1397	51
		Gaus	8,02	13,0977	1109	39
	MV	Esf	8,37	13,685	1500	39
		Exp	2,82	11,892	53	76
		Gaus	8,95	11,648	413	23
VTP	MQP	Esf	6,62	40,9534	580	84
		Exp	4,08	42,2858	255	90
		Gaus	12,27	41,2492	309	70
“ μ ”	MQP	Esf	61,69	84,4303	1400	27
		Exp	58,97	86,2906	583	32
		Gaus	64,95	84,7337	715	23
	MV	Esf	63,48	82,46	1000	23
		Exp	61,36	80,89	305	24
		Gaus	63,17	81,17	282	22

θ_{cc} : umidade volumétrica na capacidade de campo; k_o : condutividade hidráulica do solo saturado; CTA: capacidade total de água na camada de 0 a 0,15m; θ_{pmp} : umidade volumétrica no ponto de murcha permanente; VTP: volume total de poros e “ μ ”: porosidade drenável; respectivamente.

A superioridade da metodologia MQP ajustada a atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica também foi constatada por Gomes (2005) e Vieira (2005).

Tomando-se como referência os valores do GD sugeridos por Zimback (2001), conclui-se que o atributo CTA ajustado por MQP apresentou um forte grau de dependência para o modelo exponencial e moderado para os demais modelos. O atributo θ_{cc} apresentou moderado grau de dependência espacial para todos os modelos ajustados, com pequena magnitude de variação no efeito pepita. Já para o atributo VTP, o GD foi considerado forte para os modelos esférico e exponencial e moderado para o modelo gaussiano. Nota-se que o alcance dos semivariogramas apresentou valores variando de 53 a 2798m, compatíveis com a dimensão da sub-bacia e com a maior distância de separação entre os pontos amostrados que foi de 4200m.

Segundo Mc Bratney & Webster (1986) e Mello et al. (2005a), a comparação entre modelos de semivariogramas ajustados por diferentes metodologias pode ser efetuada através do erro médio reduzido (\overline{ER}), desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) e do somatório do quadrado médio do erro ($\sum QME$). Visualiza-se na Tabela 2.3, os valores referentes a estes parâmetros gerados pela validação cruzada. Inicialmente, o que chama atenção é a grandeza do desvio padrão dos erros padronizados dos atributos VTP e CTA quando comparada à dos demais atributos, refletindo a alta variabilidade destes atributos. Comportamento semelhante pode ser notado para o atributo θ_{pmp} ajustado por MQP. Quando se confronta as informações da Tabela 2.2 com a Tabela 2.3, percebe-se que os modelos de semivariogramas que apresentaram os maiores graus de dependência não repetiram o mesmo desempenho na validação cruzada, produzindo os maiores erros médios padronizados e desvio padrão dos erros quando comparados aos demais modelos para o mesmo atributo,

principalmente para o modelo exponencial ajustado por MQP para os atributos CTA e VTP

TABELA 2.3. Erro médio reduzido (\overline{ER}), desvio padrão dos erros reduzidos(S_{ER}) e somatório do quadrado médio do erro ($\sum QME$), gerados pela validação cruzada.

Atributos	Método	Modelo	\overline{ER}	S_{ER}	$\sum QME$
θ_{cc}	MQP	Esf	0,00248	1,00668	0,000321
		Exp	0,00254	0,98620	0,000256
		Gaus	0,00146	1,03874	0,000232
K_o	MQP	Esf	-0,00057	0,92697	0,6581
		Exp	-0,00067	0,93450	0,6235
		Gaus	-0,00001	0,94012	0,5869
	MV	Esf	-0,00038	0,99843	0,6587
		Exp	-0,00062	0,99867	0,7564
		Gaus	0,00053	1,00055	0,6124
CTA	MQP	Esf	0,00711	1,15283	3,21547
		Exp	0,00767	1,16543	3,35649
		Gaus	0,00336	1,13061	2,98745
θ_{pmp}	MQP	Esf	0,00104	1,11407	0,005123
		Exp	0,00098	1,13101	0,005231
		Gaus	0,00080	1,12529	0,004185
	MV	Esf	0,00115	1,01483	0,004521
		Exp	-0,00162	1,01216	0,004212
		Gaus	0,00107	1,04069	0,004356
VTP	MQP	Esf	-0,01203	1,12443	0,000124
		Exp	-0,01520	1,17842	0,000256
		Gaus	-0,01310	1,14540	0,000245
M	MQP	Esf	0,00068	1,02061	0,006589
		Exp	0,00092	1,024284	0,006235
		Gaus	0,00081	1,031371	0,006479
	MV	Esf	0,00081	1,004114	0,006548
		Exp	0,00069	1,003384	0,006235
		Gaus	0,00061	1,004082	0,005687

A única exceção foi o atributo θ_{pmp} , que apresentou o menor erro e desvio padrão dos erros com o modelo exponencial ajustado por MV, o qual apresentou o maior grau de dependência. Este fato revela que o GD não deve ser usado como parâmetro único na escolha de semivariogramas, pois apresenta um caráter subjetivo.

Com base nos valores das Tabelas 2.2 e 2.3, adotou-se para este trabalho o modelo gaussiano ajustado por mínimos quadrados ponderados para estudo da variabilidade espacial na sub-bacia hidrográfica para os atributos k_0 e CTA e o modelo esférico para os atributos VTP e θ_{cc} , com a mesma metodologia. A metodologia da máxima verossimilhança é aplicada aos atributos “ μ ” e θ_{pmp} , por meio dos modelos gaussiano e exponencial, respectivamente.

5.2 Análise exploratória e ajuste de semivariogramas aos atributos físicos do solo

Na Tabela 2.4 estão apresentados os parâmetros estatísticos para cada atributo físico avaliado na sub-bacia hidrográfica. De acordo com os critérios propostos por Nielsen et al. (1973), que consideram os valores do coeficiente de variação de atributos físicos do solo menores que 30% como pequena variabilidade, detecta-se pequena variabilidade dos dados referentes aos atributos Ds, areia, silte e argila, enquanto os demais atributos (ADA e MO) apresentam maior variabilidade. A alta variabilidade encontrada para ADA e MO está em consonância com o comportamento do histograma de frequência da diferença entre pares de pontos para estes atributos (Figuras 2.8b e 2.9b) e com o alto coeficiente de assimetria comparando-se com os demais atributos, principalmente para o atributo MO. A semelhança entre as medidas de posição (média e mediana) dos atributos, também expressa a simetria da distribuição dos dados. Analisando-se estas medidas nota-se que estes atributos MO e ADA

foram os que apresentaram as maiores diferenças entre as mesmas, reforçando a afirmação anterior.

Verifica-se pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk, que os atributos Ds, ADA e MO não apresentaram distribuição normal, uma vez que os valores de 'p' apresentaram-se altamente significativos, aceitando-se a hipótese Ho de não normalidade. Assim, é possível que haja dificuldades no ajuste dos semivariogramas pela metodologia da máxima verossimilhança para os atributos mencionados. Os demais atributos (frações texturais) apresentaram distribuição simétrica com tendência à normalidade, especialmente areia e argila, em que os valores de p foram não significativos a 5%, enquanto que para silte, não houve significância a 1%, rejeitando-se a hipótese de não normalidade.

TABELA 2.4. Parâmetros estatísticos dos atributos físicos estudados.

Variável	\bar{x}	Med.	C.V.(%)	CA	p<0,05
Ds (g cm ⁻³)	1,00	1,01	21,0	-0,041	0,000155*
ADA (%)	5,55	5,00	53,6	0,764	9,428E-06*
MO (%)	4,92	4,6	45,5	1,270	2,92E-08*
Areia (%)	52,88	53,50	14,1	-0,899	0,3962 ^{ns}
Argila (%)	30,04	30,00	20,8	0,191	0,4829 ^{ns}
Silte (%)	17,20	17,00	24,3	0,806	0,0171 ^{ns}

*=significativo a 1%, ^{ns}= não significativo a 1%.

Nas Figuras 2.7, 2.8 e 2.9 encontram-se os gráficos para se realizar a análise exploratória dos atributos físicos do solo. Neste estágio inicial das análises geoestatísticas foi verificado a distribuição e a consistência das medidas estatísticas dos atributos físicos.

