



CAMILA CRISTINA ALVARENGA

**INDICADORES HIDROLÓGICOS DO SOLO
PARA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS
POTENCIAIS DE RECARGA SUBTERRÂNEA**

**LAVRAS – MG
2010**

CAMILA CRISTINA ALVARENGA

**INDICADORES HIDROLÓGICOS DO SOLO PARA
IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS DE
RECARGA SUBTERRÂNEA**

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

Orientador
Dr. Carlos Rogério de Mello

**LAVRAS – MG
2010**

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

Alvarenga, Camila Cristina.

Indicadores hidrológicos do solo para identificação de áreas
potenciais de recarga subterrânea / Camila Cristina Alvarenga. –
Lavras : UFLA, 2010.

81 p.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Carlos Rogério de Mello.

Bibliografia.

1. Condutividade hidráulica saturada. 2. Índice de qualidade. 3.
Solo. 4. Bacia hidrográfica. 5. Geoestatística. 6. Atributos
hidrológicos. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.432

CAMILA CRISTINA ALVARENGA

**INDICADORES HIDROLÓGICOS DO SOLO PARA
IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS POTENCIAIS DE
RECARGA SUBTERRÂNEA**

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

APROVADA em 19 de julho de 2010.

Dr. Antônio Marciano da Silva UFLA

Dr. José Márcio de Mello UFLA

Dr. Carlos Rogério de Mello
Orientador

LAVRAS – MG

2010

A Deus, pois sem Ele nada seria possível!

A Helenice, minha mãe, querida amiga e companheira, pelo seu amor e apoio incondicional.

A Glória, minha avó e eterna professora, pela sua presença carinhosa e por ser minha principal mentora nos assuntos educacionais e morais;

A Vicente, meu avô, que liberto de qualquer apego pessoal tomou uma decisão corajosa que me proporcionou o acesso à educação de qualidade;

As minhas tias, Emilce e Maria Alice, pelo suporte e amor.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Carlos Rogério de Mello pela orientação, dedicação e paciência que foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela oportunidade de realização do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo no período de março de 2009 a julho de 2010 e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro (PPMIV060).

Aos demais professores do Departamento de Engenharia da UFLA, em especial aos professores Dr. Antônio Marciano da Silva, Dr. Alberto Colombo, Dr. Élio Lemos e Dr. Jacinto de Assunção Carvalho, pelos ensinamentos transmitidos durante a realização do mestrado.

A todos os colegas de Pós-Graduação, em especial ao Fábio Ponciano, à Lidiane Borges, à Milena e Rosângela, ao Márcio Adalberto, Gabriel Ferraz, Murilo, à Denise e ao João.

Ao Marcelo Viola e ao Léo Ávila pelos ensinamentos transmitidos para a utilização do software ArcGis.

Ao Marcelo Ribeiro e ao José Luiz, pelo apoio nas análises laboratoriais e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADA!!!

RESUMO

A bacia hidrográfica vem sendo proposta como unidade básica de planejamento e gestão dos recursos naturais. Por esta razão, este estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande localizada na região sul do estado de Minas Gerais, apresentando área de drenagem da ordem de 6270 km², e extremamente importante do ponto de vista de produção de água e conseqüentemente, de aproveitamentos hidrelétricos. Este trabalho teve por objetivo estudar a continuidade espacial do atributo hidrológico do solo condutividade hidráulica saturada (k_0), utilizando dados com e sem transformação logarítmica como também empregando um Índice de Qualidade do Solo associado à recarga de água subterrânea (IQS_{RA}). O mapeamento de k_0 e do IQS_{RA} foi realizado por meio de técnicas geoestatísticas. Os modelos de semivariogramas esférico, exponencial e gaussiano (apenas para o IQS_{RA}) foram ajustados ao semivariograma experimental pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) e mínimos quadrados ponderados (MQP). Para a validação do IQS_{RA} , foi avaliada a participação do deflúvio base no deflúvio total para quatro sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande tendo como referência a distribuição espacial do IQS_{RA} . Os resultados mostraram que há redução de pontos discrepantes e de anisotropia ao se trabalhar com o logaritmo dos dados de k_0 . Entretanto, os valores mais elevados de grau de dependência espacial são observados para os dados sem transformação. Através do método MQO, o ajuste do modelo esférico foi o que produziu melhor desempenho na modelagem da continuidade espacial de k_0 tendo como referência os dados com e sem transformação logarítmica. Os mapas de k_0 e $\log(k_0)$ apresentaram valores similares, sendo que o mapa dos dados na forma transformada apresentou melhor detalhamento da distribuição espacial. O modelo gaussiano -- ajustado por MQO -- produziu a melhor modelagem da continuidade espacial do IQS_{RA} para a Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande. O modelo esférico -- ajustado por MQO -- foi aplicado ao mapeamento do IQS_{RA} para as sub-bacias hidrográficas do Ribeirão Lavrinha e Jaguará. O IQS_{RA} gerado mostrou-se uma ferramenta importante para avaliação do potencial de recarga subterrânea, uma vez que o mesmo reflete a influência do uso e manejo do solo no comportamento do deflúvio base.

Palavras-chave: Condutividade hidráulica saturada. Índice de qualidade do solo. Bacia hidrográfica. Atributos hidrológicos do solo. Geoestatística.

ABSTRACT

The watershed has been proposed as the basic unit for planning and management of the natural resources. For this reason, this study was developed in Alto Rio Grande Basin, located in the South of the Minas Gerais State, presenting drainage area close to 6270 km², and highly important for the water yield and consequently, for hydroelectric power plants implementation. This work aimed to study the spatial continuity of the soil hydrologic attribute saturated hydraulic conductivity (k_0), using the data base with and without logarithmic transformation. Besides, a Soil Quality Index (SQI) related to the groundwater recharge was proposed and mapped for Alto Rio Grande Basin. The k_0 and SQI mapping were developed based on geostatistical procedures. Exponential, spherical and Gaussian (the latter only for SQI) semi-variogram models were fitted to the experimental semi-variogram using two approaches: ordinary minimum square (MQO) and weighted minimum square (MQP). For validation of the SQI, it was evaluated the participation of the base flow on the total flow from 4 watersheds of the Alto Rio Grande Basin taking into account the spatial distribution of the SQI. The results showed that k_0 with logarithmic transformation produced lesser outliers and anisotropy reduction; however, the highest spatial dependency degree was observed for the k_0 without transformation. Spherical model fitted by MQO approach produced better performance for spatial continuity modeling of k_0 considering the data base with and without logarithmic transformation. The maps developed from the data base with and without transformation have presented similar values, with the map based on data set transformed presenting better spatial distribution. Gaussian model fitted by MQO produced better performance for spatial continuity modeling of the SQI in Alto Rio Grande Basin. Spherical model fitted by MQO was applied for the mapping of the SQI in Jaguara and Lavrinha watersheds. The SQI proposed consists of an important tool to evaluate the groundwater recharge potential since it was sensitive to the influence of different land-use and soil management on the base flow behavior.

Keywords: Saturated hydraulic conductivity. Soil quality indexes. Watershed. Soil hydrology attribute. Geostatistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mapas de solos (a) e uso do solo (b) da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande.	37
Figura 2	Localização e detalhamento dos pontos amostrados na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG.	38
Figura 3	Distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada com dados sem (a) e com transformação (b).....	53
Figura 4	Pontos amostrados e localização das sub-bacias na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande.....	64
Figura 5	Distribuição espacial do IQS_{RA} para a bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG.....	73
Figura 6	Distribuição espacial do IQS_{RA} para sub-bacia hidrográfica do (a) Ribeirão Jaguara e (b) Ribeirão Lavrinha.	76

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Gráficos “boxplot” para os dados sem transformação (a) e transformados (b).	42
Gráfico 2	Gráficos de tendência para os dados de condutividade hidráulica saturada sem transformação.	43
Gráfico 3	Gráficos de tendência para os dados de condutividade hidráulica saturada transformados.....	43
Gráfico 4	Histograma de frequência para dados sem transformação (a) e transformados (b).	45
Gráfico 5	Estrutura de dependência espacial para as quatro direções com os dados sem transformação (a) e transformados (b).....	46
Gráfico 6	Semivariogramas experimentais e teóricos para os dados de condutividade hidráulica saturada sem transformação (a) e transformados (b).	47
Gráfico 7	Curvas de normalização para os indicadores do IQS_{RA} para a bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Estatísticas descritivas dos dados de condutividade hidráulica saturada com e sem transformação logarítmica	44
Tabela 2	Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os dados sem transformação	48
Tabela 3	Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os dados transformados	49
Tabela 4	Validações cruzada e preditiva para os dados de condutividade hidráulica saturada sem transformação	50
Tabela 5	Validações cruzada e preditiva para o logaritmo dos dados de condutividade hidráulica saturada	51
Tabela 6	Valores dos parâmetros aplicados para normalização dos indicadores	69
Tabela 7	Indicadores hidrológicos das sub-bacias hidrográficas do Alto Rio Grande considerados na validação do IQS _{RA}	74

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 Introdução Geral	12
1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Geostatística	14
2.2	Atributos hidrológicos do solo e sua variabilidade espacial	18
2.3	Índice de qualidade do solo	22
2.4	Processo de recarga de água no solo	24
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	26
	REFERÊNCIAS	27
	CAPÍTULO 2 Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG	32
1	INTRODUÇÃO	34
2	MATERIAL E MÉTODOS	36
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
3.1	Análise exploratória e estatística básica dos dados	42
3.2	Avaliação da continuidade espacial dos dados	45
3.3	Mapeamento da condutividade hidráulica saturada	52
4	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS	56
	CAPÍTULO 3 Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG	59
1	INTRODUÇÃO	61
2	MATERIAL E MÉTODOS	63
2.1	Desenvolvimento do Índice de Qualidade do Solo associado à recarga de água subterrânea (IQS_{RA})	63
2.2	Mapeamento do IQS_{RA}	66
2.3	Validação do IQS_{RA} como indicador potencial de áreas de recarga de água subterrânea	68
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
3.1	Normalização dos indicadores do IQS_{RA}	69
3.2	Mapeamento do IQS_{RA} na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande	71
4	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS	80

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

Utilizar os recursos naturais solo e água de forma sustentável será um dos principais desafios enfrentados pela sociedade no desenrolar do século XXI, uma vez que, com o aumento da população mundial e das atividades econômicas, a demanda por produtos agrícolas e industriais aumenta e, conseqüentemente, a pressão sobre estes recursos. Qualquer medida preventiva ou que vise à mitigação dos impactos ambientais promovidos pela ação antrópica deve alicerçar-se na busca de informações do meio físico para o planejamento da ocupação racional das terras e para a gestão ambiental, conciliando desenvolvimento econômico e social com a conservação e proteção dos recursos naturais, contemplando assim os requisitos básicos para o desenvolvimento sustentável.

Devido à necessidade de se encontrar uma forma eficaz de gerenciamento dos recursos ambientais, a bacia hidrográfica vem sendo proposta como unidade básica de planejamento e gestão destes recursos. De acordo com Lanna (1995), o Gerenciamento de Bacia Hidrográfica (GBH) é o instrumento que orienta o poder público e a sociedade no longo prazo, na utilização e monitoramento dos recursos ambientais – naturais e econômicos, de forma a promover o desenvolvimento sustentável. Costa e Nishiyama (2007) salientam que o gerenciamento de bacia hidrográfica representa um poderoso instrumento de planejamento, intervenção e manejo.

Num país em que a economia é impulsionada pelas atividades agrícolas, o conhecimento de técnicas de manejo dos recursos naturais água e solo é

essencial para a preservação ambiental, minimizando assim sérios problemas, tais como erosão do solo causada pela substituição da vegetação natural por outros tipos de cobertura, que proporcionam cobertura deficiente do solo provocando a perda do mesmo e o conseqüente assoreamento dos cursos d'água.

É notório o limitado número de informações disponíveis sobre a continuidade espacial dos atributos hidrológicos do solo afetados pelo seu uso e manejo, bem como suas relações com o potencial destes quanto à recarga de água subterrânea, principalmente no contexto de uma bacia tida como produtora de água. Com base nesta constatação, o índice de qualidade do solo associado à recarga de água, constituído a partir de indicadores intimamente relacionados com a infiltração de água no solo e capaz de captar as influências do uso e manejo do solo, apresenta-se como ferramenta poderosa para identificação das áreas de recarga e, conseqüentemente, nortear o manejo sustentável destas áreas.

Neste trabalho objetivou-se:

- a) Avaliar a continuidade espacial do atributo condutividade hidráulica saturada (k_0) na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande e promover o seu mapeamento por meio de técnicas geoestatísticas;
- b) Verificar a influência da transformação logarítmica dos dados de k_0 sobre a estrutura de dependência espacial deste atributo;
- c) Propor um índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQS_{RA}) para a bacia hidrográfica do Alto Rio Grande e promover o seu mapeamento.
- d) Verificar se o Índice de Qualidade do Solo proposto é sensível à ocupação e manejo do solo e se o mesmo é consistente com alguns indicadores hidrológicos, especialmente relacionados ao escoamento base (ou subterrâneo), observados em sub-bacias de pequeno, médio e grande porte inseridas na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Geoestatística

Há alguns anos, a grande maioria dos modelos, teorias e recomendações presumia solos homogêneos e só considerava a variabilidade em profundidade. Nos dias atuais, com o advento de recursos computacionais mais potentes, esta consideração de homogeneidade não pode ser mais aceita, uma vez que o estudo das características do solo por meio de ferramentas de espacialização -- como a geoestatística -- é plausível mesmo para grandes massas de dados georreferenciados.

A metodologia clássica da estatística considera as variações que ocorrem entre as amostras como casuais, independentes, normalmente distribuídas e não considera a localização dos pontos amostrados nem a continuidade espacial das propriedades do solo (GUIMARÃES, 2000). Carvalho, Silveira e Vieira (2002) destacam que a estatística clássica assume que a variação das características do solo dentro das unidades amostrais não são correlacionadas, e que a média das amostras é o melhor estimador das características de solo em qualquer local na unidade amostral.

A análise exploratória consiste na primeira etapa da análise de um conjunto de dados. Segundo Ribeiro Júnior (1995), o objetivo desta análise é a identificação inicial do comportamento dos dados, sem nenhuma pretensão de inferência. Embora desconsidere a estrutura de dependência espacial, este tipo de análise é importante por permitir a identificação de dados atípicos que exercem algum tipo de influência nas análises geoestatísticas.

