



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Instituto de Geociências

GUSTAVO KLINKE NETO

MAPEAMENTO DE ÁREAS FAVORÁVEIS AO PROCESSO DE RECARGA DE  
ÁGUA EM UMA SUB-BACIA ÀS MARGENS DO RIO MOGI GUAÇU

CAMPINAS

2016

GUSTAVO KLINKE NETO

MAPEAMENTO DE ÁREAS FAVORÁVEIS AO PROCESSO DE RECARGA DE  
ÁGUA EM UMA SUB-BACIA ÀS MARGENS DO RIO MOGI GUAÇU

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO INSTITUTO DE  
GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE  
CAMPINAS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE  
EM GEOCIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOLOGIA E  
RECURSOS NATURAIS

ORIENTADORA: PROFA. DRA. SUELI YOSHINAGA PEREIRA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO DE  
DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO GUSTAVO  
KLINKE NETO, ORIENTADO PELA PROFA. DRA. SUELI  
YOSHINAGA PEREIRA

CAMPINAS

2016

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** CNPq, 132367/2014-9

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca do Instituto de Geociências  
Cássia Raquel da Silva - CRB 8/5752

K688m Klinke Neto, Gustavo, 1979-  
Mapeamento de áreas favoráveis ao processo de recarga de água em uma sub-bacia às margens do rio Mogi Guaçu / Gustavo Klinke Neto. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Sueli Yoshinaga Pereira.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Krigagem. 2. Lógica fuzzy. 3. Recursos hídricos - Planejamento. I. Pereira, Sueli Yoshinaga, 1961-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Mapping areas favorable to the recharge process in a sub-basin on Mogi Guaçu river's margins

**Palavras-chave em inglês:**

Kriging

Fuzzy logic

Water resources planning

**Área de concentração:** Geologia e Recursos Naturais

**Titulação:** Mestre em Geociências

**Banca examinadora:**

Sueli Yoshimaga Pereira

Archimedes Perez Filho

Ero Hermínio Crozera

**Data de defesa:** 30-08-2016

**Programa de Pós-Graduação:** Geociências



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS NA  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**AUTOR:** Gustavo Klink Neto

“Mapeamento de Áreas Favoráveis ao Processo de Recarga de Água em uma Sub-Bacia  
as Margens do Rio Mogi Guaçu

**Orientadora:** Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira

Aprovado em: 30 / 08 /2016

**EXAMINADORES:**

Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira - Presidente

Prof. Dr. Archimedes Perez Filho

Dr. Ero Hermínio Crozera

***A Ata de Defesa assinada pelos membros da Comissão Examinadora,  
consta no processo de vida acadêmica do aluno.***

Campinas, 30 de agosto de 2016.

## **Agradecimentos**

Agradecimentos são ações que devíamos com certeza praticar mais. São tantos os agradecimentos que com certeza sempre irá faltar alguém que de alguma forma contribuiu para a conclusão desta etapa importante para mim, que foi o Mestrado na Unicamp.

Agradeço inicialmente a pessoa mais significativa nesta jornada que foi minha eterna amiga e amada mulher Dra. Anna Hoffman Oliveira, que mais uma vez me ajudou nos variados aspectos que uma jornada como esta pode acarretar, e olha que são muitos. Agradeço aos meus irmãos Fernando e Antonella bem como minha mãe Regina Helena, por sempre apoiarem meus estudos.

Em seguida agradeço meus estimados amigos e professores da UFLA (Universidade Federal de Lavras) Dr. Antonio Carlos da Silva Zanzini e Dr. Fausto Weimar Acerbi Júnior que contribuíram diretamente não somente para minha formação, como também para meu ingresso no Mestrado, tanto pelas recomendações, tanto pelos exemplos de professores e pesquisadores que são.

Agradeço também meus amigos de Limeira que me acolheram durante a fase na qual cursei as matérias do Mestrado, em especial o Adriano Tin Tin, o André Peninha, o Juliano Caritá, o Xande Ragazzo e o Brunão Guarino, sempre presentes quando precisei. Agradeço também meu amigo Jonas Mitti (Jonas da Chakal), que bravamente me acolheu em São Carlos durante uma matéria extra realizada na USP.