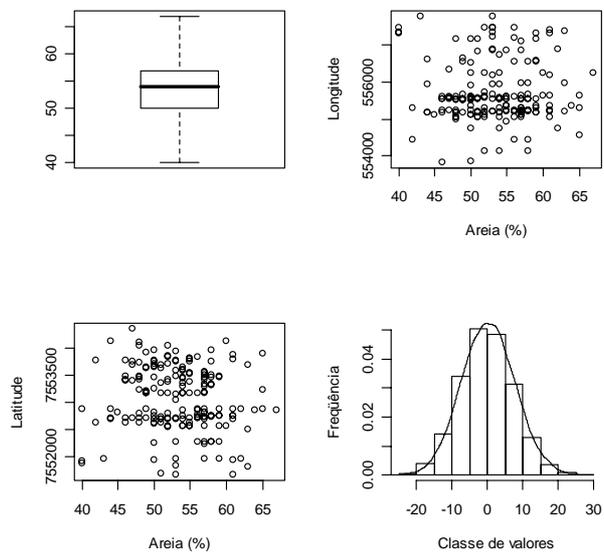
Primeiramente avaliam-se os gráficos de distribuição espacial dos dados para identificação de tendências, uma vez que esta condição é fundamental para aplicação da geoestatística. Observa-se por meio destes gráficos que há boa distribuição espacial de todos os atributos na sub-bacia hidrográfica, ou seja, não

existe nenhum tipo de tendenciosidade direcionada, constatando-se condições favoráveis que permitirão o desenvolvimento de uma estrutura de dependência espacial consistente, atendendo a hipótese intrínseca (Mello et al. 2005).

Também foi possível detectar pela análise exploratória dos dados, que houve candidatos a “outliers” para três atributos analisados (MO, ADA e silte), detectados pelos gráficos “boxplot”. Estes pontos poderiam produzir alta variabilidade aos dados e distorção dos mesmos em torno da média, prejudicando a normalidade, por isso ao serem detectados, foram comparados com seus vizinhos mais próximos, seguindo as recomendações de Libardi et al. (2006) e retirados quando apresentassem diferenças acentuadas com os mesmos. Desta forma, novos gráficos são apresentados sem a presença destes, exceção feita ao atributo silte que não teve um de seus “outliers” retirado porque este ponto não apresentou diferenças acentuadas com seus vizinhos. Este atributo foi o que apresentou o maior número de “outliers”. Os atributos areia e argila, não apresentaram valores discrepantes, notando-se boa distribuição de frequências em termos de normalidade, com o gráfico “boxplot” acusando boa distribuição dos dados para ambos os atributos. Para ADA e MO, mesmo após a retirada dos “outliers”, nota-se ligeira distorção dos dados.

Outra análise importante se faz com relação ao comportamento do histograma de frequência das diferenças entre pares de pontos, que permite avaliar visualmente a existência de normalidade bivariada dos dados, sendo indicativo da normalidade multivariada.

a) Areia



b) Silte

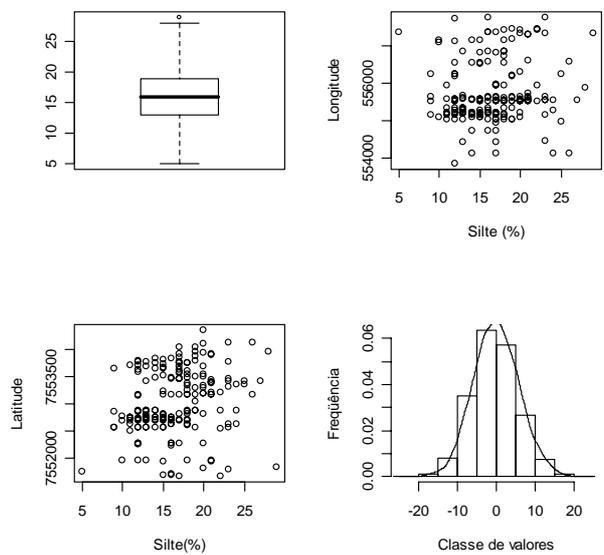
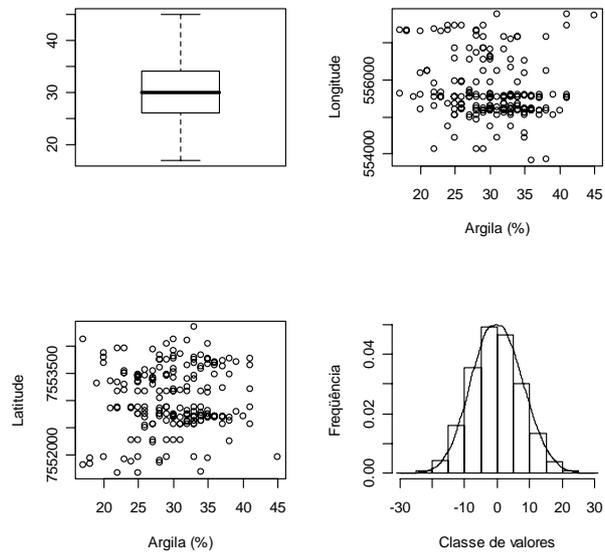


FIGURA 2.7. Gráfico do tipo boxplot, mapas de tendência e histograma das diferenças entre pares de pontos para os atributos areia e silte.

a) Argila



b) ADA

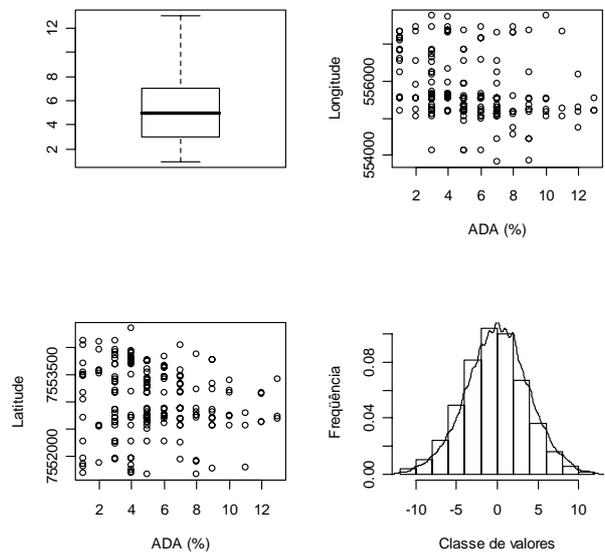
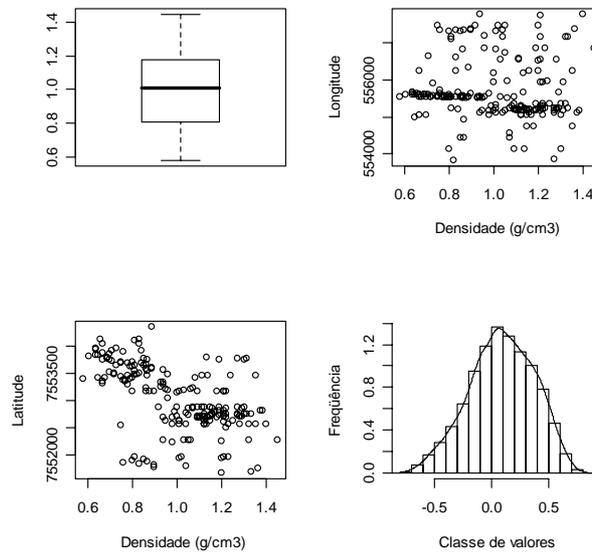


FIGURA 2.8. Gráfico do tipo boxplot, mapas de tendência e histograma das diferenças entre pares de pontos para os atributos argila e ADA.

a) Ds



b) MO

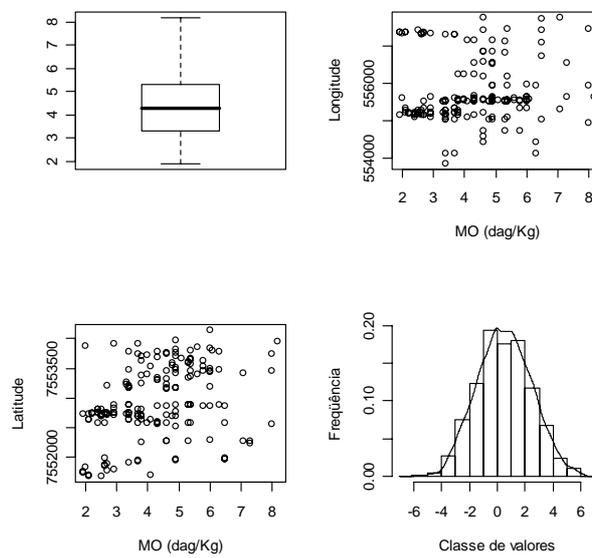


FIGURA 2.9. Gráfico do tipo boxplot, mapas de tendência e histograma das diferenças entre pares de pontos para os atributos Ds e MO.

Segundo Ribeiro Júnior & Diggle (2001), a normalidade multivariada é uma condição desejável para o ajuste por máxima verossimilhança, observando-se que os atributos ADA, Ds e MO (Figuras 2.8b, 2.9a e 2.9b), não apresentam boa distribuição de frequência em termos de normalidade bivariada, apresentando distorção em seus histogramas de frequência, principalmente o atributo Ds que apresentou assimetria negativa, sendo um indício de maior dificuldade para produzir bons ajustes por máxima verossimilhança. Os demais atributos apresentaram boas condições de normalidade bivariada, não apresentando distorção dos dados em torno da média. Possivelmente, os semivariogramas ajustados por máxima verossimilhança para estes atributos apresentarão boa estrutura de dependência espacial.