Segundo Journel e Huijbregts (1991), a teoria geoestatística, está baseada na observação de que todas as variáveis regionalizadas apresentam uma estrutura particular e que ambos os aspectos (aleatórios e estruturados) da

variável regionalizada são expressos pela linguagem probabilística da “função aleatória”. Os autores definiram o termo variável “regionalizada” como uma variável que está distribuída no espaço e “regionalização” como o fenômeno de acordo com o qual as variáveis regionalizadas são usadas para representar.

Para a aplicação dos procedimentos geoestatísticos é necessário que algumas hipóteses sejam verificadas. A hipótese de estacionariedade de segunda ordem do atributo requer que o valor médio do atributo seja constante e que a covariância entre dois valores do atributo, definido em duas posições distintas, dependa somente do vetor de separação entre as duas posições dentro de uma determinada área (FELGUEIRAS, 1999).

Vieira (2000) destaca que a existência de estacionariedade de segunda ordem implica a existência de uma variância finita dos valores medidos. Esta hipótese pode não ser satisfeita para fenômenos físicos que apresentam capacidade infinita de dispersão. Para tais situações, uma hipótese menos restritiva, a hipótese intrínseca pode ser aplicável. Essa hipótese requer apenas a existência e estacionariedade do variograma, sem nenhuma restrição quanto à existência de variância finita. De acordo com Guimarães (2000), a hipótese intrínseca está contida na hipótese de estacionariedade de segunda ordem, mas a recíproca pode não ser verdadeira. Uma variável regionalizada é intrínseca quando a esperança matemática para esta variável existe e não depende da localização e quando a variância da diferença é finita e independe da localização, dependendo apenas do vetor de separação (MELLO, 2004; VIEIRA, 2000).

O semivariograma é a parte central dos estudos geoestatísticos, sendo capaz de descrever tanto qualitativamente quanto quantitativamente a variação espacial, além de ser o ponto chave na determinação do preditor – krigagem (CRESSIE, 1993; JOURNAL; HUIJBREGTS, 1991; MELLO, 2004).

Os parâmetros do semivariograma são alcance, efeito pepita, patamar e contribuição.

O alcance corresponde ao raio das áreas consideradas homogêneas para as características avaliadas. Os valores de alcance são importantes para o planejamento amostral e devem ser levados em consideração na determinação do número de parcelas para obtenção de representatividade ótima do ponto de vista estatístico e econômico (MELLO et al., 2005).

O efeito pepita revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição, entretanto, é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem (SOARES, 2002).

O patamar é o valor em que o semivariograma se estabiliza. Quando o patamar é atingido, o alcance é determinado, indicando a distância abaixo da qual as amostras apresentam dependência espacial (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1991). A contribuição é a diferença entre patamar e efeito pepita.

De acordo com os critérios propostos por Cambardella et al. (1994), grau de dependência espacial (efeito pepita/patamar) menor que 25%, entre 25 e 75% e superiores a 75%, são considerados como de forte, moderada e fraca dependência espacial, respectivamente.

Andriotti (2003) ressalta que é usual e recomendável calcular os semivariogramas experimentais em pelo menos quatro direções para identificar a possível presença de anisotropia. A anisotropia se manifesta se o conjunto de dados em análise apresentar diferentes estruturas segundo as diferentes direções em que for estudado, ou seja, se existirem direções privilegiadas que condicionaram a gênese do fenômeno sob estudo.

De posse do semivariograma experimental é necessário ajustá-lo a um modelo teórico, ou seja, a uma função matemática que definirá os parâmetros do semivariograma. Os modelos teóricos de semivariograma mais aplicados com patamar são: esférico, exponencial e gaussiano (CRESSIE, 1993; JOURNAL; HUIJBREGTS, 1991). Existem alguns métodos de ajuste dos modelos teóricos ao semivariograma experimental, com destaque para: Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), Máxima Verossimilhança, Estatística Baysiana e empírico (“a olho”) (JOURNAL; HUIJBREGTS, 1991; MELLO, 2004).

A escolha do melhor ajuste pode ser feita por meio de técnicas de validação cruzada e validação preditiva. Na validação cruzada, cada valor original é removido do domínio espacial e, usando-se os demais, um novo valor é estimado para esse ponto (VIEIRA, 2000). Entretanto, segundo Landim (2006), a melhor verificação é aquela baseada na comparação entre os valores estimados e os observados em campo, sendo esta a característica principal da validação preditiva.

Um dos objetivos principais da modelagem do semivariograma é a realização de estimativas em locais não amostrados. A técnica geoestatística para interpolação é denominada krigagem, e consiste de um processo de estimação de valores de uma variável aleatória em locais não amostrados, usando as propriedades estruturais do semivariograma modelado a partir do conjunto de dados amostrados da variável regionalizada (FELGUEIRAS, 1999; GUIMARÃES, 2000; ISAAK; SRIVASTAVA, 1989; JOURNAL; HUIJBREGTS, 1991; MELLO, 2004).

Os pesos de krigagem são obtidos pelo método dos multiplicadores de Lagrange, e atendem à exigência de que a esperança dos erros seja igual a zero e a variância de estimação seja mínima. Estes aspectos fazem com que a variância de krigagem seja a menor entre todos os processos de interpolação, além de se

constituir num estimador não enviesado, ou seja, a soma de pesos é sempre igual a 1 (CRESSIE, 1998; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

2.2 Atributos hidrológicos do solo e sua variabilidade espacial

Segundo Paz-Gonzáles, Vieira e Castro (2000), a variabilidade espacial do solo ocorre naturalmente devido a fatores pedogenéticos. Entretanto, grande parte desta variabilidade pode ocorrer como resultado do uso e manejo do solo. Neste sentido, Roque et al. (2008) destacam que a medida de um atributo em alguns pontos pode revelar grandes variações de valores, pois o solo é o produto da ação de diversos fatores de formação e varia continuamente, principalmente na superfície.

Guimarães (2000) enfatiza que as características e propriedades dos solos possuem variabilidades que podem ser casuais, quando não há uma explicação para sua ocorrência, ou variações que podem ser explicadas pela anisotropia manifestada pelos processos de formação do solo, bem como pelos diferentes tipos de uso e manejo dos mesmos.

Centurion, Beutler e Souza (2004) destacam que a preparação excessiva do solo, a remoção da cobertura vegetal e o estabelecimento de culturas anuais combinados a práticas inapropriadas de manejo provocam um distúrbio no balanço entre solo e meio ambiente, modificando seus atributos físicos, químicos e biológicos, limitando o uso agrícola e deixando o solo mais susceptível à erosão e degradação.

Embora independentes, os fatores ligados ao solo, à superfície e os relacionados ao manejo atuam em conjunto e podem influenciar diretamente a capacidade de infiltração de água no solo (ARAÚJO, 2006).

Gomes et al. (2007) destacaram que a densidade do solo e o teor de matéria orgânica herdam influência do manejo empregado no uso e ocupação

das terras. Desta forma, tais atributos podem ser considerados bons indicadores das condições de uso, ocupação e equilíbrio dos recursos presentes nas bacias hidrográficas. Os pesquisadores concluíram que a densidade do solo numa sub-bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, representativa do domínio dos Latossolos, apresentou valores acima do previsto para esta classe de solos em toda a sua extensão, variando em função da ocupação do solo.

Como simplificação, a porosidade do solo pode ser considerada como tendo duas partes: a porosidade textural e a porosidade estrutural. A porosidade textural ocorre entre as partículas minerais primárias, enquanto a porosidade estrutural compreende as macroestruturas produzidas pelo preparo do solo. A porosidade textural é pouco afetada pelo manejo do solo, enquanto a porosidade estrutural é sensível a fatores de manejo, como compactação e plantio (DEXTER, 2004).

É imprescindível quantificar o teor de água do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente para a determinação do volume de água retido no solo e disponível às plantas. O teor de água na capacidade de campo refere-se à quantidade de água retida pelo solo depois que o excesso tenha sido drenado e o fluxo descendente de água tenha decrescido acentuadamente. Quando o solo se encontra na capacidade de campo, os macroporos estão livres de água e os microporos cheios (KLEIN; REICHERT; REINERT, 2006).

A porosidade drenável -- diferença entre a umidade na saturação e na capacidade de campo -- é um atributo hidrológico importante para o manejo e estudo de fluxos hidráulicos no solo, sendo essencial na modelagem da contaminação do lençol freático e na drenagem propriamente dita (MELLO et al., 2002).

A condutividade hidráulica é um atributo hidrológico que representa a facilidade com que o solo transmite água. O valor máximo de condutividade

hidráulica ocorre quando o solo se encontra saturado, sendo denominada condutividade hidráulica saturada (k_0) (REICHARDT, 1990).

O fato de k_0 ser altamente variável espacialmente pode indicar que este atributo não é representado por uma distribuição de probabilidade simétrica, sendo a distribuição de probabilidade log-normal aquela que melhor se ajusta aos dados observados (MESQUITA et al., 2007).

Guimarães (2000) observou que a alta variabilidade da k_0 dificultou o ajuste do modelo teórico devido à grande dispersão das semivariâncias experimentais o que levou o autor a sugerir a necessidade de realização de amostragens a pequenas distâncias (menos de 10 m entre pontos) para verificar a dependência espacial.

Eguchi, Silva e Oliveira (2003) concluíram que a elevada variabilidade de k_0 pode ser explicada pela heterogeneidade textural e estrutural do solo em estudo, como também pela presença de raízes de plantas, atividade microbiana, rachaduras localizadas ocasionadas pelas épocas de estiagens, entre outros fatores.

Montenegro e Montenegro (2006) trabalharam com 59 dados de k_0 amostrados em uma área aluvial no agreste de Pernambuco na camada sub-superficial do solo e observaram que os valores de k_0 apresentaram elevada variabilidade, variando de 0,07 a 93 m dia⁻¹, e distribuição de frequência log-normal. Para avaliar a estrutura de dependência espacial de k_0 , os pesquisadores trabalharam com o logaritmo dos dados, uma vez que foi confirmada a hipótese de normalidade da variável $\log(k_0)$.

Segundo Moustafa (2000), o fato de a distribuição ser normal ou log-normal não tem significado particular na estimação do variograma, exceto que é frequentemente mais difícil interpretar variogramas com distribuição altamente assimétrica, como a apresentada pelos dados de k_0 . Este pesquisador destaca que um estudo realizado por Moustafa e Yomota (1998) mostrou que o variograma

revelou melhor o caráter da estrutura de dependência espacial de uma distribuição altamente assimétrica de dados de k_0 no Delta do Nilo, usando dados originais que o semivariograma dos dados log-transformados.

Moustafa (2000) determinou valores de k_0 em sete diferentes áreas no Egito para avaliar a variabilidade espacial deste atributo. Os resultados mostraram que os semivariogramas de k_0 ajustados foram caracterizados por altos valores de efeito pepita, o qual está fortemente relacionado com as práticas agrícolas e a geologia natural do solo. Sepaskhah e Ataee (2004) também encontraram valores elevados de efeito pepita e atribuíram tal resultado a alta variabilidade de k_0 para os solos da área estudada.

Estudando a dinâmica hidrológica de duas nascentes na sub-bacia do Ribeirão Lavrinha (Serra da Mantiqueira, MG), Menezes et al. (2009) observaram na nascente sob Mata Atlântica, menor densidade do solo, condutividade hidráulica superior a 2,5 m/dia, porosidade drenável superior a 40% e matéria orgânica acima de 8% e concluíram que estas características associadas proporcionaram melhores condições para infiltração de água e, conseqüentemente, para o processo de recarga do solo. Em contrapartida, na região da nascente sob pastagem, os valores de densidade do solo foram superiores a 1,5 kg dm⁻³, a condutividade hidráulica saturada situou-se abaixo de 1 m/dia e a porosidade drenável foi inferior a 32%, sendo que esse atributo tem relação direta com o movimento de água no solo, e por consequência, com a capacidade de recarga de água no solo.

Ao avaliarem a influência dos diferentes tipos de usos do solo sobre a recarga da zona freática na Bacia Hidrográfica do Rio Uberabinha, Costa e Nishiyama (2007) observaram uma significativa diferença nos valores de infiltração da água entre as áreas ocupadas por atividades agropecuárias e aquelas onde ainda se preservavam as condições naturais.

Pesquisando solos do Distrito Federal, Souza e Campos (2001) afirmaram que a associação entre baixa condutividade hidráulica, pequena espessura e ocupação de relevos mais movimentados confere aos Cambissolos as piores condições de recarga de aquíferos da região. Ao contrário dos Cambissolos, os Latossolos, por ocuparem áreas mais suavizadas, apresentarem maior espessura e com pequenas variações na condutividade hidráulica, constituem as melhores condições para recarga de aquíferos.

2.3 Índice de qualidade do solo

O conceito de qualidade do solo desenvolveu-se nos anos 90 em resposta à crescente ênfase global quanto ao uso sustentável do solo e no foco holístico de que o manejo sustentável do solo requer mais do que controle da erosão (KARLEN; DITZLER; ANDREWS, 2003).

O esforço público e privado para definir e avaliar a qualidade do solo ao redor do mundo vem aumentando. A aparente força que suporta este empenho é o reconhecimento público de que é essencial balancear os recursos finitos do solo com o aumento da população mundial, e que o recurso solo é tão vulnerável a degradação quanto o ar e a água. O lógico é que o Índice de Qualidade do Solo (IQS) possa servir como um indicador da capacidade do solo para a produção sustentável, seguindo o tripé do desenvolvimento sustentável. Entretanto, em muitas regiões, práticas de manejo do solo inferiores continuam a reduzir a qualidade do solo através da erosão e do transporte e deposição de sedimentos, nutrientes e pesticidas (KARLEN; STOTT, 1994).

Gomes e Filizola (2006) destacaram que do ponto de vista das atividades agrícolas, os indicadores físicos assumem importância por estabelecerem relações fundamentais com os processos hidrológicos tais como taxa de infiltração, escoamento superficial, drenagem e erosão. Possuem também função

essencial no suprimento e armazenamento de água, de nutrientes e de oxigênio no solo. Desta forma, os principais indicadores físicos de qualidade do solo sob o ponto de vista agrícola são a textura, estrutura, resistência à penetração, profundidade de enraizamento, capacidade de água disponível, percolação ou transmissão de água e sistema de cultivo.