Meus cães que desta vez foram a Malú e o Buck, sempre muito participativos na minha vida e de suma importância para minha motivação e serenidade cotidianas.

Obviamente agradeço demais minha orientadora e professora Dra. Sueli Yoshinaga Pereira, que me acolheu no Instituto de Geociências e me proporcionou a tão sonhada oportunidade de estar hoje aqui concluindo meu Mestrado. Agradeço também ao Instituto Florestal de São Paulo pelo apoio ao projeto de portas abertas.

Agradeço à secretaria de pós-graduação do IG, em especial a Val e a Gorete, sempre muito atenciosas e prestativas em todas as ocasiões. Agradeço também a todos os professores que me ensinaram muito em tão pouco tempo neste querido Instituto. Registro ainda meu agradecimento ao CNPq pela concessão de minha bolsa de estudos ao longo desta empreitada.

Obrigado Unicamp! Gosto muito desta instituição e tenho maior orgulho de ter feito meu colégio técnico de agrimensura no Cotil (Colégio Técnico de Limeira – Unicamp) em Limeira e agora mais ainda por ter feito meu Mestrado no IG (Instituto de Geociências e Recursos Naturais) em Campinas.

Agradeço à vida pelas oportunidades concedidas e aos queridos pela ajuda na realização destas oportunidades. Pois “somos” todos frutos das oportunidades e ocasiões ocorridas sem ordenação no cotidiano de cada um de nós. Nunca devemos achar que “somos” por que queremos ou merecemos, mais sim por que pudemos e tentamos.

SALVE SRI KRSNA, obrigado senhor.

## Biografia



Formado em Agrimensura pelo Colégio Técnico da Unicamp em Limeira, atuou como topógrafo em Campinas e região. Posteriormente graduou-se em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Lavras, em Minas Gerais, onde atuou em diversas áreas de pesquisa como ecologia florestal, estudos ambientais e geoprocessamento. Após alguns anos acumulando experiências acadêmicas e profissionais,

sentiu a necessidade de se aprimorar e avançar tecnicamente, cursando assim o programa de Mestrado (*stricto sensu*) no Instituto de Geociências da Unicamp em 2014-2016. Além de atuar como topógrafo e engenheiro florestal, trabalha também como coordenador de estudos ambientais e consultor em geoprocessamento.

## RESUMO

### MAPEAMENTO DE ÁREAS FAVORÁVEIS AO PROCESSO DE RECARGA DE ÁGUA EM UMA SUB-BACIA ÀS MARGENS DO RIO MOGI GUAÇU

Os processos hidrológicos associados aos processos de escoamento e de recarga de aquíferos necessitam de informações complementares a respeito do solo, bem como sua relação com a paisagem. Assim, os principais fatores associados a definição do potencial de recarga de aquíferos, são: tipo de solo, topografia, pluviosidade e cobertura vegetal. O presente estudo tem como objetivo principal elaborar modelos por lógica fuzzy para o zoneamento das áreas favoráveis ao processo de recarga das águas subterrâneas em uma sub-bacia inserida na Estação Ecológica de Mogi Guaçu, São Paulo. Para o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo foi utilizada a krigagem ordinária. Para tal, foram coletadas amostras com estruturas deformadas e indeformadas para as seguintes análises: textura, densidade do solo, macroporosidade e condutividade hidráulica saturada. Para a coleta das amostras foi delineada uma malha amostral regular de 400 X 400 metros em toda a área, totalizando 34 pontos. Para a análise topográfica foi realizado um levantamento planialtimétrico de toda a sub-bacia com equipamento Hiper L1/L2 Topcon e gerado o índice topográfico de umidade (TWI). A análise da cobertura vegetal foi feita via sensoriamento remoto pelo NDVI. Foram testados modelos gerados com 3 grupos distintos de variáveis de entrada: 1-Índices físicos de textura e estrutura; 2-Índices físicos de textura e estrutura + TWI; 3-Índices físicos de textura e estrutura + TWI+NDVI. A análise dos atributos do solo na sub-bacia revelou uma textura variando de média a arenosa, com teor de areia entre 65 e 87%, denotando uma tendência natural favorável à infiltração. A condutividade hidráulica saturada variou de baixa ( $0,06 \text{ cm h}^{-1}$ ) a excessiva ( $41,6 \text{ cm h}^{-1}$ ), com média de  $7,3 \text{ cm h}^{-1}$ , classificada como de alta permeabilidade. Todos os atributos analisados apresentaram dependência espacial e obtiveram seus melhores ajustes aos modelos esféricos. Apenas a macroporosidade e a condutividade apresentaram anisotropia. O Índice Topográfico de Umidade revelou os principais caminhos da drenagem superficial durante um evento pluviométrico e apresentou uma boa relação com as áreas planas e de alta acumulação de fluxo. O NDVI confirmou uma cobertura vegetal com boa proteção do solo e é considerada importante na retenção de água na sub-bacia. As estradas de solo exposto presentes na área contribuem para a “canalização” dos fluxos e para o aumento da erosão. A construção de modelos via lógica fuzzy com a entrada de variáveis que representam o solo, o relevo e a vegetação, se mostrou muito eficiente na elaboração de mapeamentos complexos e diferentes cenários, representando de forma consistente não só as observações de campo como também o mapa de condutividade hidráulica saturada obtida a partir das amostras coletadas em campo.