A análise variográfica das Figuras 2.10 e 2.11 permite constatar que todos os atributos físicos do solo estudados apresentam-se estruturados espacialmente, ou seja, existe uma função estrutural com semivariância de comportamento modelável. Todavia, observa-se que os semivariogramas referentes aos atributos Ds e MO não se ajustaram pela metodologia da máxima verossimilhança devido à falta de normalidade bivariada detectada pelos histogramas de frequência das diferenças entre pares de pontos (Figuras 2.9a e 2.9b), enquanto que os demais atributos ajustaram-se por ambas metodologias. Um fato relevante que merece ser destacado se faz presente no ajuste por MV do atributo ADA, o qual não era esperado por ter apresentado distorção em seu histograma de frequência.

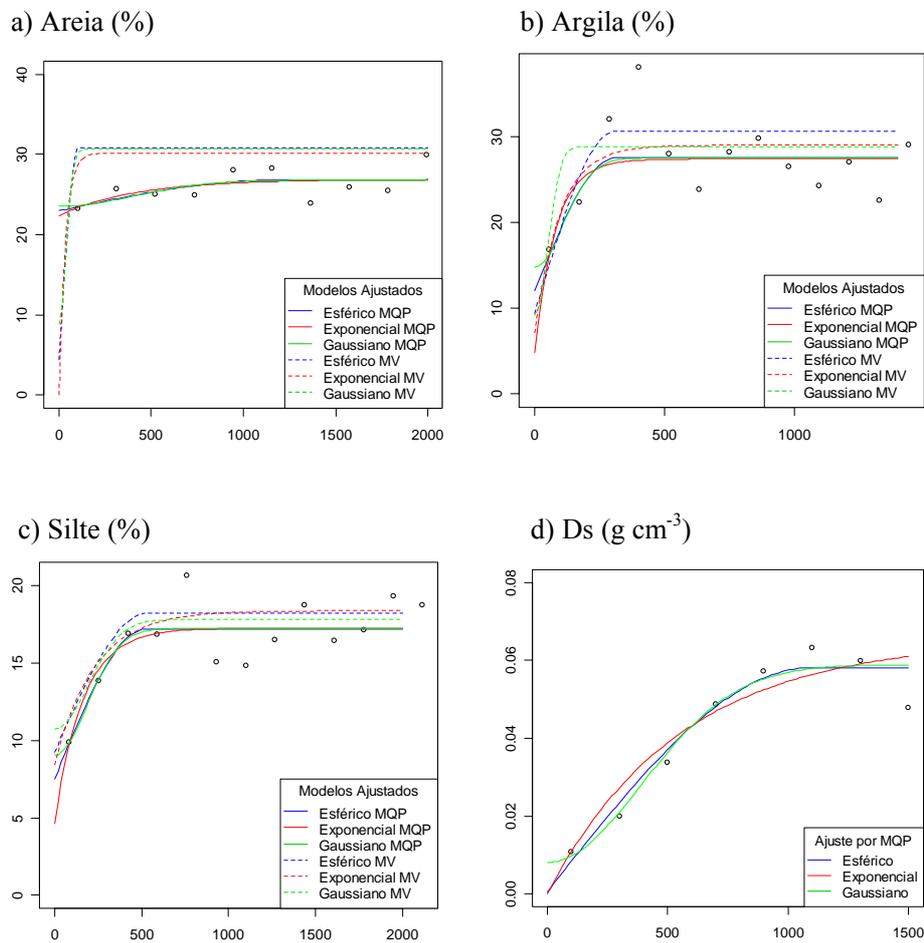


FIGURA 2.10. Semivariogramas ajustados para teores de areia, argila, silte e Ds na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinhas.

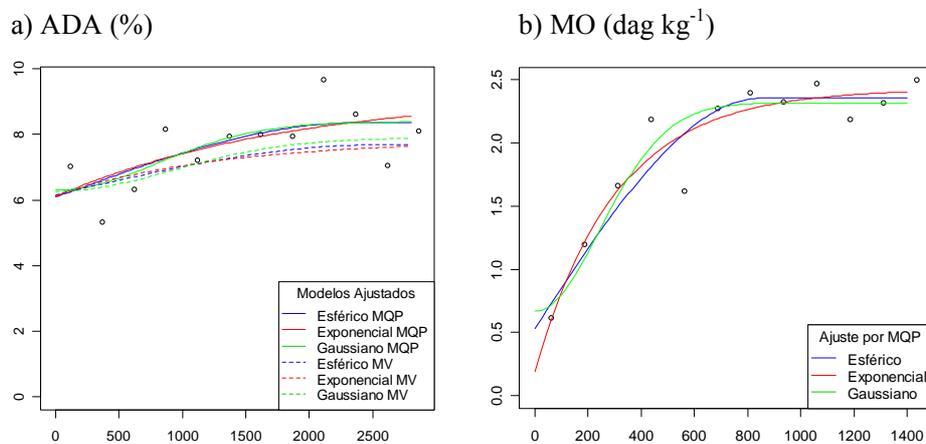


FIGURA 2.11. Semivariogramas ajustados para ADA e MO na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinhas.

Analisando os semivariogramas visualmente, nota-se grande similaridade em seus comportamentos, independentemente da metodologia empregada. Suas curvas mantêm-se próximas, chegando a se tocar em alguns casos, sendo muito difícil se determinar qual o melhor modelo ou metodologia para os atributos avaliados. Segundo Vieira et al. (2000), semivariogramas que apresentam pontos espalhados acima da curva ou em suas extremidades, são ajustes tendenciosos e imprecisos, não sendo o caso dos obtidos por este estudo.

É interessante destacar que o atributo areia apresenta um comportamento diferenciado em relação aos demais, pois é o único atributo que apresenta discrepância no ajuste dos semivariogramas. Esta mesma análise revela grande diferença no efeito pepita e no alcance dos semivariogramas ajustados. Para o atributo argila, a partir da distância de 400m os modelos Exponencial e Gaussiano ajustados por MV apresentam um comportamento bem semelhante, com as curvas mantendo-se próximas sem se tangenciarem, enquanto que o modelo esférico ajustado pela mesma metodologia, a partir da distância aproximada de 300m se mantém paralelo às mesmas, mas com maior semivariância. Já para o atributo silte os modelos ajustados por ambas as

metodologias se assemelham partindo do efeito pepita e tornando-se paralelos a partir da distância de 400m, sugerindo alcances próximos para todos os semivariogramas.

Encontram-se na Tabela 2.5 os parâmetros referentes aos semivariogramas ajustados com base em cada uma das metodologias empregadas. Inicialmente deve-se avaliar o grau de dependência espacial já que o mesmo pode ser considerado um bom indicador de uma melhor metodologia (Gomes, 2005). Desta forma, pode-se observar que os semivariogramas dos atributos ajustados por MQP (Ds e MO) apresentam-se com forte grau de dependência espacial (Zimback, 2001), fruto do baixo efeito pepita com um patamar de mesma magnitude destes semivariogramas, principalmente para Ds, que apresentou forte grau de dependência para todos os modelos avaliados, ficando a seleção em função da validação cruzada. Para o atributo MO, o modelo exponencial apresentou mais de 90% de sua variabilidade explicada pela componente espacial, concordando com os resultados obtidos por Gomes (2005), sinalizando que a metodologia dos mínimos quadrados ponderados deve ser utilizada no estudo da estrutura de dependência espacial deste atributo em sub-bacias hidrográficas.

Os demais atributos físicos (areia, silte, argila e ADA), apresentaram ajuste pelas duas metodologias avaliadas. Entretanto, não se observa um melhor desempenho apenas com base no grau de dependência espacial, haja vista que ora este se mostra forte no ajuste por MV (areia) e ora no ajuste por MQP (silte), apresenta-se também forte por ambas as metodologias (argila), e para nenhuma delas (ADA). Este fato também é identificado quando se avalia o efeito pepita produzido pelos ajustes, onde para o atributo areia houve grande diferença neste parâmetro em função das duas metodologias de ajuste, enquanto que para ADA, este parâmetro apresentou-se de forma uniforme. Para os atributos silte e argila o efeito pepita não se apresentou com tendência bem definida.

TABELA 2.5. Parâmetros de ajuste dos modelos de semivariogramas e respectivos graus de dependência espacial.