Indicadores básicos de qualidade do solo devem ser sensíveis às variações de manejo e do clima. Se os indicadores de qualidade do solo forem insensíveis a estas variações, os mesmos serão de pouca utilidade para o monitoramento das mudanças na qualidade do solo e para a sugestão de práticas de manejo que melhore a sua qualidade (DORAN; PARKIN, 1994). Portanto, a base de dados disponível para os diversos tipos de solo, clima, uso e manejo é inestimável para a formulação de padrões, valores críticos e limites para os indicadores de qualidade do solo.

O IQS proposto por Karlen e Stott (1994) é o resultado da soma dos indicadores escolhidos para representar determinada qualidade do solo (como por exemplo, recarga subterrânea de água) multiplicado pelos seus respectivos pesos. Normalmente, cada indicador apresenta uma unidade de medida diferente, sendo necessária uma função de normalização dos mesmos de forma que possam ser expressos numa escala entre 0 e 1. Para realizar esta normalização, Karlen e Stott (1994) propuseram uma equação desenvolvida por Wymore (1993), a qual permite a construção de curvas do tipo “mais é melhor”, “menos é melhor”, “valor máximo ou ótimo”. O tipo de curva a ser escolhida dependerá da função desempenhada pelo indicador no IQS. O somatório dos pesos que constituem o IQS deve ser igual a 1. Desta forma o IQS também apresentará magnitude variando entre 0 e 1. Uma descrição detalhada desta metodologia será apresentada no Capítulo 3.

Karlen e Stott (1994) desenvolveram um IQS relacionado à erosão hídrica e determinaram quatro funções, sendo uma delas associada à infiltração

de água no solo. Esta função foi composta pelos seguintes indicadores e sub-indicadores com os seus respectivos pesos entre parênteses:

- a) condutividade hidráulica (0,60)
 - textura do solo (0,50)
 - conteúdo de água capilar (0,3)
 - densidade do solo (0,2)
- b) porosidade (0,15)
- c) macroporosidade (0,25)
 - presença de raízes (0,4)
 - presença de minhoca (0,6)

2.4 Processo de recarga de água no solo

Todos os componentes sólidos, líquidos e gasosos (as três fases em que a água existe no planeta Terra) são parte do ciclo dinâmico da água. Os fatores que impulsionam o ciclo hidrológico são a energia solar, a força dos ventos, que transportam vapor d'água para os continentes, a força da gravidade responsável pelos fenômenos da precipitação, da infiltração e deslocamento das massas de água. Os principais componentes do ciclo hidrológico são a evaporação, a precipitação, a transpiração das plantas, a percolação, a infiltração e a drenagem (TUNDISI, 2003).

No ciclo hidrológico, uma fração do volume total precipitado é interceptada e o restante atinge a superfície do solo. Parcela desta precipitação que atinge a superfície infiltra no solo. Quando a intensidade de precipitação excede a velocidade de infiltração da água no solo, inicia-se o processo de escoamento superficial. A fração de água que se infiltrou no solo fica sujeita ao processo de evapotranspiração ou movimenta-se em direção a zona saturada promovendo a recarga subterrânea. O escoamento total ou deflúvio total pode

ser entendido como o somatório das contribuições do escoamento superficial, do escoamento sub-superficial e do escoamento subterrâneo.

O escoamento superficial direto ou rápido está diretamente relacionado à recarga pluvial, sendo produzido durante ou imediatamente após a precipitação, levando ainda em consideração os aspectos geomorfológicos e cobertura vegetal da bacia de drenagem. O escoamento base ou subterrâneo -- responsável por manter a perenidade dos rios nos períodos de estiagem -- apresenta uma circulação mais lenta e se encontra associado ao processo de erosão química, sendo derivado de várias fontes no perfil dos solos mais profundos e de aquíferos (FERNANDES; NOLASCO; MORTATTI, 2010).

A agricultura e a pecuária são atividades econômicas indispensáveis na produção de alimentos. Essas atividades têm duas necessidades básicas em comum: o espaço físico e o suprimento de água. Isto faz do desmatamento a primeira consequência prejudicial ao ambiente. A outra é o desenvolvimento destas atividades próximo a rios e lagos. Com isto, o solo desnudo fica exposto à lixiviação da matéria orgânica, inorgânica e compostos químicos, resultando no empobrecimento do solo e conduzindo este material para áreas mais baixas, que em geral convergem para rios e lagos (CARVALHO; SCHLITTLER; TORNISIELO, 2000).

Os cursos d'água estão intimamente relacionados ao ambiente em seu redor, sendo fortemente influenciados pelo uso e ocupação da bacia a qual pertencem. As estratégias de redução da poluição devem ter como metas a diminuição do deflúvio superficial proveniente tanto de atividades de natureza urbana como rural, através de práticas de manejo que garantam a qualidade do solo e da água e a proteção das zonas ripárias, uma vez que estas têm importante papel na diminuição do escoamento superficial (ROCHA; LOUGON; GARCIA, 2009).

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Carvalho, Silveira e Vieira (2002) destacam que a estatística clássica assume que a variação das características do solo dentro das unidades amostrais não são correlacionadas, e que a média das amostras é o melhor estimador das características de solo em qualquer local na unidade amostral. Vários pesquisadores destacam a elevada variabilidade espacial apresentada pelo atributo hidrológico condutividade hidráulica saturada (k_0), conforme pode ser observado no referencial teórico. Diante disso, a estatística clássica mostra-se insuficiente na predição de valores de k_0 para locais não amostrados. Entretanto, conforme ressaltado por Vieira (2000) este trabalho não tem como objetivo desencorajar o uso da estatística clássica, a qual tem seu espaço, potencialidade e limitações. Segundo o pesquisador, é justamente nos problemas em que a estatística clássica tem limitações que a geoestatística tem suas maiores aplicações.

No Capítulo 3, os procedimentos geoestatísticos são empregados no mapeamento do Índice de Qualidade do Solo associado à recarga de água subterrânea (IQS_{RA}) tendo como objetivo a identificação de zonas com maior potencial de recarga de água subterrânea, sendo uma ferramenta fundamental para o manejo sustentável da bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, a qual é estratégica para geração de energia hidrelétrica.

REFERÊNCIAS

- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamento de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. 165 p.
- ARAÚJO, A. R. de. **Solos da bacia do Alto Rio Grande, MG**: base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola. 2006. 345 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 5, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.
- CARVALHO, A. R.; SCHLITTLER, F. H. M.; TORNISIELO, V. L. Relações da atividade agropecuária com parâmetros físicos químicos da água. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 5, p. 618-622, set./out. 2000.
- CARVALHO, J. R. P. de; SILVEIRA, P. M. da; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, ago. 2002.
- CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; SOUZA, Z. M. Physical attributes of kaolinitic and oxidic oxisols resulting from different usage systems. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 47, n. 5, p. 725-732, Sept. 2004.
- COSTA, F. P. M.; NISHIYAMA, L. Utilização do permeâmetro Guelph e penetrômetro de impactos em estudos de uso e ocupação dos solos em bacias hidrográficas. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 8, n. 24, p. 131-143, 2007.
- CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: Wiley, 1993. 900 p.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: part 1, theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3/4, p. 201-214, June 2004.

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

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L. da; OLIVEIRA, M. S. de. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração básica determinadas “in situ”. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, p. 1607-1613, dez. 2003. Edição especial.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica**: o paradigma geoestatístico por indução. 1999. 181 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

FERNANDES, A. M.; NOLASCO, M. B.; MORTATTI, J. Estimativa do escoamento superficial rápido e sua carga em suspensão com a aplicação do modelo de separação de hidrogramas com filtros numéricos: bacia do rio Sorocaba, SP. **Geociências**, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 49-57, 2010.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2006. 8 p.

GOMES, N. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 427-435, 2007.

GUIMARÃES, E. C. **Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa da região do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional**. 2000. 89 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 561 p.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. 5. ed. London: Academic, 1991. 600 p.

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: why and how? **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, n. 3/4, p. 145-156, June 2003.

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

KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 646-650, 2006.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

LANNA, A. **Gerenciamento de bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos**. Brasília: IBAMA, 1995. 171 p.

MELLO, C. R. de et al. Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da microrregião Campos das Vertentes, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 9, p. 1319-1324, set. 2002.

MELLO, J. M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 111 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2004.

MELLO, J. M. de et al. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 113-126, abr./jun. 2005.

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

MESQUITA, M. da G. B. de F. et al. Alternativa para caracterização da condutividade hidráulica saturada do solo utilizando probabilidade de ocorrência. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1605-1609, nov./dez. 2007.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 30-37, 2006.

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

MOUSTAFA, M. M.; YOMOTA, A. Use of a covariance variogram to investigate influence of subsurface drainage on spatial variability of soil-water properties. **Agricultural Water Management**, New York, v. 37, n. 1, p. 1-19, June 1998.

PAZ-GONZÁLES, A.; VIEIRA, S. R.; CASTRO, M. T. T. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 3/4, p. 273-292, Sept. 2000.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1995.

ROCHA, S. A.; LOUGON, M. S.; GARCIA, G. de O. Influência de diferentes fontes de poluição no processo de eutrofização. **Revista Verde**, Mossoró, v. 4, n. 4, p. 1-6, out./dez. 2009.

ROQUE, M. W. et al. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p. 1827-1835, set./out. 2008.

SEPASKHAH, A. R.; ATAEE, T. A simple model to determine saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage. **Biosystems Engineering**, London, v. 89, n. 4, p. 505-513, 2004.

SOARES, A. F. **Uso do módulo "análise" do SPRING, v. 3.6.02, para estudo de dados climáticos**. Campinas: EMBRAPA Informática Agropecuária, 2002. 32 p. (Documentos, 24).

SOUZA, M. T.; CAMPOS, J. E. G. O papel dos regolitos nos processos de recarga de aquíferos do Distrito Federal. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 3, p. 191-198, jul./set. 2001.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 55, n. 4, p. 31-33, dez. 2003.

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

WYMORE, A. W. **Model-based systems engineering**: an introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricotyledon theory of system design. Boca Raton: CRC, 1993. 710 p.

CAPÍTULO 2

Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG

RESUMO

A distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada do solo (k_0) é essencial para estudos relacionados à erosão do solo e escoamento superficial. Este trabalho se propõe a estudar a continuidade espacial do atributo hidrológico k_0 na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG e a realizar seu mapeamento por meio de técnicas geoestatísticas, utilizando dados com e sem transformação logarítmica. Os modelos de semivariogramas esférico e exponencial foram ajustados ao semivariograma experimental pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) e mínimos quadrados ponderados (MQP). Técnicas de validação cruzada e preditiva foram aplicadas para a escolha do melhor modelo. Os resultados mostraram que há redução de pontos discrepantes e de anisotropia ao se trabalhar com o logaritmo dos dados de k_0 . Entretanto, os valores mais elevados de grau de dependência espacial são observados para os dados sem transformação. O ajuste do modelo esférico, através do método MQO, foi o que produziu melhor desempenho na modelagem da continuidade espacial de k_0 . Os mapas gerados a partir dos dados sem e com transformação logarítmica não apresentaram o mesmo comportamento em termos da distribuição espacial dos valores, sendo que o mapa dos dados na forma transformada apresentou melhor detalhamento da distribuição espacial.

Palavras-chave: Infiltração. Geoestatística. Hidrologia do solo.

ABSTRACT

Spatial distribution of the saturated soil hydraulic conductivity (k_0) is essential to carried out studies related to soil erosion and surface runoff. This work proposes to study the spatial continuity of soil hydrology attribute k_0 in Alto Rio Grande Basin, MG state, and to map it based on geostatistical procedures. The data base was used with and without logarithmic transformation. Exponential and spherical semi-variogram models were fitted at to the experimental semi-variogram using two approaches: ordinary minimum square (MQO) and weighted minimum square (MQP). Cross validation and predictive validation were applied to define the best model. The results showed that k_0 with logarithmic transformation produced lesser outliers besides anisotropy reduction; however the highest spatial dependency degree was observed for the k_0 without transformation. Spherical model fitted by MQO approach produced better performance for modeling of the spatial continuity of k_0 . The maps developed from data base with and without transformation have not presented similar behavior in space of basin, with the map based on the data transformed presented spatial distribution more detailed.

Keywords: Infiltration. Geostatistics. Soil hydrology.

1 INTRODUÇÃO

Infiltração é o processo no qual a água proveniente da chuva ou irrigação atravessa a superfície do solo. A taxa de infiltração diminui com o tempo até atingir um valor constante o qual é equivalente à condutividade hidráulica saturada, influenciando todo o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (JULIÀ et al., 2004). Por esta razão, a condutividade hidráulica saturada é um atributo hidrológico imprescindível para a modelagem chuva-vazão, dimensionamento de sistemas de irrigação e drenagem, transporte de solutos no solo, recarga de aquíferos, escoamento superficial e transporte de sedimentos.

No entanto, a determinação da condutividade hidráulica saturada em condições de campo de forma a cobrir toda a área de uma grande bacia hidrográfica é cara, demorada e complexa, especialmente por este atributo apresentar elevada variabilidade espacial (FALLICO; MIGLIARI; TROISI, 2005; MONTENEGRO; MONTENEGRO, 2006; MOUSTAFA, 2000; SEPASKHAH; ATAEE, 2004). Julià et al. (2004) destacam ainda que a combinação de relevo montanhoso, classes de solos variadas e diferentes usos do solo produzem um território complexo, com comportamento hidrológico diversificado.

A krigagem ordinária é um dos principais métodos de interpolação espacial geostatística e vem sendo usada para mapear os atributos hidrológicos do solo de forma mais precisa, gerando mapas com estimativas não tendenciosas para locais não amostrados e com variância de estimação mínima, desde que haja uma modelagem consistente da continuidade espacial (GOMES et al., 2007).

Na literatura, encontram-se trabalhos nos quais os pesquisadores empregaram o logaritmo da condutividade hidráulica saturada em procedimentos

geoestatísticos (MONTENEGRO; MONTENEGRO, 2006; MONTENEGRO; MONTENEGRO; MACKAY, 1999; SEPASKHAH; ATAEE, 2004; SOBIERAJ; ELSENBEER; CAMERON, 2004; SOUZA et al., 2008). A justificativa destes pesquisadores para o emprego desta transformação é a de que a condutividade hidráulica saturada possui alta variabilidade, apresentando distribuição assintótica. Desta forma, a transformação logarítmica dos dados pode facilitar a aplicação das técnicas geoestatísticas, uma vez que haveria redução da assimetria dos dados.