**Palavras-chave:** Krigagem; zoneamento recarga; índice topográfico de umidade, lógica fuzzy.

## **ABSTRACT**

### **MAPPING AREAS FAVORABLE TO THE WATER RECHARGE PROCESS IN A SUB-BASIN ON MOGI GUAÇU RIVER'S MARGINS**

The hydrological processes associated with flow and groundwater recharge processes require further information regarding the soil as well as their relationship with the landscape. Thus, the main factors associated with the definition of groundwater recharge potential are: soil type, topography, rainfall and vegetation. This study aims to develop models for fuzzy logic for the zoning of areas favorable to the process of groundwater recharge in a sub-basin inserted in the Ecological Station of Mogi Guaçu, São Paulo. To study the spatial variability of soil attributes was used ordinary kriging. For such, samples were collected with disturbed and undisturbed structures for the following analysis: texture, soil bulk density, macroporosity and saturated hydraulic conductivity. For the collection of the samples was outlined a regular sampling grid of 400 X 400 meters throughout the area, totaling 34 points. For topographic analysis was carried out planialtimetric survey of the entire sub-basin with equipment Hiper L1 / L2 Topcon and generated Topographic Wetness Index (TWI). The analysis of vegetation cover was made for the remote sensing NDVI. Were generated and tested models with 3 different groups of input variables: 1 - physical indexes of texture and structure; physical 2 - physical indexes + TWI; 3 - physical indexes + TWI + NDVI. The analysis of soil attributes in the sub-basin revealed a texture ranging from medium to sandy, with sand content between 65 and 87%, indicating a natural tendency favorable to infiltration. Saturated hydraulic conductivity varied from low (0.06 cm h<sup>-1</sup>) to excessive (41.6 cm h<sup>-1</sup>), with an average of 7.3 cm h<sup>-1</sup>, classified as high permeability. All attributes presented spatial dependence and obtained their best adjustments to spherical models. Only macroporosity and conductivity showed anisotropy. The TWI revealed the main pathways of surface drainage in a rainfall event and had a good relationship with the flat and high accumulation flow areas. The NDVI confirmed a vegetation with good protection of the soil and is considered important in water retention in the sub-basin. The exposed soil roads present in the area contributing to the "channeling" of flows and increased erosion. The development of models for fuzzy logic with input variables representing the soil, terrain, vegetation, was very effective in the creation of complex mappings and different scenarios, representing consistently not only field observations as well as the map saturated hydraulic conductivity obtained from samples collected in the field.