Atributos	Método	Modelo	Parâmetros			GD (%)
			Co	Co+C1	a (m)	
Ds	MQP	Esf	0,001	0,06	1100	99
		Exp	0,000	0,07	554	100
		Gaus	0,008	0,06	554	86
MO	MQP	Esf	0,53	2,35	849	77
		Exp	0,19	2,43	305	92
		Gaus	0,67	2,32	348	71
Areia	MQP	Esf	22,97	26,77	1158	14
		Exp	22,38	26,90	414	17
		Gaus	23,51	26,78	574	12
	MV	Esf	4,34	30,86	106	86
		Exp	0,05	30,19	35	100
		Gaus	8,86	30,66	54	71
Silte	MQP	Esf	7,50	17,20	528	56
		Exp	4,61	17,25	164	73
		Gaus	9,03	17,22	265	48
	MV	Esf	9,24	18,21	533	49
		Exp	8,45	18,37	230	54
		Gaus	10,72	17,81	271	40
Argila	MQP	Esf	12,10	27,54	314	56
		Exp	4,87	27,44	81	82
		Gaus	14,86	27,55	159	46
	MV	Esf	9,43	30,63	311	69
		Exp	7,21	29,04	98	75
		Gaus	9,17	28,90	70	68
ADA	MQP	Esf	6,08	8,35	2379	27
		Exp	6,11	9,26	1856	34
		Gaus	6,30	8,38	1132	25
	MV	Esf	6,16	7,68	2533	20
		Exp	6,13	7,84	1300	22
		Gaus	6,27	7,89	1300	21

De maneira geral, o atributo ADA apresentou-se com dependência espacial de fraca a moderada, contrariando os resultados de Gomes (2005), fato também observado para o atributo areia ajustado por MQP, que também apresentou fraco grau de dependência espacial para todos os modelos utilizados.

Tomando-se como referencia os valores do GD sugeridos por Zimback (2001), conclui-se que o atributo silte ajustado por MQP apresentou forte grau de dependência espacial para o modelo exponencial e moderado para os demais modelos, o atributo argila também apresentou forte grau de dependência espacial para o modelo exponencial ajustado por ambas as metodologias. Nota-se que o alcance dos semivariogramas apresentou valores na mesma magnitude dos atributos físico-hídricos, com variação de 35 a 2533m.

A Tabela 2.6 apresenta os valores referentes aos parâmetros estatísticos gerados pela validação cruzada. O ajuste do modelo exponencial para o atributo Ds por MQP foi o que apresentou o maior grau de dependência espacial (100%), menor efeito pepita, menor erro médio e desvio padrão dos erros, além do menor quadrado médio dos erros sendo indicado para a krigagem deste atributo. Quando se avalia o atributo MO ajustado pelo mesmo modelo, percebe-se que este também apresentou maior grau de dependência espacial (92%) e menor efeito pepita, entretanto foi o que apresentou o maior desvio padrão dos erros e somatório do quadrado médio dos erros, não sendo, portanto, indicado para a krigagem deste atributo. Este comportamento ratifica a afirmação apresentada para os atributos físico-hídricos, de que o GD não deve ser usado como parâmetro exclusivo e definitivo para a seleção do semivariograma. Desta forma, o modelo esférico foi selecionado para a krigagem da MO, pois este também apresentou forte grau de dependência espacial, concordando com os resultados de Gomes (2005).

TABELA 2.6. Erro médio reduzido (\overline{ER}), desvio padrão dos erros reduzidos (S_{ER}) e somatório do quadrado médio do erro ($\sum QME$), gerados pela validação cruzada.

Atributos	Modelo	Método	\overline{ER}	S_{ER}	$\sum QME$
Ds	Esf	MQP	0,01200	2,212947	0,00678
	Exp	MQP	0,00728	1,390092	0,00665
	Gaus	MQP	0,01177	1,469258	0,00691
MO	Esf	MQP	0,02023	1,07191	0,898
	Exp	MQP	0,02416	1,27020	0,995
	Gaus	MQP	0,30159	1,08052	0,987
Areia	Esf	MQP	0,00003	1,01452	0,365
	Exp	MQP	0,00047	1,05512	0,321
	Gaus	MQP	-0,00030	1,06213	0,290
	Esf	MV	0,00445	1,01921	0,357
	Exp	MV	0,00350	1,02714	0,232
	Gaus	MV	0,00388	1,02745	0,354
Silte	Esf	MQP	0,00051	1,08161	0,989
	Exp	MQP	0,00101	1,14580	0,965
	Gaus	MQP	-0,00005	1,07484	0,939
	Esf	MV	0,00038	1,00957	0,898
	Exp	MV	0,00055	1,01026	0,875
	Gaus	MV	0,00001	1,00859	0,825
Argila	Esf	MQP	-0,00107	1,04700	0,125
	Exp	MQP	-0,00005	1,00200	0,119
	Gaus	MQP	-0,00441	1,33800	0,132
	Esf	MV	0,00007	1,00300	0,171
	Exp	MV	-0,00149	1,00300	0,181
	Gaus	MV	-0,00100	1,00200	0,176
ADA	Esf	MQP	-0,00054	1,000054	0,00125
	Exp	MQP	-0,00072	0,997039	0,00136
	Gaus	MQP	-0,00014	0,997017	0,00156
	Esf	MV	-0,00048	1,001823	0,00148
	Exp	MV	-0,00066	1,001348	0,00168
	Gaus	MV	-0,00019	1,002732	0,00194

Os atributos areia, silte, argila e ADA, se ajustaram pelas duas metodologias empregadas. Para o atributo areia, o modelo exponencial ajustado por MV apresenta o melhor ajuste, dado pelo baixo efeito pepita e pelos menores erros médios, desvio padrão dos erros e somatório do quadrado médio do erro. Para o atributo silte, todos os ajustes apresentaram moderado grau de dependência espacial, logo, sugere-se o modelo gaussiano por MV.

O ajuste do modelo exponencial por MQP para o atributo argila apresentou forte grau de dependência espacial, sendo o mesmo indicado para a krigagem deste atributo, por ter apresentado também os menores erros médios e desvio padrão dos erros, além do menor somatório do quadrado médio dos erros gerados pela validação cruzada. O atributo ADA apresentou de baixo a moderado grau de dependência espacial, destacando-se o modelo exponencial gerado pela metodologia dos MQP.

6 CONCLUSÕES

- a) A análise variográfica mostrou que todos os atributos estudados apresentaram-se estruturados espacialmente.
- b) Em termos de ajuste dos semivariogramas a metodologia dos mínimos quadrados ponderados apresentou melhor performance para todos os atributos físicos e físico-hídricos, excetuando-se silte, areia, “ μ ” e θ_{pmp} .
- c) Em termos de modelos de semivariogramas sugere-se o gaussiano para os atributos CTA, k_o , silte e “ μ ”; o esférico para os atributos θ_{cc} , VTP e MO; e, o exponencial para os atributos Ds, argila e ADA, θ_{pmp} e areia.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURROUGH, P. A.; MCDONELL, R. Principles of geographical information systems. Oxford University Press, 1998.

BRUNSDON, C.; FOTHERINGHAM, A. S. CHALTON, M. E. **Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity**. Geographical Analysis, Columbus, v. 28, n. 4, p. 281-298, 1996.

CRESSIE, N. A. C. **Statistic for spatial data**. Revised edition. New York: John Wiley, 1993. 900 p.

DIGGLE, P.J.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Model-based geostatistics. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 14., Caxambú, 2000. **Resumos**, Caxambú: Associação Brasileira de Estatística, 2000, p.192.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTERIO, A. M. V. **Análise especial de dados geográficos**. Planaltina, DF : Embrapa Cerrados; 209 p., 2004.

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)- UFLA, Lavras, MG.

LAMPARELLI, R.A.C.; ROCHA, J.V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, 2001. 118p

LIBARDI, P. L.; FILHO, J. F. M. de. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica, em um experimento de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 30, p. 197-206, 2006.

Mc BRATNEY, A.G.; WEBSTER, A.G. Choosing functions for semivariograms and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, p.617-639, 1986.

- MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; OLIVEIRA, M. S.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 113-126, abr/jun. 2005.
- MELLO, J. M.; BATISTA, J. L. F.; OLIVEIRA, M. S.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariogramas visando a estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Florestalis**, n. 69, p. 25-37, dez. 2005a.
- NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W.; ERH, K. T. Spatial variability of field measured soil water properties. **Hilgardia**, Oakland, v. 42, n. 7, p. 215-259, Feb. 1973.
- RIBEIRO JR, P. P.; DIGGLE, P. P. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R - News**, Rochester, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.
- VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F.; MARIA, I.C. de. Uso de geoestatística no mapeamento de atributos de solo e planta (compact disc). In: **Congresso e feira para usuários de geoprocessamento da América Latina - GIS Brasil 98**, 4., Curitiba, 1998. Anais. Curitiba, 1998.
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, n.6, p.1040-1048, 1981.
- VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. Handbook for Geostatistical Analysis of Variability in Soil and Climate Data. In: **Tópicos em Ciência do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v. 1.
- VIEIRA, V. A. S. da. **Variabilidade espacial da estabilidade de agregados do solo em uma microbacia hidrográfica**. 2005, 100 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-UFLA, Lavras, MG.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.
- ZIMBACK, C.R.L. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia), FCA/UNESP, 2001. 114p.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, p. 29-38, 1934.