Entretanto, conforme destacado por Montenegro, Montenegro e Mackay (1999), em relação a outros métodos, os procedimentos do tipo “mínimos quadrados” em geoestatística têm a vantagem de requererem o menor número de hipóteses em relação à distribuição de probabilidade dos dados amostrais. Para a aplicação do método dos mínimos quadrados ponderados, não é necessário que os dados estejam em perfeita conformidade com a distribuição normal.

São escassas na literatura pesquisas que investigaram o efeito da transformação logarítmica na estrutura de dependência espacial de k_0 . Neste sentido, este trabalho se propõe a avaliar a continuidade espacial dos dados de k_0 e $\log(k_0)$ e verificar se a transformação logarítmica minimizaria os efeitos provocados pela alta variabilidade espacial apresentada por este atributo, que dificulta o ajuste do semivariograma.

Com base nas hipóteses levantadas acima, este trabalho propõe modelar a continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada na camada superficial do solo na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG, bem como promover o seu mapeamento por meio de técnicas geoestatísticas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, localizada no sul e sudeste do estado de Minas Gerais, possui área de drenagem de aproximadamente 6270 km². É constituída por regiões fisiográficas importantes do ponto de vista de “produção de água”, notadamente, Campos das Vertentes e Serra da Mantiqueira. O clima consiste de Cwa em grande parte da bacia e Cwb na sua cabeceira, conforme metodologia desenvolvida por Köppen (MELLO et al., 2008). Seu relevo é bastante movimentado, apresentando declividade superior a 15% em aproximadamente 90% da área da Bacia. A classe de solos predominante é o Cambissolo, que ocupa aproximadamente 68% da área, seguido pelo Latossolo, com 18%. O uso do solo é dividido em pastagens extensivas (29%), área cultivada (28%), cerrado (21%), florestas (13%) e solo exposto (8%), conforme Figura 1 (ARAÚJO, 2006).

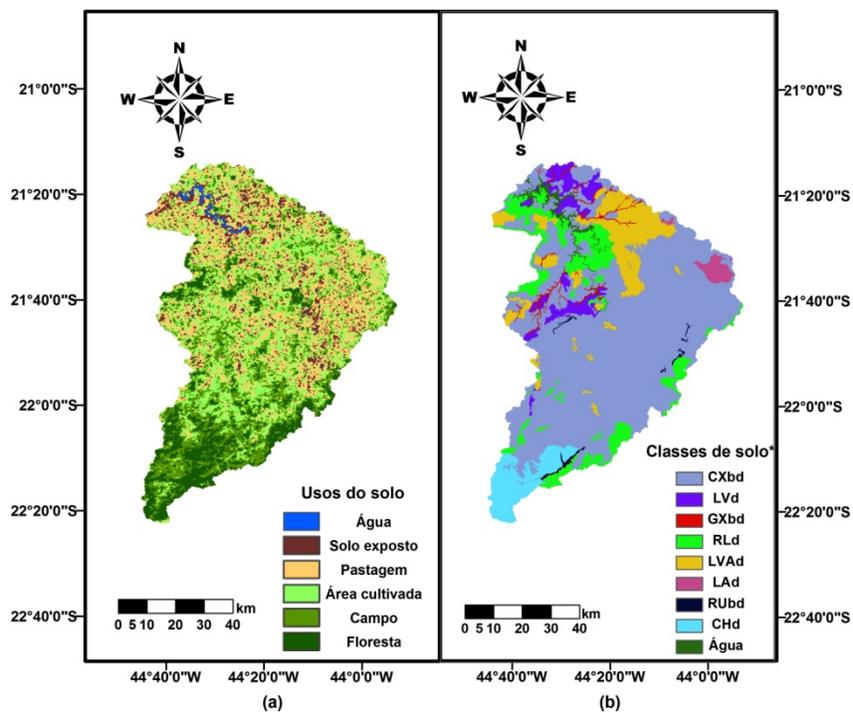


Figura 1 Mapas de solos (a) e uso do solo (b) da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande.

Fonte: Adaptados de Araújo (2006) e Beskow et al. (2009).

*CXbd: Cambissolo Háplico Tb Distrófico; LVd: Latossolo Vermelho Distrófico típico; GXbd: Gleissolo Háplico Tb Distrófico; RLd: Neossolo Litólico Distrófico típico; LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico; LAd: Latossolo Amarelo Distrófico típico; RYbd: Neossolo Flúvico Tb Distrófico típico; CHd: Cambissolo Húmico Distrófico típico.

Para aplicação do método geostatístico foram considerados dados de condutividade hidráulica saturada (k_o), determinada *in situ* através de infiltrômetro de disco (modelo 2825K1) associado aos acessórios do permeâmetro de Guelph (modelo 2800K1), em 537 pontos distribuídos no espaço da Bacia Hidrográfica caracterizando uma amostragem sistemática desencontrada (Figura, 2).

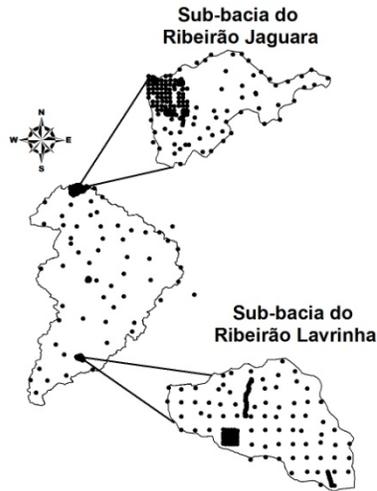


Figura 2 Localização e detalhamento dos pontos amostrados na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG.

Com a finalidade de realizar o mapeamento da condutividade hidráulica saturada para a Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, com base na geoestatística, primeiramente foi realizada a análise exploratória dos dados através de histogramas de frequência, determinação das principais medidas de posição e dispersão, verificação de tendência e gráfico “boxplot” que permitem a identificação de pontos discrepantes (“outliers”).

A análise da continuidade espacial dos dados foi conduzida pela função semivariograma, conforme descrito por Journel e Huijbregts (1991):

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

em que $N(h)$ é o número de pares amostrados $[z(x_i), z(x_i + h)]$ separados pelo vetor h .

Uma vez determinado o semivariograma experimental é necessário ajustá-lo ao semivariograma teórico. Neste trabalho, foram testados dois

modelos de semivariograma caracterizados com patamar e frequentemente ajustados aos atributos físico-hídricos do solo conforme pode ser observado nos trabalhos de Cressie (1993), Gomes et al. (2007), Journel e Huijbregts (1991) e Junqueira Júnior (2008):

a) Modelo esférico

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

$$\gamma(h) = C_0 + C_1; \quad h \geq a \quad (3)$$

b) Modelo exponencial

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

$$a^* = 3a \quad (5)$$

em que C_0 é o efeito pepita; C_1 é a contribuição; h é a distância entre pares de pontos; a é o alcance; a^* é o alcance prático e d a máxima distância na qual o semivariograma é definido.

Os modelos foram ajustados ao semivariograma experimental pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) e mínimos quadrados ponderados (MQP).

A escolha do melhor modelo ajustado foi realizada com base nas validações cruzada e preditiva. Para esta última, um conjunto com 100 valores de condutividade hidráulica saturada, que não faz parte do ajuste do modelo de semivariograma, foi aplicado. Esta técnica consiste em estimar o valor de condutividade hidráulica saturada para um ponto onde o valor deste atributo seja conhecido através de interpolação por krigagem ordinária (Equação 6), utilizando os parâmetros dos semivariogramas teóricos ajustados.

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (6)$$

em que $z^*(x_0)$ é o valor estimado no ponto x_0 ; $z(x_i)$ são os valores observados envolvidos na estimativa; N é o número de valores observados envolvidos na estimativa e λ_i são os pesos associados a cada valor observado. A variância de krigagem foi determinada conforme Vieira (2000):

$$\sigma^2 z^*(x_0) = \mu + \sum_{i=1}^N \lambda_i r^2(x_i - x_0) \quad (7)$$

em que μ é o multiplicador de Lagrange.

Com base nos resultados destes procedimentos de validação, foram calculadas as estimativas de precisão erro médio reduzido (ER) e desvio padrão dos erros (S_{ER}), cujas equações (PRODAN et al., 1997), respectivamente são:

$$ER = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{z(x_i) - z^*(x_i)}{\sigma(x_i)} \quad (8)$$

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{N} \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{z(x_i) - z^*(x_i)}{\sigma(x_i)} \right\}^2} \quad (9)$$

em que N é o número de valores observados envolvidos na validação; $z(x_i)$ é o valor observado no ponto i ; $z^*(x_i)$ é o valor estimado para o ponto i e $\sigma(x_i)$ é o desvio padrão da krigagem no ponto i .

O erro reduzido médio mais próximo de zero e o desvio padrão mais próximo de 1 foram os primeiros critérios aplicados para escolha do melhor modelo, conforme Andriotti (2003). O grau de dependência espacial, adaptado de Cambardella et al. (1994), foi aplicado como critério para definição final do melhor modelo.

Todas as análises estatísticas e geoestatísticas foram desenvolvidas pelo software R, utilizando-se o pacote geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001), com os mapas tendo sido gerados pelo programa ArcMap (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI, 2004), mantendo-se os parâmetros do semivariograma obtidos anteriormente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise exploratória e estatística básica dos dados

No Gráfico 1 apresentam-se os gráficos “boxplot” dos dados de condutividade hidráulica saturada sem (a) e com transformação logarítmica (b). É possível observar que houve uma redução considerável de dados discrepantes na situação com dados transformados, produzindo apenas 5 dados discrepantes contra 59 dos dados sem transformação.

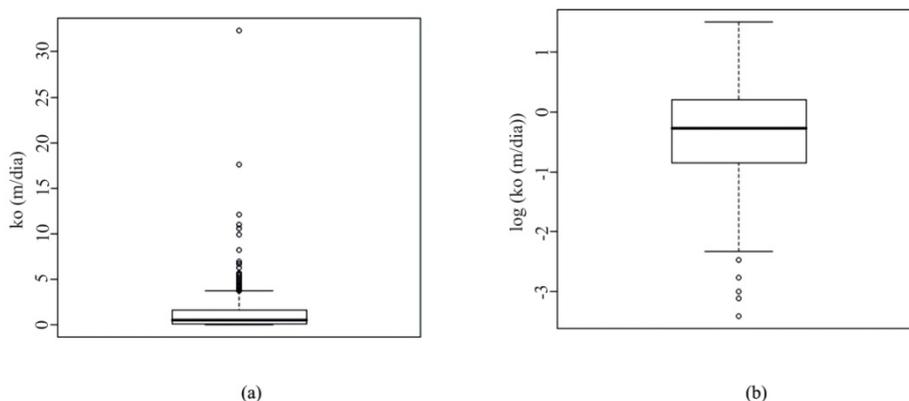


Gráfico 1 Gráficos “boxplot” para os dados sem transformação (a) e transformados (b).

Nos Gráficos 2 e 3 estão apresentados, respectivamente, os gráficos para avaliação da presença de tendência dos dados sem e com transformação logarítmica. Pode-se observar que os mesmos não apresentaram tendência, uma vez que os valores de condutividade hidráulica saturada não tendem a crescer de norte para sul ou de leste para oeste e vice-versa.

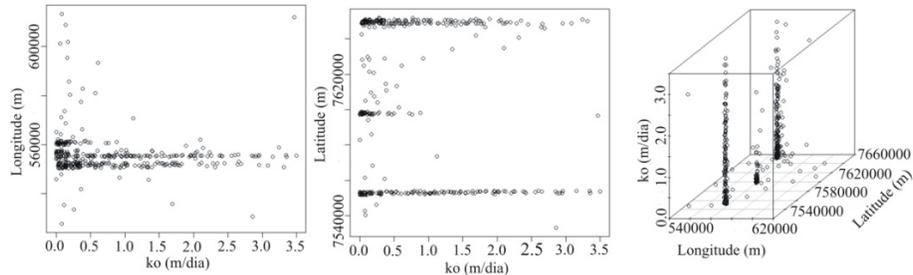


Gráfico 2 Gráficos de tendência para os dados de condutividade hidráulica saturada sem transformação.

No Gráfico 2, mais proeminente que no Gráfico 3, observa-se que os dados estão mais concentrados em determinadas regiões que em outras. Por esta razão, na fase inicial deste trabalho, foi levantada a hipótese e, posteriormente testada, de trabalhar com uma base de dados reduzida, visando à distribuição mais uniforme dos dados. Entretanto, esta hipótese foi rejeitada por não contribuir para a construção de um semivariograma experimental de melhor qualidade e conseqüentemente facilitar o ajuste do modelo teórico ao mesmo.

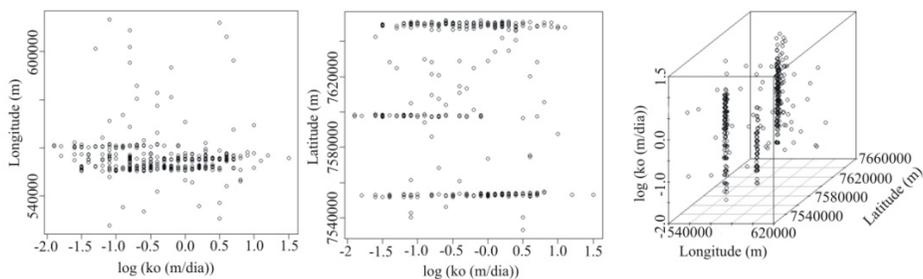


Gráfico 3 Gráficos de tendência para os dados de condutividade hidráulica saturada transformados.

Na Tabela 1, estão relacionados os resultados da estatística descritiva aplicada aos dados após a remoção dos pontos discrepantes. As distâncias

mínima e máxima entre os pontos amostrados correspondem a 8 e 123000 metros, respectivamente.

Tabela 1 Estatísticas descritivas dos dados de condutividade hidráulica saturada com e sem transformação logarítmica.