**Keywords:** kriging; zoning recharge; Topographical Wetness Index, fuzzy logic.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de variograma experimental; indicação dos parâmetros básicos no ajuste de modelos teóricos. ....	19
Figura 2 – Valores possíveis para variáveis fuzzy de acordo com as funções de pertinência <i>Gaussian</i> (A), <i>Linear</i> (B), <i>Large</i> (C) e <i>Small</i> (D). ....	25
Figura 3 – Localização da sub-bacia de estudo e do Complexo de Unidades de Conservação de Mogi Guaçu (CUCMG). ....	27
Figura 4 – Mapas de solos (a), declive (b) e usos do solo e amostragem (c) na sub-bacia de estudo. ....	28
Figura 5 – Mapa da amostragem em grid utilizada para os atributos do solo avaliados. ....	31
Figura 6 – Diagrama Textural utilizado para classificação do solo (EMBRAPA 2006). ....	36
Figura 7 – Mapas dos atributos areia (1) e densidade do solo (2) resultantes do processo de krigagem ordinária e seus respectivos variogramas omnidirecionais ajustados. ....	42
Figura 8 – Mapa do atributo macroporosidade resultante do processo de krigagem ordinária e seu respectivo variograma bidirecional ajustado. ....	43
Figura 9 – Mapa do atributo condutividade hidráulica saturada resultante do processo de krigagem ordinária e seu respectivo variograma bidirecional ajustado. ....	44
Figura 10 – Mapa de fluxo acumulado (a) e do Índice Topográfico de Umidade - TWI (b). ...	46
Figura 11 – Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). ....	48
Figura 12 – Variáveis de entrada transformadas em variáveis fuzzy. ....	49
Figura 13 – Modelos gerados com os operadores fuzzy AND e SUM, com o acréscimo de variáveis de entrada (areia, macroporosidade, densidade, TWI e NDVI). ....	50
Figura 14 – Modelos gerados com o operador fuzzy GAMMA, com o acréscimo no Índice Gama ( $\gamma$ ) de 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9 para as variáveis de entrada: areia, macroporosidade e densidade; Mapa da condutividade hidráulica saturada. ....	51
Figura 15 – Proporção entre as classes de potencial de infiltração geradas pelos diferentes operadores fuzzy, com as variáveis de entrada: areia, macroporosidade e densidade. ....	52
Figura 16 – Modelos gerados com o operador fuzzy GAMMA, com o acréscimo no Índice Gama ( $\gamma$ ) de 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9 para as variáveis de entrada: areia, macroporosidade, densidade e TWI; Mapa da condutividade hidráulica saturada. ....	53
Figura 17 – Proporção entre as classes de potencial de infiltração geradas pelos diferentes operadores fuzzy, com as variáveis de entrada: areia, macroporosidade, densidade e TWI. ...	54
Figura 18 – Modelos gerados com o operador fuzzy GAMMA, com o acréscimo no Índice Gama ( $\gamma$ ) de 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9 para as variáveis de entrada: areia, macroporosidade, densidade, TWI e NDVI; Mapa da condutividade hidráulica saturada. ....	55
Figura 19 – Proporção entre as classes de potencial de infiltração geradas pelos diferentes operadores fuzzy, com as variáveis de entrada: areia, macroporosidade, densidade, TWI e NDVI. ....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estatística descritiva dos atributos amostrados.....	35
Tabela 2 – Parâmetros de ajuste dos modelos isotrópicos testados.....	39
Tabela 3 – Parâmetros de ajuste dos modelos anisotrópicos testados.....	39
Tabela 4 – Estatística descritiva dos valores gerados pela K.O. ....	40
Tabela 5 – Teste de Tukey aplicado a todos os atributos analisados. ....	41
Tabela 6 – Porcentagem da área ocupada na sub-bacia de estudo por cada classe de pertinência gerada por todos os operadores fuzzy testados.....	57

## SUMÁRIO

Introdução .....	12
Objetivos.....	15
Revisão de literatura .....	16
Recarga .....	16
Geoestatística .....	17
Índice topográfico de umidade .....	20
Cobertura vegetal e escoamento superficial .....	21
Lógica fuzzy .....	22
Material e métodos .....	27
Área de estudo .....	27
Flora e Fauna .....	27
Premissas básicas para o desenvolvimento dos modelos .....	29
Considerações específicas à sub-bacia de estudo .....	29
Amostragem e espacialização dos atributos do solo.....	31
Análise topográfica.....	32
Análise da cobertura vegetal.....	33
Modelagem via lógica fuzzy.....	34
Resultados.....	35
Análise dos atributos do solo .....	35
Mapeamento dos atributos do solo .....	38
Índice topográfico de umidade .....	44
Cobertura vegetal.....	47
Zoneamento das áreas favoráveis ao processo de recarga.....	48
Considerações e limitações do método avaliado .....	58
Conclusões.....	59
Referências bibliográficas .....	60