CAPÍTULO 3

COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DE DUAS NASCENTES ASSOCIADAS AO USO DO SOLO NUMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DE CABECEIRA

1 RESUMO

JUNQUEIRA JÚNIOR, José Alves. Comportamento hidrológico de duas nascentes associadas ao uso do solo numa sub-bacia hidrográfica de cabeceira. In: **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande- MG**, 2006, Cap.3, p. 65 – 84. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG⁵.

A água é um componente essencial à vida, sendo foco de várias pesquisas quanto ao seu uso, qualidade e recarga subterrânea. Estudos sobre a caracterização físico-hídrica de solos em áreas de recarga de nascentes, são muito importantes, pois, podem indicar a qualidade do uso da terra pelo homem. Neste trabalho monitorou-se o comportamento hidrológico de duas nascentes numa sub-bacia hidrográfica de cabeceira, representativa da Serra da Mantiqueira, associando-o ao uso atual do solo e à variabilidade espacial dos seus atributos físicos e físico-hídricos nas áreas de recarga das nascentes na sub-bacia hidrográfica da Ribeirão Lavrinhas. Para tanto, foram selecionadas duas nascentes em condições distintas de ocupação do solo e sob domínio da mesma unidade pedológica. A vazão foi mensurada ao longo do tempo pelos métodos direto e medidor flume, as áreas de recarga com aparelho GPS e a variabilidade espacial dos atributos mapeada por krigagem. O mapa de uso atual do solo foi gerado a partir de imagem de satélite Landsat de outubro de 2005. A geoestatística mostrou-se capaz de representar a realidade em termos de caracterização físico-hídrica nas áreas de recarga. A utilização de práticas que levam à diminuição da infiltração da água no solo, ou, que tendam a aumentar o escoamento superficial direto, podem diminuir a vazão das nascentes ou até mesmo comprometer a existência das mesmas. O estado de preservação nas áreas de recarga das nascentes definiu o rendimento das mesmas.

⁵ Comitê orientador: Antônio Marciano da Silva e Carlos Rogério de Mello – DEG/UFLA – (Orientadores)

2 ABSTRACT

JUNQUEIRA JÚNIOR, Jose Alves. Hydrological behavior of two springs related to soil use in the headwater watershed. In: Flow base springs related to spatial variability of soil physical attributes and soil agricultural use in the headwater watershed of Alto Rio Grande Region, MG. 2006, Chap.3, p. 65 - 84. Thesis (Master degree in Agricultural Engineering- Irrigation and Drainage), Federal University of Lavras. Lavras - MG⁶.

Water is essential for life. Some scientific research related to its use, quality and underground recharge have received special attention. Studies for physical-hydric characterization in springs recharge areas are very important, and they can indicate soil use quality. The purpose of this work was to monitor the hydrological behavior of two springs in headwater watershed representative of Mantiqueira Mountains region, and to associate this behavior at to current soil use and spatial variability of soil attributes in recharge areas of springs belong to Lavrinhas watershed. Two springs in specific conditions of soil use in same soil pedologic unit had been selected. Flow base was monitoring by direct and flume methods, recharge areas were determined with GPS device and spatial variability of soil attributes by kriging. Current soil use map was generated from Landsat satellite image of October, 2005. Geoestatistic analyses have demonstrated able to represent soil attributes characterization in recharge areas. Soil management practices which lead to reduction of soil water infiltration and to increase the surface runoff can reduce the springs flow base, compromising the perennial flow in that conservation units. Situation of conservation of springs recharge areas defined its water generation capacity.

⁶ Guidance committee: Antônio Marciano da Silva, Carlos Rogério de Mello – DEG/UFLA.

3 INTRODUÇÃO

A degradação dos recursos naturais, principalmente solo e água, vêm crescendo de forma alarmante, atingindo níveis críticos que refletem no assoreamento dos cursos e espelhos d'água e na deterioração do meio ambiente. A água é um componente essencial à vida, sendo foco principal para várias propostas de uso, estudos e base para a caracterização e proteção dos ecossistemas. Além de servir a diversos usos, a água é indicador de qualidade do manejo da terra pelo homem.

O emprego deste recurso para diversas finalidades tem diminuído consideravelmente sua disponibilidade, gerando desafios para se lidar com a escassez em muitas regiões e países. Estudos sobre o uso e ocupação do solo em áreas de recarga de nascentes são cada vez mais necessários, haja vista que, atualmente, estudos referentes à dinâmica da água em áreas de recarga ainda são bastante escassos.

Com estas considerações, ressalta-se a importância de estudos científicos sobre controle ambiental, com aplicação aos estudos de regiões hidrológicas e maior conscientização e envolvimento da sociedade nos desafios referentes à gestão dos recursos hídricos.

Particularmente no caso de nascentes, há notório interesse na preservação e melhoria da qualidade, quantidade e uniformidade na produção de água. O manejo de terras em nível de bacias hidrográficas é uma forma mais eficiente de uso dos recursos de uma região, pois visa a preservação e melhoria da quantidade e qualidade da água.

Quando se trata de nascentes, ressalta-se que, além da quantidade, é desejável uma boa distribuição no tempo, ou seja, que a variação de vazão situe-se dentro de um mínimo adequado ao longo do ano. Isto quer dizer que a bacia não deve funcionar como um recipiente impermeável, com escoamento em

curto espaço de tempo de toda a água recebida durante uma precipitação. A água deve ser absorvida em parte, por infiltração no solo, armazenada no lençol subterrâneo e drenada gradativamente, pelos cursos d'água, mantendo a vazão, inclusive e principalmente, durante os períodos de seca, o que é fundamental tanto para o uso econômico como para a manutenção do regime hídrico do corpo d'água principal.

Procurou-se com este estudo, analisar o comportamento hidrológico de duas nascentes, tendo-se como base os anos de 2004 e 2005, e associá-lo ao uso atual do solo por meio da variabilidade espacial de seus atributos físico-hídricos intimamente vinculados às condições de recarga das mesmas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Medição de vazão

A vazão das nascentes foi mensurada pelos métodos direto e indireto. Para a nascente sob mata, a medição foi realizada com medidor flume, devido aos valores de suas vazões, enquanto que, para a nascente sob pastagem a medição foi realizada pelo método direto em três repetições empregando-se recipiente calibrado (Chevallier, 2001).

A seleção das nascentes se deu segundo dois critérios: estar sob domínio de uma mesma unidade pedológica; com diferente ocupação do solo nas áreas de recarga. Assim monitorou-se, uma nascente ao norte da sub-bacia, sob mata nativa (N1), e outra ao sul, sob pastagem (N2). Em ambas, as avaliações hidrológicas foram realizadas no período compreendido entre os meses de abril e outubro nos anos de 2004 e 2005.

4.2 Quantificação das áreas de recarga das nascentes

As áreas de recarga são fundamentais para definir a potencialidade hídrica da bacia hidrográfica, podendo ser a área acumulada de drenagem em área plana (projeção horizontal), acima da cota altimétrica da nascente e inclusa entre seus divisores de águas (divisores topográficos). Os limites das áreas de recarga foram levantados com GPS E-TREX VISTA, partindo-se da nascente e seguindo-se uma linha que se situa sobre os pontos divisores de água e fechando o polígono na mesma, sendo que a área foi estimada com auxílio do software AutoCAD.

4.3 Quantificação da precipitação

Foi mensurada por uma estação meteorológica digital instalada na sub-bacia do Ribeirão Lavrinhas de onde se obteve a série para o ano de 2005.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Uso atual dos solos da sub-bacia

A caracterização do uso do solo nas áreas de ocupação foi prioridade para toda sub-bacia, sendo que os valores de ocupação do solo nas áreas de recarga serão apresentados na comparação entre as nascentes.

A classificação de imagem para a sub-bacia foi realizada com o auxílio do Software ArcGIS apresentando 4 classes: mata nativa, pastagem, regeneração natural e vegetação de várzea. Esta classificação possibilitou confrontar as áreas de recarga em consequência dos aspectos associados ao uso atual.

Na tabela 3.1 apresentam-se os resultados do uso atual do solo na sub-bacia hidrográfica. Verifica-se a predominância de ocupação por mata nativa e pastagem devido à pecuária leiteira, seguida da regeneração e por último a ocupação por várzea.

TABELA 3.1. Uso do atual solo na sub-bacia do Ribeirão Lavrinhas.

Uso atual	Área (ha)	Percentual (%)
Mata Nativa	284,8	41,5
Regeneração	90,9	13,2
Pastagem	277,8	40,4
Vegetação de várzea	33,5	4,9
Total	687	100

Na Figura 3.1 apresenta-se o mapeamento do uso atual do solo na sub-bacia gerado a partir da classificação da imagem e as áreas de recarga das nascentes monitoradas.