Estatística descritiva	k_o (m dia ⁻¹)	log (k_o (m dia ⁻¹))
Número de dados	399	426
Valor Mínimo	0,0004	-1,9
Valor Máximo	3,496	1.5
Mediana	0,426	-0,2
Média	0,783	-0,303
Variância	0,694	0,435
Desvio Padrão	0,833	0,660
W	0,837	0,9811
p-value	2,2E-16	2,34E-05

O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado para avaliação da normalidade dos dados. O teste foi significativo ($p\text{-value} < 0.05$), ou seja, rejeitou-se a hipótese H_0 de que os dados são normalmente distribuídos. No entanto, Hurtado (2004), comparando os valores do teste de Shapiro-Wilk antes e após transformação logarítmica dos dados, observou que os valores de W aumentam consideravelmente após a transformação, concluindo que o tratamento logarítmico dos dados de condutividade hidráulica leva a uma redução da assimetria da distribuição, conforme pode ser observado na Tabela 1 e no Gráfico 4. Especificamente neste estudo, não houve uma normalização efetiva da distribuição, mas uma redução da assimetria, conforme atestam as estatísticas do teste de Shapiro-Wilk.

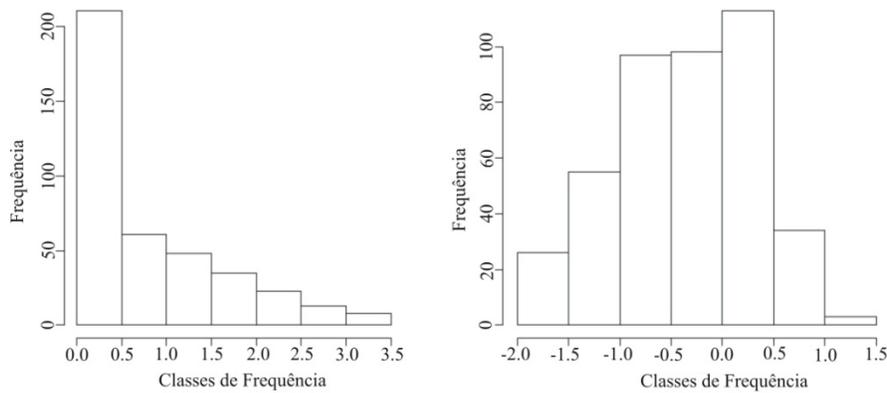


Gráfico 4 Histograma de frequência para dados sem transformação (a) e transformados (b).

3.2 Avaliação da continuidade espacial dos dados

No Gráfico 5 estão apresentados os semivariogramas experimentais para as quatro direções principais e o semivariograma unidirecional para os dados sem e com transformação logarítmica respectivamente. Observa-se que os semivariogramas apresentaram comportamento semelhante, ou seja, a mesma estrutura de dependência espacial para as diferentes direções avaliadas, indicando comportamento isotrópico. No entanto, podem ser observadas algumas discrepâncias quando o semivariograma é plotado na direção 90° para os dados sem transformação (Gráfico, 5a). Este comportamento não é observado para os dados transformados, podendo constituir-se numa das explicações plausíveis para as diferenças em termos do comportamento da continuidade espacial dos dados, caracterizando uma situação mais fortemente isotrópica dos mesmos quando transformados.

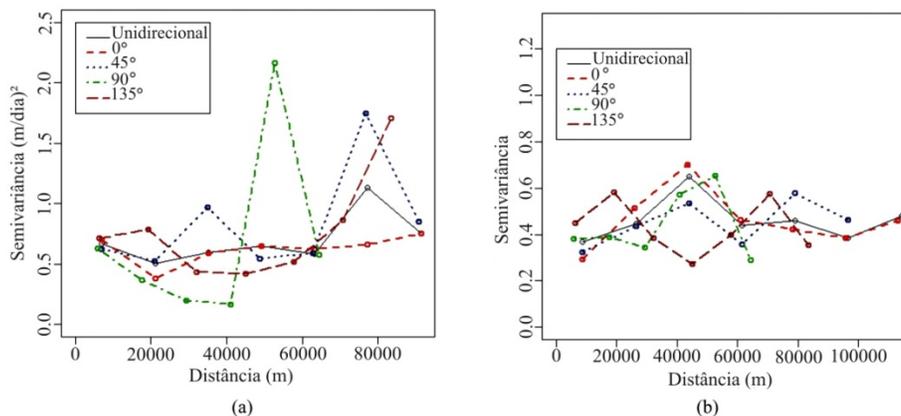


Gráfico 5 Estrutura de dependência espacial para as quatro direções com os dados sem transformação (a) e transformados (b).

O estudo da estrutura de dependência espacial dos dados sem e com transformação, através da função semivariograma, é apresentado no Gráfico 6, com ajuste dos modelos de semivariograma teóricos esférico e exponencial, pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) e mínimos quadrados ponderados (MQP) ao semivariograma experimental. Observa-se na referida Figura que o semivariograma experimental, em ambas as situações estudadas, apresentou comportamento periódico, sendo que é possível observar semivariância elevada na primeira “lag”, na qual espera-se que pontos amostrados a pequenas distâncias deveriam exibir valores de k_0 similares. Este fato está relacionado à alta variabilidade espacial exibida pela condutividade hidráulica saturada a pequenas distâncias, conforme relatam Buttle e House (1997), Giménez, Rawls e Lauren (1999), Moustafa (2000) e Sobieraj, Elsenbeer e Cameron (2004), principalmente quando se considera as inúmeras combinações de classes de solo, relevo e ocupação e manejo do solo presentes numa bacia hidrográfica com as características e dimensões apresentadas pelo Alto Rio Grande.

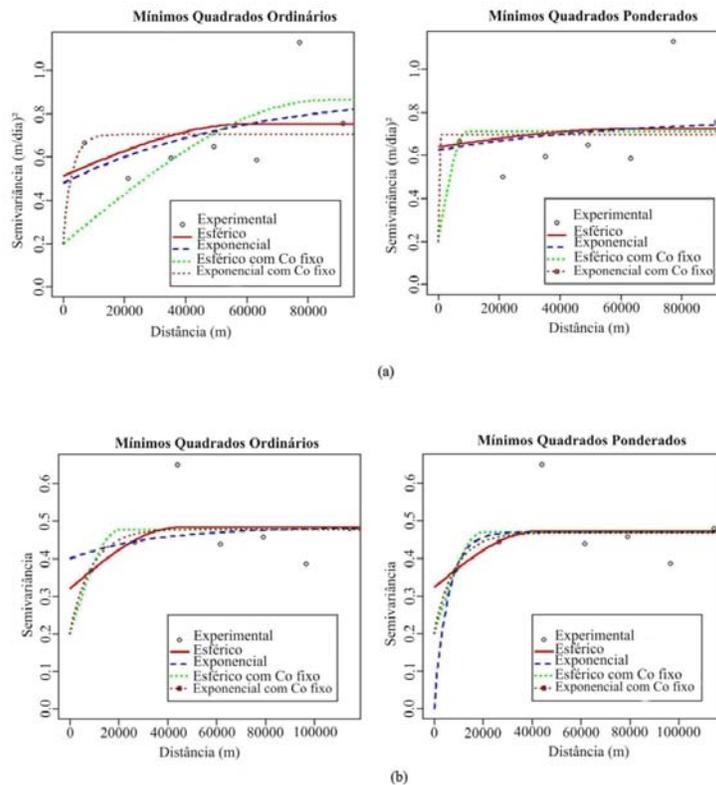


Gráfico 6 Semivariogramas experimentais e teóricos para os dados de condutividade hidráulica saturada sem transformação (a) e transformados (b).

O comportamento do semivariograma experimental observado na Figura 8b está em concordância com os resultados observados por Montenegro, Montenegro e Mackay (1999). Estes pesquisadores observaram que o variograma experimental para o logaritmo de k_0 apresentou flutuações, caracterizando um comportamento periódico, similar ao comportamento sem transformação. Os pesquisadores atribuíram tal comportamento a não regularidade entre as distâncias de amostragem e ao efeito do uso do solo traduzido na presença de solos cultivados e não cultivados na área, o qual é mais evidente nas camadas superficiais e que caracterizam a chamada variabilidade

extrínseca. Neste aspecto, a transformação logarítmica dos dados não produziu resultados diferentes dos dados sem transformação, ou seja, a estrutura espacial não foi alterada.

Nas Tabelas 2 e 3 estão relacionados os parâmetros de cada modelo ajustado pelo seu respectivo método. Entre os parâmetros do semivariograma destaca-se o efeito pepita (C_0), a contribuição (C_1), o patamar ($C_0 + C_1$) e o alcance prático (a^*). O grau de dependência espacial (GD) de cada combinação (modelo/método) foi calculado através da relação entre a contribuição e o patamar, conforme Gomes et al. (2007) e Junqueira Júnior et al. (2008).

Observa-se que praticamente todas as combinações apresentaram estrutura de dependência espacial definida, destacando-se a qualidade dos semivariogramas ajustados pelo método MQO para os dados de k_0 sem transformação, com alcance prático variando de 8,4 a 180 km. O mesmo foi observado para os dados transformados de k_0 , porém, com o alcance prático entre 17 e 98 km.

Tabela 2 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os dados sem transformação.

Modelo	Método	C_0 (m/dia) ²	C_1 (m/dia) ²	a^* (m)	GD (%)
Esférico	MQO	0,5126	0,2398	60000	32
Exponencial	MQO	0,4788	0,4301	179744	47
Esférico com C_0 fixo	MQO	0,2	0,6631	85543	77
Exponencial com C_0 fixo	MQO	0,2	0,5041	8446	72
Esférico	MQP	0,6389	0,0827	60000	11
Exponencial	MQP	0,6246	0,1506	179744	19
Esférico com C_0 fixo	MQP	0,2	0,5108	9384	72
Exponencial com C_0 fixo	MQP	0,2	0,4954	0	71

Tabela 3 Parâmetros dos semivariogramas ajustados para os dados transformados.

Modelo	Método	C_0	C_1	a^* (m)	GD (%)
Esférico	MQO	0,3199	0,1623	44090	34
Exponencial	MQO	0,3993	0,0829	97929	17
Esférico com C_0 fixo	MQO	0,2	0,2764	20219	58
Exponencial com C_0 fixo	MQO	0,2	0,2783	26319	58
Esférico	MQP	0,3226	0,1485	41743	32
Exponencial	MQP	0	0,4696	17041	100
Esférico com C_0 fixo	MQP	0,2	0,2696	19642	57
Exponencial com C_0 fixo	MQP	0,2	0,2683	24958	57

Entre os modelos teóricos de semivariograma ajustados, destaca-se o modelo esférico, com efeito pepita fixo, ajustado pelo método do MQO. Este ajuste apresentou grau de dependência espacial na ordem de 77% para os dados de k_0 sem transformação e de 58% para os dados transformados, sendo consideradas de alta e moderada dependência espacial, respectivamente, conforme classificação de Cambardella et al. (1994).

Destaca-se que o modelo exponencial ajustado por MQP, para os dados transformados de k_0 , apresentou efeito pepita nulo, o qual apesar de desejado é improvável, devido ao fato de que os dados de condutividade hidráulica apresentam elevada variabilidade mesmo em pequenas distâncias. Ressalta-se também que o modelo exponencial, com efeito pepita fixo ajustado pelo método dos MQP para os dados originais de k_0 , apresentou alcance nulo, o que indica ausência de estrutura de dependência espacial.

Comparando os parâmetros dos semivariogramas ajustados, observa-se que o logaritmo da condutividade hidráulica saturada forneceu valores de efeito

pepita reduzidos até pela metade, embora tenha apresentado valores moderados de GD. Isto pode ser resultado da transformação logarítmica, que minimiza as semivariâncias com a redução da amplitude de variação da massa de dados e, conseqüentemente, produz redução do efeito pepita. Porém, esta redução não resultou em aumento efetivo do grau de dependência espacial e, portanto, pouco influenciou na estrutura de dependência espacial.

Nas Tabelas 4 e 5, estão apresentados os resultados da validação cruzada e preditiva que norteou, de forma definitiva, a seleção da melhor combinação a ser usada para o mapeamento da condutividade hidráulica saturada na Bacia do Alto Rio Grande através de krigagem ordinária.

Tabela 4 Erro médio reduzido (ER) e desvio padrão dos erros (S_{ER}) para os dados de condutividade hidráulica saturada sem transformação.

Modelo	Método	Validação Cruzada		Validação Preditiva	
		ER	S_{ER}	ER	S_{ER}
Esférico	MQO	-0.0004	0.77	-0.29	0.65
Exponencial	MQO	-0.0004	0.77	-0.30	0.68
Esférico com C_0 fixo	MQO	-0.0020	0.76	-0.40	0.90
Exponencial com C_0 fixo	MQO	-0.0025	0.73	-0.37	0.84
Esférico	MQP	-0.0002	0.78	-0.27	0.60
Exponencial	MQP	-0.0002	0.78	-0.28	0.62
Esférico com C_0 fixo	MQP	-0.0029	0.72	-0.22	0.50
Exponencial com C_0 fixo	MQP	0.0000	0.84	-	-

Tabela 5 Erro médio reduzido (ER) e desvio padrão dos erros (S_{ER}) para o logaritmo dos dados de condutividade hidráulica saturada.

Modelo	Método	Validação Cruzada		Validação Preditiva	
		ER	S_{ER}	ER	S_{ER}
Esférico	MQO	0.0009	0.59	-0.27	0.60
Exponencial	MQO	0.0007	0.60	-0.26	0.59
Esférico com C_0 fixo	MQO	0.0010	0.58	-0.37	0.82
Exponencial com C_0 fixo	MQO	0.0008	0.57	-0.29	0.65
Esférico	MQP	0.0009	0.59	-0.27	0.60
Exponencial	MQP	0.0022	0.60	-0.25	0.56
Esférico com C_0 fixo	MQP	0.0010	0.58	-0.54	1.21
Exponencial com C_0 fixo	MQP	0.0008	0.57	-0.29	0.66

Com base nas referidas Tabelas, o procedimento de validação cruzada para os dados sem transformação e transformados apresentou diferença muito pequena entre as combinações avaliadas. Por outro lado, a validação preditiva para os dados sem transformação e transformados revelou valores para o erro médio reduzido mais distantes de zero quando comparados aos obtidos pela técnica da validação cruzada. De acordo com Mello (2004), este comportamento é esperado uma vez que a validação cruzada ocorre no contexto da base de dados sobre a qual o modelo foi ajustado, enquanto a preditiva ocorre no contexto de dados desconhecidos do processo de modelagem do semivariograma, sendo que este último procedimento deve ser preferido quando possível.