## INTRODUÇÃO

O estudo da dinâmica da água e sua interação com a paisagem necessita do entendimento dos processos de formação dos solos, tanto no contexto de deposição de material quanto da conformação do relevo, fruto da interação solo-clima-escoamento. Adicionalmente, à medida que a ação da água desgasta a superfície terrestre, o solo torna-se um testemunho dos processos evolutivos que moldam a paisagem. Em outras palavras, os processos hidrológicos associados aos processos de escoamento e de recarga de aquíferos necessitam de informações complementares a respeito do solo, bem como sua relação com a paisagem (MELLO & CURI, 2012). Assim, uma abordagem eficaz desta interação entre hidrologia, solos e geomorfologia é possível através de estudos hidropedológicos.

A intensidade dos processos intempéricos é definida pelo clima, enquanto a topografia determina o comportamento do escoamento superficial, fase do ciclo hidrológico mais diretamente associada a recarga. O movimento da água pode impulsionar também o processo erosivo através da desagregação e transporte do solo ou de seu material geológico de origem, de um ponto da superfície até sua deposição em outro local. Dependendo da carga de sedimento e do volume e velocidade do escoamento, este material é transportado vertente abaixo e pode ainda depositar-se no leito dos corpos d'água.

A água da chuva, o mais contundente agente erosivo em condições de clima tropical, representa também a principal entrada de água na bacia hidrográfica. Além de escoar para os rios, a água pode seguir outros caminhos como retornar à atmosfera por evaporação e também infiltrar-se no solo. Na perspectiva de redistribuição da água na paisagem, a capacidade de infiltração do solo destaca-se por ser um fator que atua como integrador das características intrínsecas do solo, constituindo o atributo mais importante para o processo de recarga de água e determinante quanto a suscetibilidade do solo à erosão (CAPECHE et al., 2004).

Para além do tipo de solo, topografia e pluviosidade, outro fator atuante na definição do potencial de recarga de aquíferos, bem como no comportamento erosivo e deposicional de sedimentos erodidos das encostas, é a cobertura do solo (TEIXEIRA et al., 2003; LIMA et al., 2005, PRUSKI, 2006). A vegetação pode afetar os atributos do solo, a distribuição e abundância de água no solo, e a susceptibilidade das paisagens à degradação (WILSON & GALLANT, 2000). A presença de florestas ripárias em especial, desencadeia processos que interferem na dinâmica das águas superficiais e subterrâneas e dos processos deposicionais que formam o ambiente físico que a sustenta.

A recarga de águas subterrâneas é o processo pelo qual ocorre a entrada de água para o aquífero (XU & BEEKMAN, 2003; YIN et al., 2011), ou ainda, a passagem de água da zona vadosa à zona saturada do solo (OLIVEIRA, 2004). Xu & Beekman (2003) enumeram quatro tipos principais de processos por meio dos quais pode ocorrer a recarga: fluxo descendente de água através da zona não saturada que atinge o lençol freático; fluxo lateral ou vertical entre aquíferos; fluxo proveniente de corpos d'água superficiais; e fluxo induzido por meio de poços de injeção ou estruturas artificiais de infiltração. Neste cenário, o fluxo descendente de água é o principal e mais importante dos processos e é controlado, sobretudo, pela capacidade de infiltração do solo (LEAP, 1999).

O solo funciona como um reservatório dinâmico de água, e suas características influenciam esse sistema de partição de água, afetando de forma direta o processo de recarga de aquíferos. Essa influência está diretamente associada aos atributos do solo, ao uso do solo e a sua posição na paisagem, fatores estes que governam sua capacidade de infiltração (MENEZES et al., 2009).

Portanto, o processo de infiltração depende, em maior ou menor grau, de diversos componentes. Rawls et al. (1996) classificam como os mais influentes àqueles ligados ao solo como, a umidade, a capacidade de retenção e a condutividade hidráulica. Neste sentido, Lima (2005) destaca a influência da textura e estrutura do solo sobre o processo de infiltração. A textura refere-se à quantidade de elementos contidos no solo como areia, silte e argila, enquanto a estrutura é representada pela densidade e pela porosidade. Estes atributos são determinantes na movimentação de água no perfil do solo, uma vez que determinam a quantidade e disposição dos poros, afetando diretamente não só a infiltração, mas também outras propriedades como a aeração, a percolação, a capacidade de retenção, entre outras.