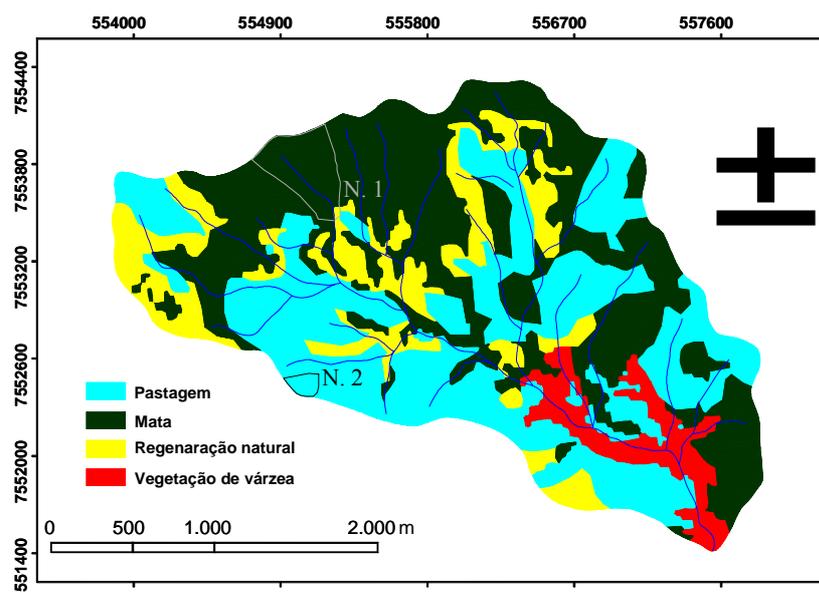


FIGURA 3.1. Uso atual do solo na sub-bacia hidrográfica com a localização das áreas de recarga das nascentes selecionadas.

As pastagens predominantes na sub-bacia geralmente são naturais e de baixa capacidade de suporte, ocorrendo também à presença de pastagens

plantadas, estas, porém, em menor escala, uma vez que a região apresenta grande dificuldade de mecanização agrícola causada pelas declividades acentuadas e solos pouco profundos (Cambissolos). Por ser uma região bastante montanhosa e com grande variação de exposição à radiação solar, a preferência para a formação de pastagens é a face sul da bacia, onde a incidência de luz solar é maior.

Na face norte, a ocupação é predominantemente por mata, cuja formação florestal, classificada por Velloso et al. (1991), é composta de Floresta Ombrófila Densa Montana. Esta área possui camadas de vegetação claramente definidas, com as copas das árvores formando uma cobertura, atingindo em determinados locais cerca de 20 m de altura. Há presença de bambus, samambaias e líquens; tanto nas árvores mais altas como nas mais baixas encontram-se cipós, bromélias e orquídeas. No interior da mata o solo encontra-se protegido por serrapilheira, que chega a atingir até 0,5 m de espessura.

5.2 Caracterização das áreas de recarga das nascentes

5.2.1 Uso do solo das áreas de recarga das nascentes

Na Tabela 3.2 apresentam-se as áreas de recarga e as percentagens de cada tipo de uso dos solos das nascentes estudadas. A nascente 1 apresenta maior área superficial de recarga e seu estado de preservação é privilegiado, sendo que mais de 95% de sua área de recarga está sob proteção de floresta de dossel bem verticalizado. De acordo com Castro et al. (1999), a floresta é importante para a estabilidade das vertentes formadoras de nascentes, aumentando a infiltração da água no solo e evitando a erosão.

TABELA 3.2. Características das nascentes e uso atual de suas áreas de recarga.

Características das nascentes	Nascentes	
	1 (N1)	2 (N2)
Área de recarga (ha)	17,88	2,21
% da sub-bacia	2,60	0,32
Altitude (m)	1426	1453
Tipo de ocupação (%)		
Mata (%)	95,1	0,0
Regeneração (%)	4,9	0,0
Pastagem (%)	0,0	100

Para Tabai (2002), as matas de topos de morros funcionam como verdadeiras esponjas, absorvendo grande parte da água das chuvas e liberando-a lentamente para o solo, propiciando a infiltração e a percolação no perfil. Desta forma, as florestas favorecem a recarga dos aquíferos. A presença da cobertura florestal propicia aumento no teor matéria orgânica e porosidade total do solo, e conseqüentemente, diminuição da D_s , como pode ser visto nas Figuras 3.3b, 3.3a e 3.2a, respectivamente. Logo, esta formação florestal pode ser considerada como fator importante para o suprimento de água para os aquíferos e conseqüentemente para ciclo anual da vazão da nascente.

A nascente 2 (pastagem) apresenta área de recarga consideravelmente menor que a nascente 1 (mata), o relevo apresenta-se com declividade maior que 45° , sendo que o uso atual do solo nas suas adjacências é totalmente de pasto não nativo, apresentando o menor índice de vegetação no seu entorno com pequenos arbustos que envolvem a nascente no raio de 5 metros. Na área de recarga não há presença alguma de um estado sussecional da vegetação e nem vegetação ciliar ao longo da linha de drenagem. O manejo da samambaia silvestre se faz presente em seu entorno e na vertente acima, além disso, apresenta indícios de queimadas regulares. A nascente tem alto grau de degradação, as áreas de preservação permanente estão irregulares e o tributário é desviado da sua vertente original e segundo Pinto (2003), a mesma pode ser classificada como degradada.

Não foi constatada a adoção de práticas de manejo conservacionista, e nota-se que a nascente sofre diretamente as conseqüências do pastejo em sua área de recarga com indício de assoreamento. O pisoteio do gado promove a compactação do solo, aumentando a densidade do solo e diminuindo a condutividade hidráulica, como pode ser visto nas Figuras 3.2a e 3.2b, dificultando a recarga do aquífero e promovendo o escoamento superficial direto. Segundo relato de moradores desta sub-bacia, o volume de água da nascente 2 tem diminuído gradativamente ao longo dos anos chegando a quase desaparecer nos meses de seca.

5.2.2 Variabilidade espacial do solo nas áreas de recarga das nascentes

Nas Figuras 3.2a e 3.2b são apresentados os mapas da variabilidade espacial da densidade e da condutividade hidráulica do solo com a delimitação das áreas de recarga das nascentes monitoradas na sub-bacia hidrográfica, obtidos por meio da krigagem. Confrontando estas figuras, observam-se menores valores de densidade e maiores valores de condutividade hidráulica no lado norte da sub-bacia, local onde se situa a nascente 1 com predominância de mata em sua área de recarga, o que confere ao solo boas condições de infiltração além de um alto teor de matéria orgânica, conforme Figura 3.3b, justificando sua baixa densidade. Verifica-se que a D_s na área de recarga da nascente 2 está próxima de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto que para a nascente 1 está próxima de $1,0 \text{ g cm}^{-3}$, comprovando o efeito do uso atual sobre este atributo, refletindo diretamente nos atributos volume total de poros, condutividade hidráulica, porosidade drenável e capacidade total de armazenamento, e conseqüentemente, na recarga dos aquíferos e em vazões específicas distintas.

As pressões aplicadas pelo pisoteio do gado na área de recarga da nascente 2 vem ocasionando modificações em alguns atributos, notadamente na densidade, causando perturbação nas condições de infiltração, restringindo o

fluxo de água e comprometendo a recarga do aquífero. Este fato vem favorecer o escoamento superficial direto, promovendo gradativamente o assoreamento da nascente, conforme relatado por moradores locais e comprovado pela alta variação de sua vazão ao longo dos meses de observação. De acordo com Bertol et al. (2000), o manejo de animais sobre as pastagens implica em modificações nas propriedades físicas do solo a longo e médio prazo. Fernandez (1987) constatou que o excessivo tráfego de animais causa compactação e adensamento do solo, o que se traduz em altos valores da D_s , reduzindo a porosidade total como é apresentado pela Figura 3.3a.

Uma vez que a D_s restringe o fluxo de água no solo comprometendo o abastecimento do aquífero, as pastagens presentes nesta encosta são pobres, pois o aumento da D_s também dificulta a penetração do sistema radicular e diminui a aeração do solo. Esta situação promove o aumento do escoamento superficial, principalmente no período em que se iniciam as chuvas, quando as pastagens se encontram em suas piores condições. Fato que explica a alta variação nas leituras de vazão da nascente monitorada sob pastagem, onde pequenas variações na precipitação causaram grande variação na vazão em curto prazo. Assim, o uso adequado do solo e práticas de conservação são de extrema importância para que se possa permitir a interceptação da água da chuva, reduzir a velocidade e o escoamento superficial, e aumentar a infiltração, possibilitando recarga do aquífero, que é responsável pela alimentação das nascentes.

Efeitos na porosidade podem se relacionar mais estreitamente à condutividade hidráulica, dependendo do arranjo, uniformidade e forma das partículas, afetando a capacidade de armazenamento para os solos da área de recarga. Outras propriedades como teor de MO e VTP podem influenciar a densidade dos solos. Desta forma, para um melhor entendimento do comportamento da dinâmica da água nas áreas de recarga das nascentes, também são apresentados os mapas de VTP, MO, “ μ ” e CTA.