Diante dos resultados obtidos e das dificuldades em se modelar a continuidade espacial do atributo hidrológico condutividade hidráulica saturada, é possível sugerir -- para seu mapeamento e empregando dados sem ou com transformação -- o modelo esférico com efeito pepita fixo ajustado pelo método

dos mínimos quadrados ordinários, os quais apresentaram patamar bem definido e estatísticas de precisão favoráveis, sendo o valor de S_{ER} , fornecido pela validação preditiva, determinante para a escolha desta combinação.

3.3 Mapeamento da condutividade hidráulica saturada

A Figura 3a apresenta o mapa de condutividade hidráulica saturada desenvolvido com base nos dados sem transformação logarítmica. Observa-se que os maiores valores de condutividade hidráulica saturada encontram-se, principalmente, junto à região da Serra da Mantiqueira (sul da Bacia) e a região de influência do reservatório de Itutinga/Camargos (norte da Bacia) as quais apresentaram valores entre 1,47 e 3,50 m/dia.

Em contrapartida, na Figura 3b, o mapa gerado a partir dos dados transformados permitiu uma visão mais detalhada da distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada, realçando regiões com valores mais altos, que superam 30 m/dia. No mapa da Figura 3a estes valores não puderam ser captados devido à eliminação dos mesmos com base no respectivo gráfico “boxplot” (Gráfico 1), onde valores superiores a 3,5 m/dia foram eliminados. Isto significa que o mapa obtido com base nos dados transformados é mais realista que o mapa obtido sem transformação de dados, uma vez que valores superiores a 3,5 m/dia foram obtidos em condições de campo e sua existência é uma realidade que não pode ser desprezada. Desta forma, apesar da qualidade inferior do modelo de continuidade espacial ajustado aos dados transformados, esta distribuição mais detalhada é mais consistente e fornece uma informação mais precisa.

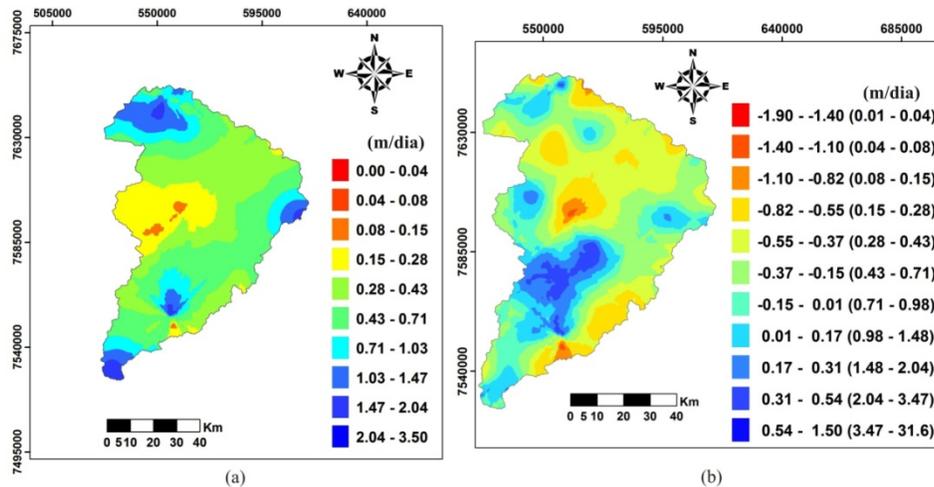


Figura 3 Distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada com dados sem (a) e com transformação (b).

É importante destacar ainda que ambos os mapas demonstraram valores elevados para duas regiões importantes no contexto de recarga subterrânea, ou seja, na região junto à Serra da Mantiqueira e nas áreas de Latossolos na porção mais setentrional da Bacia. Para a 1^a situação, conforme Menezes et al. (2009), os solos são basicamente Cambissolos, porém, apresentam uso do solo predominante em Mata Atlântica, o que proporciona maiores conteúdos de matéria orgânica na superfície do solo, facilitando o processo de infiltração. Na 2^a situação, os Latossolos da região, por apresentarem características pedológicas importantes no contexto de infiltração de água, como estrutura granular, constituem-se em áreas expressivas para recarga de água subterrânea, no entanto, muito susceptível ao manejo do solo (GOMES et al., 2007).

O mapa da Figura 3b apresentou valores elevados na região centro-sudoeste da bacia. Conforme pode ser observado na Figura 1, esta região é caracterizada pela ocorrência de áreas de Mata Nativa e Cerrado, além de trechos importantes com Latossolos, o que confere altos valores de k_0 .

Apesar da continuidade espacial ser semelhante para as situações sem e com transformação logarítmica, inclusive no tocante ao melhor modelo de semivariograma, o mapeamento propriamente dito revelou situações distintas em termos de distribuição espacial, sendo possível observar maior detalhamento no mapa com dados transformados. Este fato pode ser explicado pelas etapas da análise espacial, especialmente ao menor número de dados discrepantes, além de melhor caracterização de isotropia para os dados transformados.

4 CONCLUSÕES

- a) Verificou-se que a transformação logarítmica dos dados de condutividade hidráulica saturada reduziu a presença de pontos discrepantes na base de dados, além de comportamento do semivariograma similar em todas as direções testadas. Entretanto, os maiores valores de grau de dependência espacial foram observados para os dados de k_0 sem transformação;
- b) Com base no procedimento de validação preditiva e no grau de dependência espacial, foi possível escolher o modelo esférico com efeito pepita fixo ajustado pelo método dos mínimos quadrados ordinários, para o mapeamento da condutividade hidráulica saturada, por meio de krigagem ordinária, tendo como referência tanto os dados com e sem transformação;
- c) Os mapas de k_0 e $\log(k_0)$ gerados apresentaram ênfase distinta na distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada para a bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, porém, valores similares, sendo que, na forma transformada, o mapa apresentou melhor detalhamento da distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada, sendo possível recomendá-lo para aplicações práticas.

REFERÊNCIAS

- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamento de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2003. 165 p.
- ARAÚJO, A. R. de. **Solos da bacia do Alto Rio Grande, MG**: base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola. 2006. 345 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- BESKOW, S. et al. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 49-59, Oct. 2009.
- BUTTLE, J. M.; HOUSE, D. A. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 203, n. 1/4, p. 127-142, Dec. 1997.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 5, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.
- CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: Wiley, 1993. 900 p.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGis 9**: getting started with ArcGis. Redlands, 2004. 265 p.
- FALLICO, C.; MIGLIARI, E.; TROISI, S. Characterization of the field saturated hydraulic conductivity on a hillslope: measurement techniques, data sensitivity analysis and spatial correlation modelling. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, Göttingen, v. 2, n. 4, p. 1247-1298, July 2005.
- GIMÉNEZ, D.; RAWLS, W. J.; LAUREN, J. G. Scaling properties of saturated hydraulic conductivity in soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 88, n. 3/4, p. 205-220, Mar. 1999.
- GOMES, N. M. et al. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 435-443, maio/jun. 2007.

HURTADO, A. L. B. **Variabilidade da condutividade hidráulica do solo em valores fixos de umidade e de potencial matricial**. 2004. 94 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2004.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. 5. ed. London: Academic, 1991. 600 p.

JULIÀ, M. F. et al. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 3/4, p. 257-277, Dec. 2004.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. et al. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 3, p. 914-922, maio/jun. 2008.

MELLO, C. R. de et al. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, Amsterdam, v. 75, n. 3, p. 235-247, Nov. 2008.

MELLO, J. M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 111 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2004.

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

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 30-37, 2006.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MACKAY, R. Caracterização da variabilidade espacial de parâmetros hidráulicos em solos aluviais no estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 5-17, abr./jun. 1999.

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

PRODAN, M. et al. **Mensura florestal**. San José: IICA/BMZ/GTZ, 1997. 586 p.

RIBEIRO JUNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **RNews**, Canudos, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.

SEPASKHAH, A. R.; ATAEE, T. A simple model to determine saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage. **Biosystems Engineering**, London, v. 89, n. 4, p. 505-513, Aug. 2004.

SOBIERAJ, J. A.; ELSNBEER, H.; CAMERON, G. Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. **Catena**, Amsterdam, v. 55, n. 1, p. 49-77, Jan. 2004.

SOUZA, E. S. de et al. Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p. 1795-1804, set./out. 2008.

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

CAPÍTULO 3

Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG

RESUMO

A proposição de índices de qualidade do solo tem crescido de forma considerável nos últimos anos para análises de sustentabilidade ambiental e da produção agrícola. No entanto, não há, nas condições brasileiras, o desenvolvimento de nenhum indicador de qualidade do solo vinculado à recarga de água subterrânea. O objetivo deste estudo foi o de estruturar um Índice de Qualidade do Solo, relacionado à recarga de água subterrânea (IQS_{RA}), para as condições da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, para, posteriormente, proceder ao seu mapeamento por meio de técnicas geoestatísticas. O IQS_{RA} proposto é uma combinação de quatro indicadores relacionados à infiltração de água no solo: densidade do solo, condutividade hidráulica saturada, microporosidade e porosidade drenável. Para sua validação, foi avaliada a participação do deflúvio base (ou subterrâneo) no deflúvio total para quatro sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, analisando o comportamento destes indicadores hidrológicos tendo-se como referência a distribuição espacial do IQS_{RA} . O IQS_{RA} gerado mostrou-se uma ferramenta importante para avaliação do potencial de recarga de água no solo, uma vez que o mesmo reflete a influência dos usos do solo no comportamento do deflúvio base e conseqüentemente, na produção de água pelas sub-bacias.

Palavras-chave: Índice de qualidade do solo. Recarga subterrânea. Uso do solo. Mapeamento.

ABSTRACT

The proposition of the Soil Quality Indexes (SQI) has been increased in the last years for analyzing of the environmental sustainable and agricultural production. However, under Brazilian conditions, there is not any SQI related to the groundwater recharge. This study aimed to develop a SQI related to the groundwater recharge to Alto Rio Grande Basin physiographical conditions. After that, a SQI mapping was developed based on the geostatistical procedures. The SQI proposed consists of a linear combination of 4 soil hydrology attributes: soil bulk density, saturated hydraulic conductivity, micro-porosity and drainable porosity. For validation of the index, it was evaluated the proportion of the total annual flow in terms of the base flow and direct surface flow to 4 watersheds of the Alto Rio Grande Basin, analyzing the behavior of hydrologic indicators having as reference the spatial distribution of SQI. Based on the validation process, the Soil Quality Indexes proposed consists of an important tool to evaluate the groundwater recharge potential of different areas of Alto Rio Grande Basin since it was sensitive to the influence of different land-uses on base flow behavior and consequently, on water yield by watersheds.

Keywords: Soil quality index. Groundwater recharge. Land-use. Mapping.

1 INTRODUÇÃO

No início da década de 1990, a comunidade científica, consciente da importância do solo para a qualidade ambiental e para a sustentabilidade agrícola, iniciou a abordagem sobre qualidade do solo. A maioria dos estudos concentrava-se na identificação de um índice que fosse aplicável como indicador de qualidade do solo, assim como existem indicadores para a qualidade do ar e da água, para auxiliar na avaliação dos solos em relação à degradação ambiental e julgar as práticas de manejo utilizadas (MELO FILHO; SOUZA; SOUZA, 2007; VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

Na literatura encontram-se índices propostos para avaliar a qualidade do solo que consideram a integração dos atributos do solo com a paisagem, obtendo índices normalizados conforme as funções consideradas relevantes para o local e o objetivo do estudo (KARLEN et al., 1997; KARLEN; STOTT, 1994) e, ainda, com a possibilidade de se gerar mapas destes índices (SMITH; HALVORSON; PAPENDICK, 1994).

Dependendo da função para a qual o índice de qualidade do solo está sendo estruturado, uma extensa lista de atributos do solo pode ser empregada. Por isso, para a avaliação de determinadas funções, é preciso selecionar atributos que, de alguma maneira: (a) influenciam a função para a qual estão sendo avaliados; (b) sejam mensuráveis e comparados a padrões definidos; e (c) sejam sensíveis o bastante para detectar as diferenças em escala espacial e/ou temporal (KARLEN et al., 1994).

Dentre os métodos mais utilizados para a determinação do índice de qualidade do solo, destaca-se o proposto por Karlen e Stott (1994). Este método apresenta uma estrutura de cálculo na qual as funções principais e seus respectivos indicadores são selecionados e ponderados de acordo com o grau de importância para a determinação do índice. Esses pesquisadores sugeriram a

utilização de um modelo desenvolvido por Wymore (1993) para normalização dos indicadores, gerando uma escala de 0 a 1, significando que quanto mais próximo de 1, maior a qualidade do solo vinculada ao aspecto em análise.

Segundo Melo Filho, Souza e Souza (2007), a grande quantidade de informação sobre indicadores de qualidade do solo na literatura refere-se, principalmente, às condições de clima temperado; para condições tropicais e subtropicais não há uma seleção específica, especialmente no contexto de indicadores associados à recarga de água subterrânea e seu posterior mapeamento em escala de bacia hidrográfica.

A geoestatística vem sendo aplicada à ciência do solo para mapear atributos físicos e químicos do solo com o objetivo de gerar ferramentas (mapas) capazes de apoiar tomadas de decisão, especialmente como subsídio à agricultura de precisão e análises ambientais no tocante ao mapeamento de áreas de risco à erosão hídrica (BESKOW et al., 2009). Desta forma, o mapeamento de um índice de qualidade de solo voltado para as condições de infiltração de água no solo e conseqüentemente, de recarga de água subterrânea, constitui-se numa ferramenta impar para o manejo sustentável de uma bacia hidrográfica.

Neste contexto, este trabalho propõe gerar e mapear um Índice de Qualidade do Solo associado à recarga de água subterrânea, nas condições fisiográficas da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, permitindo inferir espacialmente sobre o solo e seu uso e sua influência na manutenção do escoamento subterrâneo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Desenvolvimento do Índice de Qualidade do Solo associado à recarga de água subterrânea (IQS_{RA})

Amostras deformadas e indeformadas foram coletadas na camada superficial do solo (0 – 20 cm) em 537 pontos distribuídos na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande caracterizando uma amostragem sistemática descontraída. Na Figura 4 apresenta-se o mapa desta bacia hidrográfica, com os pontos amostrados e localização das sub-bacias hidrográficas dos rios Grande (seção de controle na estação fluviométrica de Madre de Deus) e Aiuruoca (seção de controle na Fazenda Laranjeiras) e dos ribeirões Jaguara e Lavrinha, para as quais há disponibilidade de monitoramento hidrológico e climático, desde 2007.