Um dos atributos mais significativos quando abordamos o processo de infiltração de água no solo é a condutividade hidráulica saturada. Este atributo representa a capacidade de transporte de água no solo. Ele indica a facilidade com que o solo transmite a água e assim fornece informações importantes sobre o movimento de água neste meio (MESQUITA & MORAES, 2004). Além disso, como descrito por Beven & Germann (1982), a condutividade hidráulica saturada se relaciona positivamente com a macroporosidade. Esta associação se deve ao fato dos macroporos atuarem como reservatórios transitórios de água, contribuindo para o fluxo de água também nos poros com pequeno ou nenhum fluxo e permitindo o movimento da água mesmo quando o solo não está totalmente saturado. Cabe citar que em relação ao movimento da água nos macroporos, sempre predomina a força da gravidade em relação à força capilar.

Santos & Pereira (2013) registram, além da importância da textura e da estrutura, como propriedades determinantes na movimentação de água no perfil do solo, o relevante papel de outros dois fatores: o relevo, uma vez que áreas planas tendem a absorver a maior parte da água e áreas inclinadas tendem a propiciar um maior escoamento superficial e baixas taxas de infiltração; e a cobertura vegetal, fundamental nos processos de interceptação da chuva e de escoamento superficial, processo este também fundamental ao entendimento da dinâmica da água na paisagem.

O escoamento superficial por sua vez, tem como principais fatores de influência: intensidade da precipitação, diferenças de altitude, umidade, profundidade e declividade do solo além do grau de desmatamento da bacia hidrográfica (TUCCI & CLARKE, 1997). Neste contexto, Beven & Kirkby (1979) e Santos & Kobiyama (2008) descrevem que o escoamento superficial é controlado sobretudo pela topografia, que também apresenta forte influência no movimento de água subterrânea, revelando esta característica da paisagem como a mais importante no tocante ao controle do fluxo de água, e demonstrando assim sua importância como elemento no ciclo hidrológico. A topografia também é destacada por Resende et al., 1998 que indicam que devemos analisar os solos como corpos tridimensionais com profundidade e relevo, já que estes fatores exercem grande efeito sobre o escoamento superficial.

Outro fator fundamental aos processos de escoamento superficial e infiltração é a cobertura vegetal. Tal fator, além de interferir diretamente no direcionamento e na velocidade do fluxo superficial, influencia também os atributos físico-hídricos do solo e, conseqüentemente, a dinâmica da água na paisagem. A vegetação tem papel de destaque em todo o processo hidrológico de uma bacia hidrográfica, principalmente na interceptação e evapotranspiração atuando, indiretamente, em todas as fases do ciclo hidrológico (TUCCI & CLARKE, 1997). A cobertura vegetal promove a dissipação da energia cinética das gotas das chuvas e reduz a desagregação das partículas de solo pelo aporte de matéria orgânica, diminuindo a velocidade do escoamento superficial e, conseqüentemente, reduzindo também o processo erosivo (COGO et al., 1984; ZHOU et al., 2002). Portanto, o uso do solo pode alterar a qualidade e quantidade de água na bacia, bem como influenciar o armazenamento de água subterrânea e o regime da nascente e dos cursos d'água (PINTO et al., 2004).

Assim, o presente estudo pretendeu entender as variáveis que interferem nos processos de recarga de aquíferos e integrá-las de modo a estabelecer as áreas mais favoráveis ao processo de recarga na sub-bacia de estudo.

## OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo principal elaborar modelos integrados para o zoneamento das áreas favoráveis ao processo de recarga das águas subterrâneas em uma sub-bacia inserida na Estação Ecológica de Mogi Guaçu (EEcMG).

Os objetivos específicos são:

- Realizar a avaliação e o mapeamento dos atributos hidrodinâmicos do solo: textura, densidade, porosidade e condutividade hidráulica, na sub-bacia de estudo da Estação Ecológica de Mogi Guaçu (EEcMG) através de geoestatística;
- Analisar a influência da topografia na dinâmica do fluxo superficial via Índice Topográfico de Umidade (TWI);
- Analisar a cobertura vegetal pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e sua influência na movimentação da água na paisagem.