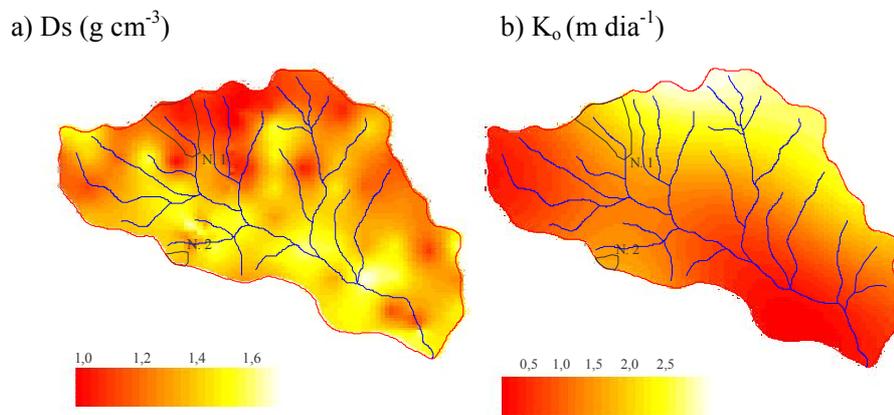


FIGURA 3.2. Distribuição espacial da D_s (g cm^{-3}) e da K_o (m dia^{-1}) nas áreas de recarga das nascentes monitoradas.

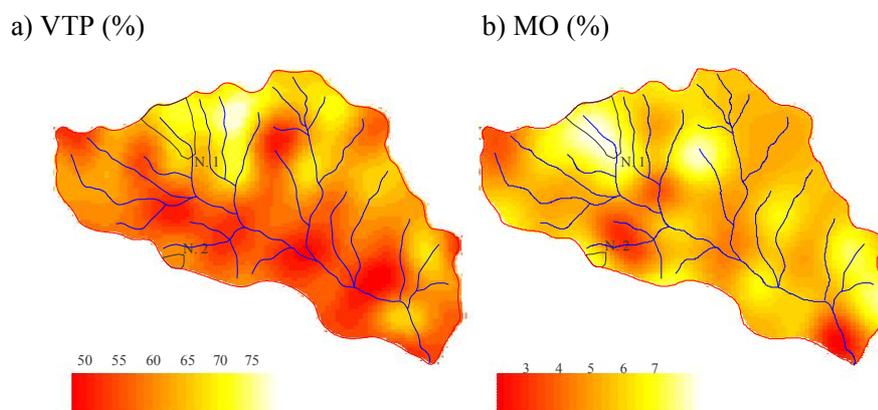


FIGURA 3.3. Distribuição espacial do VTP (%) e da MO (%) nas áreas de recarga das nascentes monitoradas.

Analisando-se os mapas referentes ao VTP e MO (Figuras 3.3a e 3.3b), percebe-se diferença considerável na tonalidade das cores quando se compara as áreas de recarga das nascentes, com manchas indicativas de maiores percentuais

destes dois atributos na região de recarga da nascente 1, ocupada por mata nativa. Diante desta situação, há condições favoráveis ao acúmulo de serrapilheira, o que foi constatado na campanha de campo, culminando com maior percentual de MO detectado pelas análises e mapeado pela krigagem, fato que promove a redução da D_s , aumento da VTP e " μ ", redução da CTA e aumento da condutividade hidráulica, possibilitando condições favoráveis à recarga.

O fato da sub-bacia ser ocupada, na sua maior parte por mata (41,5 %) e pastagem (40,4%) explica a alta variabilidade dos teores de matéria orgânica encontrados (3,0 a 8,0 %). A presença deste atributo é de suma importância, pois atenua o impacto das gotas de chuva, evitando a compactação e o salpicamento do solo, altera a distribuição de poros, facilita a infiltração e conseqüentemente cria condições favoráveis de recarga dos aquíferos (Moraes et al. 2003). Atributos como a densidade do solo e o teor de matéria orgânica herdam influência do manejo empregado no uso e ocupação das terras. Por isso, tais atributos podem ser considerados bons indicadores das condições de uso, ocupação e equilíbrio dos recursos presentes nas sub-bacias hidrográficas.

A distribuição espacial do atributo VTP ao longo da extensão geográfica da sub-bacia é apresentada pela Figura 3.3a. Assim como os demais atributos, este também se mostra com grande variação, estando entre 50 a 75 (%). Fazendo-se associação da distribuição do VTP com D_s , MO, k_o e CTA, nota-se grande relação entre estes, principalmente nas áreas de recarga das duas nascentes monitoradas. Esta constatação reflete a interação do uso atual do solo nas áreas de recarga com o tipo de solo predominante, já que se trata da mesma unidade pedológica.

Na Figura 3.4a apresenta-se a distribuição espacial da porosidade drenável (μ) na sub-bacia, e por meio desta pode-se inferir importantes observações sobre os fluxos dinâmicos nas áreas de recarga das nascentes. Este

atributo, assim como os demais, apresenta-se bem caracterizado na sub-bacia, com seus valores diminuindo no sentido norte-sul, verificando-se também neste sentido, aumento da Ds e redução da VTP. A combinação destes atributos é determinística do comportamento hidrológico analisado. Comparando-se as áreas de recarga das nascentes monitoradas nota-se grande diferença deste atributo, com seus valores próximos a 38 % para a nascente 1 e aproximadamente 32 % para nascente 2. Este fato vai ao encontro do que foi anteriormente descrito para os atributos Ds e VTP, de que na região da nascente 2 está havendo aumento da parcela do escoamento superficial direto. A Figura 3.4b representa a CTA nas áreas de recarga das nascentes monitoradas e reforçam os comentários sobre os demais atributos, pois apresenta armazenamento superior na área de recarga da nascente 2, comprometendo a recarga do aquífero responsável pela alimentação desta nascente.

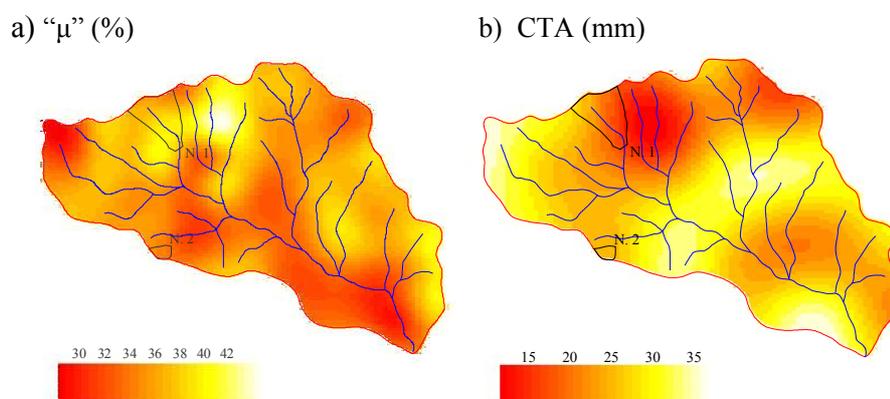


FIGURA 3.4. Distribuição espacial da porosidade drenável “ μ ” (%) e da CTA (mm) nas áreas de recarga das nascentes monitoradas

5.2.3 Rendimento específico das nascentes

As diferenças nas áreas de recarga das nascentes podem refletir diretamente no rendimento hídrico das mesmas. Para se analisar a recarga dos aquíferos, deve-se conhecer as relações que envolvem a dinâmica deste sistema, como por exemplo, o tamanho e o tipo da área de recarga, vegetação predominante, práticas de manejo, tipo de solo e comportamento dos atributos físico-hídricos do meio poroso ao longo de seu perfil.

Baseando-se na série histórica de vazão para os anos de 2004 e 2005, apresentadas na Tabela 3.3, obteve-se o gráfico da vazão específica em função do tempo apresentado nas Figuras 3.5 e 3.6, e o gráfico da variação percentual em função do intervalo entre medições apresentado na Figura 3.7.

TABELA 3.3. Série histórica de vazão para as nascentes monitoradas.

Vazão (L s ⁻¹)					
Ano 2004					
Nascente	10/abr	11/jun	5/ago	1/out	5/nov
Mata	7,3	4,92	3,237	2,579	3,098
Pastagem	0,214	0,101	0,053	0,032	0,113
Vazão (L s ⁻¹)					
Ano 2005					
Nascente	22/abr	3/jul	21/set	20/out	
Mata	6,563	4,324	2,411	1,532	
Pastagem	0,106	0,023	0,010	0,007	

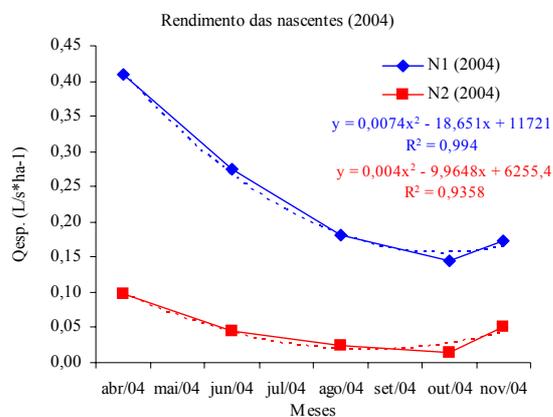


FIGURA 3.5. Rendimento específico das nascentes no ano de 2004.