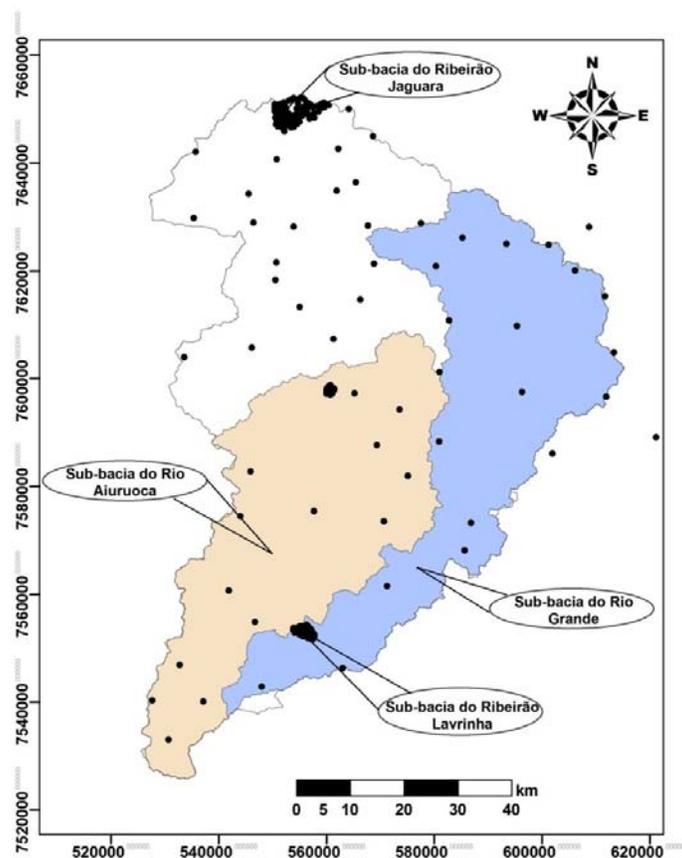


Figura 4 Pontos amostrados e localização das sub-bacias na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande.

Para a determinação do IQS_{RA} foram considerados quatro indicadores, todos intimamente associados à infiltração de água e influenciados pelo uso e manejo do solo: condutividade hidráulica saturada, porosidade drenável, microporosidade e densidade do solo. A condutividade hidráulica saturada do solo foi determinada *in situ* através de infiltrômetro de disco (modelo 2825K1) associado aos acessórios do permeâmetro de Guelph (modelo 2800K1); a densidade do solo foi obtida pelo método do anel volumétrico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1997); a

porosidade drenável foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a umidade na capacidade de campo (MELLO et al., 2002); a porosidade total foi calculada através da relação entre densidade do solo e densidade de partículas, conforme EMBRAPA (1997). O método do balão volumétrico foi aplicado para determinação da densidade de partículas. A umidade na capacidade de campo foi considerada como aquela equivalente a 0,06 atm, seguindo metodologia proposta para a determinação da microporosidade, de acordo com EMBRAPA (1997).

Para estruturação do IQS_{RA} , para cada ponto amostrado, este trabalho utilizou uma modificação do modelo proposto por Karlen e Stott (1994):

$$IQS_{RA} = I_{DS} * 0.15 + I_M * 0.25 + I_{K_0} * 0.30 + I_{\mu} * 0.30 \quad (10)$$

em que IQS_{RA} é o índice de qualidade do solo relacionado com a recarga de água; I_{DS} , I_M , I_{K_0} e I_{μ} são os indicadores densidade do solo, microporosidade, condutividade hidráulica saturada e porosidade drenável, respectivamente, multiplicados pelos seus respectivos pesos.

O peso de cada indicador foi atribuído de acordo com a função que os mesmos exercem no processo de infiltração de água no solo e conseqüentemente, na recarga de água e pode variar de acordo com a interpretação empírica de cada pesquisador, sendo que sua soma deve ser igual a 1. Quando o solo apresenta limitações para a recarga de água o valor do índice de qualidade será baixo; caso contrário, se o solo apresenta capacidade elevada para recarga de água, seu valor será alto.

Anteriormente à determinação do IQS_{RA} , foi realizada a normalização dos indicadores, devido ao fato de que os mesmos apresentam unidades de medida distintas. A função de pontuação normalizada -- sugerida por Karlen e

Stott (1994) e desenvolvida por Wymore (1993) -- foi aplicada para a obtenção de valores normalizados dos indicadores entre zero e um:

$$v = \frac{x - L}{B - L} \left(\frac{1}{1 + e^{-S(x - B)}} \right) \quad (11)$$

em que v é a pontuação normalizada; B é o valor do indicador quando a pontuação normalizada (v) é 0,5; L é limite inferior do indicador; S é a inclinação da reta tangente a curva em B e x é o valor do indicador do solo.

Para a construção das curvas de normalização para cada indicador, este trabalho considerou o valor de B como sendo a média do indicador e o valor de L como sendo o menor valor observado para o indicador, levando em consideração que cada indicador apresenta uma base de dados superior a 500 valores. O valor de S para cada curva foi determinado igualando-se a derivada segunda da equação 11 a zero, considerando v igual a 0,5, e x igual a B . Curvas do tipo “mais é melhor” foram ajustadas para os indicadores condutividade hidráulica saturada, microporosidade e porosidade drenável, enquanto para o indicador densidade do solo, uma curva do tipo “menos é melhor” foi ajustada (GLOVER; REGANOLD; ANDREWS, 2000; KARLEN; STOTT, 1994).

2.2 Mapeamento do IQS_{RA}

Para proceder ao mapeamento do IQS_{RA} na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, foram aplicados procedimentos da geoestatística, começando com análise exploratória dos dados. A modelagem da continuidade espacial dos dados foi conduzida pela função semivariograma, conforme Mello et al. (2007). Uma vez determinado o semivariograma experimental, foi ajustado ao mesmo, modelos teóricos de semivariograma, com destaque para esférico, exponencial e

Gaussiano (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1991). Além disto, um estudo prévio do comportamento do semivariograma nas direções 0, 45, 90 e 135° foi conduzido a fim de se avaliar a existência de anisotropia, a qual não foi efetivamente constatada. A escolha do melhor modelo -- posteriormente aplicado ao mapeamento do IQS_{RA} por krigagem -- foi realizada com base em validação preditiva, para a qual um conjunto de 100 valores, diferente daquele utilizado no ajuste do modelo espacial, foi aplicado. O erro médio reduzido e o desvio padrão do erro foram analisados para seleção do melhor ajuste, assim como o grau de dependência espacial (DIGGLE; RIBEIRO JÚNIOR, 2007; MELLO, 2004). Com base neste estudo, observou-se que o modelo Gaussiano, ajustado por mínimos quadrados ordinários, produziu a melhor modelagem da continuidade espacial. Todas as análises e procedimentos geoestatísticos foram desenvolvidas pelo software R, utilizando-se o pacote geoR, com o mapeamento tendo sido produzido pelo programa ArcMap (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI, 2004), mantendo-se os parâmetros do semivariograma obtidos anteriormente.

Para avaliar o comportamento deste IQS_{RA} em sub-bacias hidrográficas de pequeno porte (menor escala), a fim de se caracterizar as regiões fisiográficas mais importantes (Campo das Vertentes e Serra da Mantiqueira), foram conduzidos os mesmos estudos geoestatísticos anteriores, proporcionando mapas de IQS_{RA} específicos para as sub-bacias dos ribeirões Jaguará (Campo das Vertentes) e Lavrinha (Serra da Mantiqueira) (Figura, 10). Em ambos os casos, o modelo esférico -- ajustado pelo método dos mínimos quadrados ordinários -- foi aplicado ao mapeamento do IQS_{RA} uma vez que apresentou o melhor desempenho.

2.3 Validação do IQS_{RA} como indicador potencial de áreas de recarga de água subterrânea

Para este procedimento, foram utilizados dados de monitoramento hidrológico e climático para as sub-bacias dos Ribeirões Lavrinha e Jaguará, no período de 2007 a 2009. Para as sub-bacias dos rios Grande e Aiuruoca foram utilizados dados de precipitação e vazão disponíveis no banco de dados HIDROWEB/ ANA para o período de 1991-2003.

Os indicadores hidrológicos analisados (valores médios anuais) estão associados ao deflúvio total, à parcela deste que é constituída pelo deflúvio base (ou subterrâneo) e ao deflúvio superficial direto. Espera-se que as áreas que apresentarem maiores valores de IQS_{RA} sejam aquelas com maior proporção do deflúvio base junto ao deflúvio total e conseqüentemente, menor participação do deflúvio superficial direto, ou seja, refletindo melhores condições para infiltração de água no solo e, conseqüentemente, de recarga subterrânea.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Normalização dos indicadores do IQS_{RA}

A Tabela 6 apresenta os parâmetros para construção das curvas de normalização para cada indicador que compõe o IQS_{RA} proposto. Os parâmetros L, B e S representam os valores mínimo, médio e inclinação da reta tangente a curva quando o valor normalizado é 0,5 no modelo apresentado por Karlen e Stott (1994) e proposto por Wymore (1993).

Tabela 6 Valores dos parâmetros aplicados para normalização dos indicadores.

Indicador	L	B	S
Densidade do Solo (kg/dm ³)	0.579	1.091	-5.92417
Porosidade drenável (m ³ /m ³)	0.008	0.186	1.40450
Microporosidade (m ³ /m ³)	0.187	0.379	1.30209
Condutividade Hidráulica Saturada (m/dia)	0.000	0.832	1.30208

As curvas de valores normalizados do tipo “menos é melhor” aplicadas ao indicador densidade do solo e do tipo “mais é melhor” aplicada aos indicadores porosidade drenável, microporosidade e condutividade hidráulica saturada estão apresentados no Gráfico 7. Observa-se que a forma das curvas (meio sino) de valores normalizados dos indicadores condutividade hidráulica saturada e densidade do solo apresentaram comportamento similar àquelas apresentadas nos trabalhos de Glover, Reganold e Andrews (2000) e Karlen e Stott (1994). Entretanto, as curvas ajustadas para os indicadores porosidade drenável e microporosidade não evidenciaram este mesmo formato. Este comportamento está relacionado à determinação da inclinação da reta tangente a

curva (S) quando o valor normalizado é 0,5 e as considerações para os parâmetros B e L que este trabalho utilizou para determinação desta inclinação.

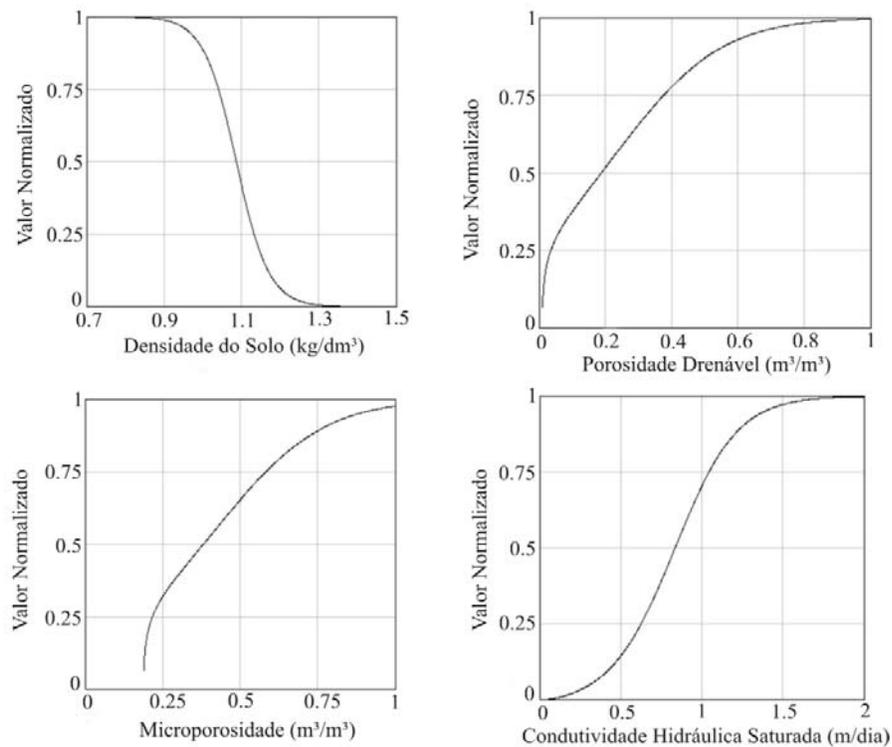


Gráfico 7 Curvas de normalização para os indicadores do IQS_{RA} para a bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG.

Destaca-se a importância de obtenção dos parâmetros L, B e S para solos tropicais, principalmente no contexto de uma bacia hidrográfica, uma vez que mesmo para solos temperados são praticamente inexistentes os trabalhos que se propõem a determinar numericamente tais parâmetros. O mais comum é a utilização de valores de referência disponíveis na literatura (GLOVER; REGANOLD; ANDREWS, 2000; MELO FILHO; SOUZA; SOUZA, 2007). Entretanto, para as condições fisiográficas tropicais e subtropicais, como da

bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, com considerável diversidade de classes e usos do solo, não é apropriado considerar um valor de referência disponível na literatura, o qual foi gerado para outras condições totalmente distintas. Um índice proposto nestas condições será enviesado e sua aplicabilidade ficará comprometida.

Diante do exposto e para alcançar os objetivos deste trabalho, as curvas de normalização apresentadas são suficientes e duas delas, apesar de apresentarem comportamento atípico, não falham no cumprimento de suas funções, que são as de fornecer valores normalizados para os indicadores considerados.

3.2 Mapeamento do IQS_{RA} na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande

A Figura 5 apresenta o mapa de IQS_{RA} para a bacia hidrográfica do Alto Rio Grande. Observa-se, na referida Figura, que a região da Serra da Mantiqueira (sul da Bacia), juntamente com uma região no centro-sul da Bacia, apresentaram valores de IQS_{RA} elevados, com valores que atingiram 0,80, demonstrando alta qualidade do solo no contexto de infiltração de água e conseqüentemente, de recarga subterrânea. Entretanto, a região de influência do Reservatório de Itutinga/Camargos (norte da Bacia), apresentou, em parte considerável de sua extensão, capacidade mediana de recarga de água, com valores de IQS_{RA} inferiores a 0,60.

Araújo (2006) propôs um mapa qualitativo das condições de recarga de água para a bacia hidrográfica do Alto Rio Grande tendo como base as classes de solo, material de origem e relevo presentes na região. O pesquisador analisou que os solos da região da Serra da Mantiqueira apresentavam médio potencial quanto à recarga de aquíferos, enquanto os solos mais ao norte da Bacia, incluindo a região de influência do Reservatório de Itutinga/Camargos,

indicavam alto potencial de recarga, devido ao predomínio de Latossolos. Ainda segundo Araújo (2006), os solos da região sudoeste e centro-oeste da bacia evidenciavam potencial reduzido quanto à recarga. No entanto, não há nenhum levantamento quantitativo de atributos diretamente vinculados à infiltração e, portanto, não afetados pelo uso e manejo do solo. Além disto, não foi desenvolvido nenhum tipo de validação da análise proposta pelo autor. Como o mapa desenvolvido neste trabalho foi gerado com base em um índice que tem como indicadores atributos do solo extremamente sensíveis ao seu uso e manejo e que de fato estão intrinsecamente associados à infiltração, este apresenta consistência e confiabilidade superiores.

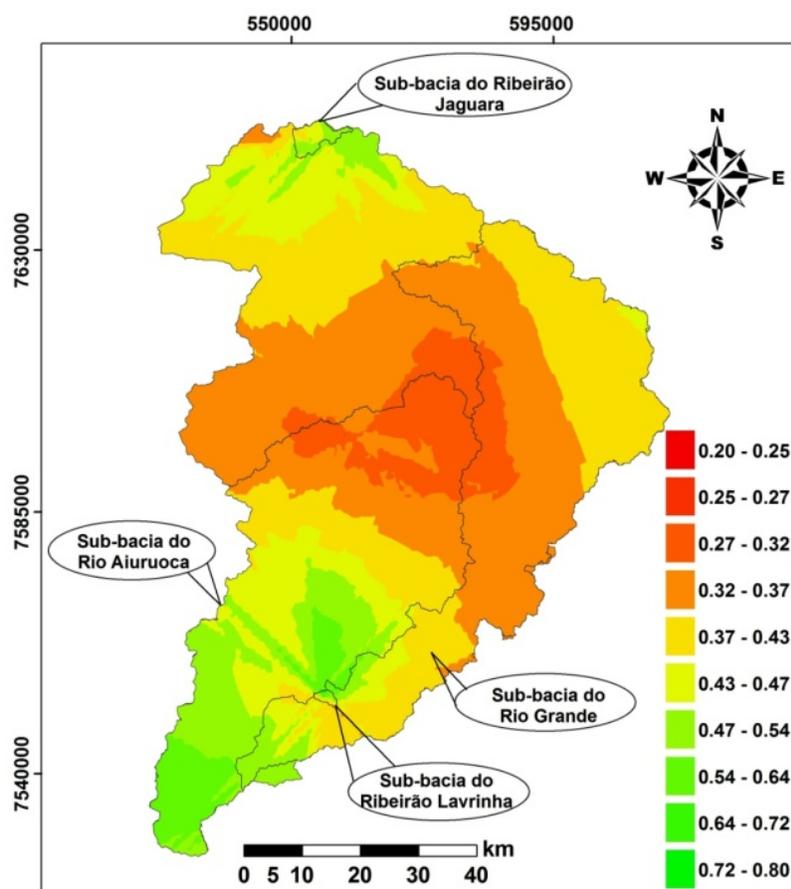


Figura 5 Distribuição espacial do IQS_{RA} para a bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG.

Na Tabela 7 estão apresentados os valores médios anuais de deflúvio total (D), deflúvio base ou subterrâneo (D_B), deflúvio superficial direto ($D_{S,D}$), precipitação (P), as áreas de drenagem e as relações D_B/D e $D_{S,D}/D$ para as sub-bacias do rio Grande e Aiuruoca e dos ribeirões Lavrinha (Serra da Mantiqueira) e Jaguará (Campos das Vertentes).

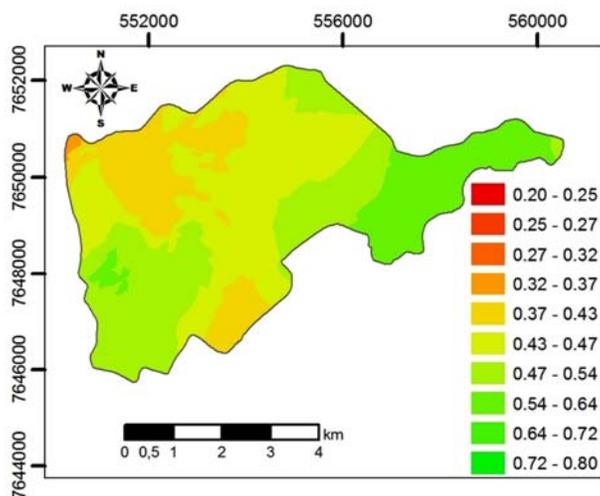
Tabela 7 Indicadores hidrológicos das sub-bacias hidrográficas do Alto Rio Grande considerados na validação do IQS_{RA} .

Sub-bacia	A (km ²)	D (mm)	D _B (mm)	D _{S.D.} (mm)	P (mm)	D _B /D	D _{S.D.} /D
Rio Grande	2080	734,3	477,3	257,0	1752	0,650	0,350
Rio Aiuruoca	2075	770,4	530,0	240,4	1539	0,690	0,310
Ribeirão Jaguara	32	702,2	438,9	263,2	1400	0,630	0,370
Ribeirão Lavrinha	6,87	655,0	525,0	130,0	1787	0,800	0,200

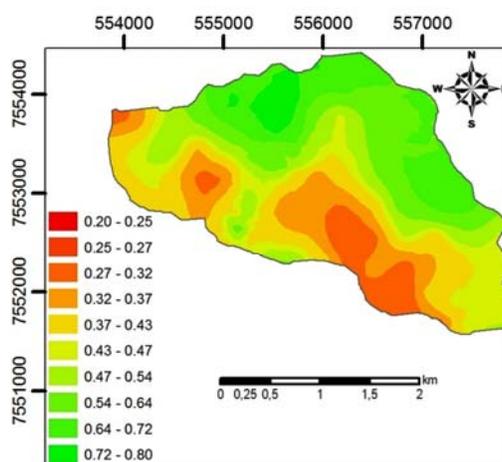
Confrontando os dados da Tabela 7 com a distribuição espacial do IQS_{RA} na Figura 5, observa-se que as regiões que apresentaram valores mais elevados de IQS_{RA} são justamente aquelas cuja ocupação predominante dos solos está associada a matas nativas, especialmente Mata Atlântica (Figura, 1b), embora os Cambissolos sejam a classe de solos dominante nesta região (Figura, 1a). Estes, do ponto de vista pedológico, não apresentam boas condições para infiltração de água, uma vez que ocorrem em relevos mais movimentados, com “solum” raso e alta concentração de silte. Como os indicadores que compõem o IQS_{RA} proposto são muito influenciados pelo uso e manejo do solo, estes captam de forma peculiar esta influência no contexto da infiltração de água. De acordo com os dados da Tabela 7, aproximadamente 70% do deflúvio total na sub-bacia hidrográfica do rio Aiuruoca consistem de deflúvio base, que ocorrem em função do processo de recarga subterrânea. Desta forma, avalia-se que a presença da Mata Atlântica na região da Serra da Mantiqueira, é fundamental, produzindo condições físicas ao solo que facilitam o processo de infiltração, fazendo com que esta região funcione como um reservatório de captação de água que controla o deflúvio subterrâneo. Num contexto inverso, é possível que as atividades agropecuárias, nas condições em que estão sendo conduzidas na parte norte desta bacia (GOMES et al., 2007), estejam contribuindo para os valores mais baixos de IQS_{RA} e, conseqüentemente, para maior participação do deflúvio

superficial direto, como pode ser observado na sub-bacia do ribeirão Jaguará e em grande parte da sub-bacia do Rio Grande. Em termos conservacionistas, esta situação não é desejável.

Para analisar o comportamento descrito anteriormente de forma mais detalhada no espaço da Bacia do Alto Rio Grande, na Figura 6 estão apresentados os mapas de IQS_{RA} para as sub-bacias hidrográficas do Ribeirão Jaguará, situada na zona fisiográfica Campos das Vertentes e, Lavrinha, localizada na zona fisiográfica Serra da Mantiqueira.



(a)



(b)

Figura 6 Distribuição espacial do IQS_{RA} para sub-bacia hidrográfica do (a) Ribeirão Jaguará e (b) Ribeirão Lavrinha.

A sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará (Figura, 6) apresenta como classe de solos predominante, o Latossolo Vermelho Distrófico típico (ARAÚJO, 2006; BESKOW et al., 2009). No entanto, os usos principais do solo desta região, segundo Gomes et al. (2007), são pastagens extensivas, conduzidas

sem nenhum critério conservacionista, e agricultura anual, especialmente o plantio convencional de milho. É sabido que estas práticas reduzem a capacidade de infiltração dos solos e consequentemente, a capacidade de recarga de água subterrânea. O IQS_{RA} proposto demonstra valores inferiores aos obtidos para a região da Serra da Mantiqueira, indicando condições medianas para recarga subterrânea. Isto significa que o mesmo captou os problemas de manejo do solo na região da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará, cujo reflexo está no comportamento do escoamento subterrâneo inferior, em termos de sua participação no deflúvio total, ao da região da Serra da Mantiqueira, mesmo em condições pedológicas favoráveis à infiltração. Esta situação pode ser comprovada pelo valor significativamente elevado da participação do deflúvio superficial direto (Tabela 7). Nesta sub-bacia, pouco mais de 60% do deflúvio total correspondem ao escoamento base e quase 40% deste total estão sendo convertidos em escoamento superficial direto, o qual não é desejável no contexto conservacionista.

No âmbito da região da Serra da Mantiqueira, ao estudarem os solos da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, Menezes et al. (2009) constataram que o solo de maior expressão espacial (60% da área) é o Cambissolo Háplico com textura média e pouco profundo. Os pesquisadores verificaram ocupação predominante de Mata Atlântica (41,5%) e pastagem (40,4%), principalmente na face norte e sul desta sub-bacia, respectivamente. Conforme pode ser observado na Figura 13b, a região que apresentou os valores mais elevados do IQS_{RA} foi sua face norte, apesar da predominância dos Cambissolos. Entretanto, o uso atual principal do solo nesta região é de Mata Atlântica, o qual promove efeitos benéficos ao solo, como baixa exposição do mesmo ao impacto de precipitações intensas, formação de uma espessa camada de material orgânico pouco decomposto (serrapilheira) que, segundo autores, funciona como um anteparo das precipitações, mantendo a água no meio e liberando-a lentamente para a

zona saturada. De forma geral, estes atributos, favorecem o processo de infiltração, compensando o baixo potencial de armazenamento de água dos Cambissolos, evitando sua erosão e degradação. Nesta sub-bacia, os resultados apresentados na Tabela 7 indicam que, em termos médios, o deflúvio base representa 80% do deflúvio total, ou seja, refletindo as ótimas condições iniciais para o processo de recarga subterrânea, o que justifica os elevados valores de IQS_{RA} observados. Isto permite evidenciar o papel fundamental desempenhado pela Mata Atlântica no contexto de recarga de água no solo, sendo que a sua preservação é fundamental para o equilíbrio hidrológico e produção de água na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande. Em nenhuma outra parte da bacia do Alto Rio Grande foi possível constatar comportamento semelhante.

Este trabalho permitiu realçar a importância do uso e manejo do solo, principalmente das áreas de matas e de florestas para a recarga subterrânea. Esta constatação ficou explícita na região da Serra da Mantiqueira onde, apesar da predominância de Cambissolos e relevo movimentado, a presença de matas e florestas nativas conferiu ao solo elevado potencial de recarga, atenuando os efeitos provocados pela presença de fatores pedológicos e topográficos limitantes. Desta forma, constata-se que o IQS_{RA} proposto mostrou-se sensível ao uso do solo e sua aplicação eficiente no contexto de identificação de zonas com maior potencial de recarga de água subterrânea, sendo uma ferramenta fundamental para o manejo sustentável da bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, a qual é altamente estratégica para geração de energia hidrelétrica.

4 CONCLUSÕES

- a) O IQS_{RA} proposto neste trabalho mostrou-se sensível ao uso e manejo do solo e o processo de validação comprovou sua eficácia como indicador ambiental de produção de água pelas bacias hidrográficas da região da Serra da Mantiqueira e Campos das Vertentes (Alto Rio Grande). Áreas que apresentaram maiores valores de IQS_{RA} são justamente aquelas que apresentaram as maiores proporções do escoamento base em relação ao escoamento total.
- b) As regiões cuja ocupação predominante do solo é de Mata Atlântica apresentaram valores elevados de IQS_{RA} , evidenciando que os fatores uso e manejo do solo são fundamentais para ocorrência de recarga subterrânea.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. R. de. **Solos da bacia do Alto Rio Grande, MG: base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola**. 2006. 345 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

BESKOW, S. et al. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 49-59, Oct. 2009.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Model based geostatistics**. New York: Springer, 2007. 230 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGis 9: getting started with ArcGis**. Redlands, 2004. 265 p.

GLOVER, J. D.; REGANOLD, J. P.; ANDREWS, P. K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 80, n. 1/2, p. 29-45, Aug. 2000.

GOMES, N. M. et al. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 435-443, maio/jun. 2007.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. 5. ed. London: Academic, 1991. 600 p.

KARLEN, D. L. et al. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, n. 2/3, p. 149-167, Aug. 1994.

_____. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation: a guest editorial. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 4-10, Jan. 1997.

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

MELO FILHO, J. F. de; SOUZA, A. L. V.; SOUZA, L. da S. Determinação do índice de qualidade sub-superficial em um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 6, p. 1599-1608, nov./dez. 2007.

MELLO, C. R. de et al. Modelagem de atributos físico-hídricos do solo numa bacia hidrográfica da região do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 845-852, set./out. 2007.

_____. Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da microrregião Campos das Vertentes, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 9, p. 1319-1324, set. 2002.

MELLO, J. M. de. **Geostatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 111 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2004.

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

SMITH, J. L.; HALVORSON, J. J.; PAPENDICK, R. I. Multiple variable indicator kriging: a procedure for integrating soil quality indicators. In: DORAN, J. W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 149-157. (SSSA Special Publication, 35).

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 743-755, jul./ago. 2009.

WYMORE, A. W. **Model-based systems engineering: an introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricotyledon theory of system design**. Boca Raton: CRC, 1993. 710 p.