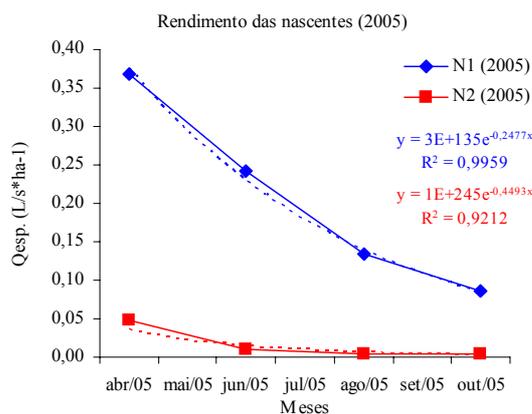


FIGURA 3.6. Rendimento específico das nascentes no ano de 2005.

A análise dos dados permite constatar que a nascente 1 sob mata nativa, apresenta maior rendimento específico e menor variação deste ao longo do tempo, em ambos os anos monitorados, do que a nascente 2. Uma possível explicação pode se basear no tipo de cobertura, que conforme já discutido, influencia sobremaneira o processo de coleta das precipitações e sua

distribuição. Neste caso a cobertura sob forma de mata, além de interceptar, retém grande parcela da precipitação dando maior tempo de oportunidade para o processo de infiltração e, portanto recarregando de umidade o perfil do solo e por consequência o lençol. Além do mais a área de coleta é muito superior cerca de 8 vezes, o que de certo modo permite presumir um aquífero com reservatório de maior porte e com maior capacidade de escoamento e com maior inércia, refletindo numa menor taxa de variação tanto na depleção quanto na ascensão.

Isto é fundamental tanto para o uso econômico da água como bebedouros ou irrigação como para a manutenção do regime hídrico do corpo d'água principal, garantindo a disponibilidade de água no período do ano em que realmente mais se precisa dela. Neste contexto é apresentada a Figura 3.7, que representa a variação mensal da vazão específica em termos percentuais.

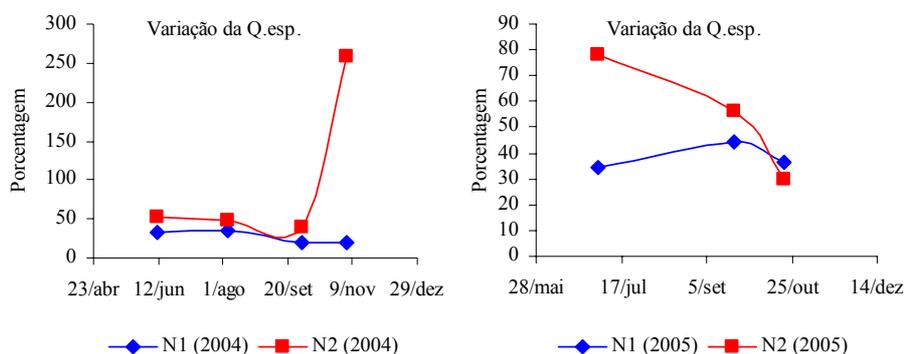


FIGURA 3.7. Variação percentual da vazão específica mínima nos dois anos de monitoramento.

Para a nascente 2, nota-se uma considerável variação do rendimento específico para os dois anos de monitoramento, chegando a apresentar entre os meses de outubro e novembro de 2004 uma variação de 260 %. Esta grande amplitude de variação pode ser atribuída às condições de infiltração, escoamento superficial e armazenamento de água em suas áreas de recarga, assim como, o

estado da cobertura vegetal na área de recarga, uma vez que nesta época do ano (set/out) as pastagens se apresentam demasiadamente depauperadas deixando o solo exposto em muitos locais, apresentando início de erosão laminar.

Nota-se pela Figura 3.8, que no período compreendido entre os meses de abril e julho de 2005 a precipitação se apresentou com comportamento oscilatório, ora diminuindo, ora aumentando. Esta variação ocasionou também variação na vazão das nascentes. Porém, esta não foi tão pronunciada na nascente sob mata nativa, como foi apresentado na Figura 4, onde os percentuais de variação se situam entre 30 e 40%. A grande vantagem da mata seja natural ou reflorestada, reside na sua grande capacidade de retenção da água das chuvas pelas árvores e serrapilheira.

Algumas das características importantes observadas na mata nativa com vistas à otimização da recarga do aquífero e o conseqüente fluxo das nascentes podem ser as atenuações do impacto das gotas da chuva pelo dossel, e o sistema radicular bem desenvolvido, estabilizando o solo e mantendo-o com boas características de infiltração e recarga.

No período seco, porém, as árvores passam a consumir grandes quantidades de água do solo chegando até quase esgotá-lo. Castro et al. (2001) citam o exemplo das nascentes da comunidade rural de Paraíso, MG, que nos anos 60 eram responsáveis pelo abastecimento de água da cidade de Viçosa. Citam que as nascentes dessa região secaram à medida que houve a substituição de pastagens pelo aumento progressivo da regeneração natural de florestas secundárias, atribuindo à ocupação intensiva e sem controle das árvores nas partes baixas e na meia encosta aumentando a evapotranspiração localizada. Por outro lado, Lima (1986), aponta que para as nascentes, quando se estuda o efeito da floresta sobre a água subterrânea não é possível ter-se uma conclusão generalizada, uma vez que os fatores envolvidos na origem e na dinâmica da nascente são complexos e poucos são os trabalhos disponíveis abordando este

assunto. Além disso, é fundamental considerar variabilidade espacial dos atributos do solo e suas influencias na dinâmica da água nas áreas de recarga.

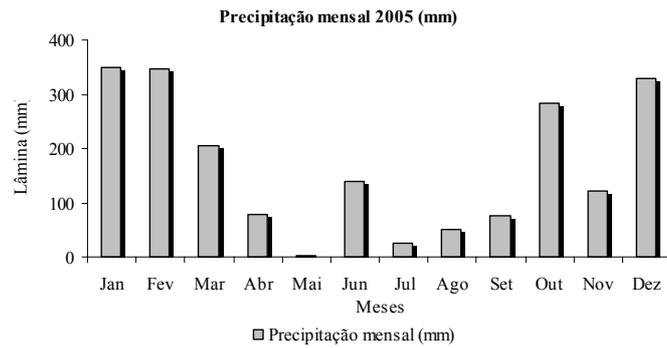


FIGURA 3.8. Precipitação mensal para o ano de 2005 na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinhas.

6 CONCLUSÕES

- a) A utilização da geoestatística por meio das técnicas da krigagem mostrou-se capaz de representar a realidade em termos de variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos nas áreas de recarga das nascentes monitoradas, sendo uma importante ferramenta no contexto ambiental.
- b) O comportamento dos valores dos atributos físicos e físico-hídricos mostrou coerência com o comportamento do rendimento específico das nascentes.
- c) O porte da área de recarga, o uso do solo e o estado de preservação das áreas de recarga das nascentes influenciaram no valor e no comportamento temporal do rendimento específico das mesmas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. de.; ALMEIDA, E. X.; KURTZ, C. 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.

CASTRO, P. S. Bacias de cabeceira: Verdadeiras caixa d'água da natureza. **Ação ambiental**. Viçosa. V. 1. n. 3. p. 9-11. dez./jan. 1999.

CASTRO, P. S.; LOPES, J. D. S. Recuperação e conservação de nascentes. Centro de Produções Técnicas. **Serie Saneamento e Meio-Ambiente**, Manual nº 296. Viçosa, 84p., 2001.

CHEVALLIER, P. Aquisição e processamentos de dados. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2001. p. 483-525.

FERNANDEZ, B.M. **Prática de Física do Solo**. Programa de Treinamento e Capacitação de Recursos Humanos em Agricultura Irrigada. Escola Superior de Agricultura de Mossoró - RN, 98p. 1987.

LIMA, W. de P. **Princípios de hidrologia vegetal para o manejo de bacias hidrográficas**. Apostila, ESALQ/USP, p242, mar/abr, 1986.

MORAES, J. M.; SCHULER, A. E.; GUANDIQUE, M. E. G.; MILDE, L. C.; GROppo, J. D.; MARTINELLI, A. L.; VICTORIA, R. L. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 61-70, jan./mar. 2003.

PINTO, L. V. A. **Caracterização física da sub-bacia do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG, e proposta de recuperação de suas nascentes**. 2003. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-UFLA, Lavras, MG.

TABAI, F. C. V. **Manual de Procedimentos técnicos de restauração florestal em áreas de preservação permanente**. Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios PCJ -, Piracicaba, 4p. 2002.

VELLOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. Classificação da vegetação brasileira, adaptado a um sistema universal. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 123 p.