## REVISÃO DE LITERATURA

### RECARGA

Atualmente uma nova concepção de pesquisa ligada ao entendimento do ciclo hidrológico e sua interação com a paisagem tem se tornado necessária para analisar os processos ambientais que envolvem desde a cobertura vegetal até o sistema aquífero, a designada zona crítica (NRC, 2001). Esta é a zona onde todos os principais processos associados ao ciclo hidrológico ocorrem, tomando como referência a cobertura vegetal e sua relação com a atmosfera, pedosfera, hidrosfera e a litosfera. Enquanto o comportamento da água nos aquíferos é abordado na hidrogeologia e da atmosfera na hidrometeorologia, a interação entre o fluxo de água no perfil do solo (zona vadosa) até o seu processo de recarga e todas as consequências dessa interação, encontra subsídios na hidropedologia (LIN, 2010; MELLO & CURI, 2012).

O processo de recarga tem início com a infiltração da água superficial e sua infiltração através do perfil do solo, alcançando os aquíferos. Este processo pode levar dias, meses ou anos dependendo das características dos solos e dos aquíferos, tais como profundidade, geologia e transmissividade. Contudo, em função das características pedogenéticas dos horizontes, pode ocorrer uma importante concentração de água em subsuperfície, cujo fluxo também pode contribuir para a zona saturada, o fluxo no canal e a recarga em profundidade (MELLO & CURI, 2012). Dessa forma, sob condições específicas, a bacia pode apresentar a predominância de certos fluxos preferenciais e, conseqüentemente, ter o ciclo hidrológico afetado pelo próprio comportamento do solo (MENEZES et al., 2009; ALVARENGA et al., 2011).

Sob a perspectiva de relacionar a microescala e a macroescala, é possível entender o comportamento da água no perfil do solo, sua distribuição e formação de fluxos preferenciais, o que constitui um avanço na predição de fenômenos hidrológicos. Esta integração dos fenômenos que ocorrem em microescala referente aos poros e agregados do solo, mesoescala associada às topossequências e, macroescala considerando a bacia hidrográfica, permite entender os processos de formação da estrutura do solo influenciados pela mineralogia (RESENDE et al., 2007), caracterizar os horizontes pedogenéticos que variam ao longo de uma topossequência e caracterizar a paisagem de uma bacia hidrográfica. Assim, considera-se ainda a influência da paisagem na pedogênese da topossequência, especialmente pelos



processos hidrológicos de sedimentação e os solos que são formados nesse processo (MELLO & CURI, 2012).

A partir da avaliação das propriedades hidrodinâmicas do solo, variáveis espacialmente em função do relevo e conforme a estruturação do solo, considerando seus componentes sólidos (textura, agregação e horizontes) e o espaço poroso, é possível inferir sobre o processo de recarga dos aquíferos e a manutenção do fluxo de base dos rios. Assim, potenciais indicadores hidrológicos do solo são representativos na avaliação da recarga de água subterrânea, conforme verificado por Alvarenga et al. (2012) em um dos estudos pioneiros visando avaliar a recarga de água subterrânea a partir da geração de um índice de qualidade do solo, relacionando a textura, macroporosidade e densidade do solo, além da condutividade hidráulica, que reflete as condições de permeabilidade do meio.

Em relação à pedoforma, o controle sobre a recarga é exercido através da quantidade de água que se infiltra nos perfis (BOTELHO & SILVA, 2004; SHOENEGER & WYSOCKI, 2005). Juntamente com a declividade, a forma e a cobertura das encostas regula ainda o processo do escoamento superficial das águas pluviais e interfere diretamente no processo de infiltração.

Assim, observa-se que os processos de escoamento, transporte de sedimentos, infiltração e armazenamento de água no solo são fenômenos complexos que envolvem vários sistemas interdependentes, tornando seu estudo específico e dependente das condições peculiares de cada local (MONTENEGRO et al., 2013).

## **GEOESTATÍSTICA**

A necessidade de se prever valores (informações) em locais não amostrados é uma demanda técnico/científica presente em diversas áreas do conhecimento. Assim, a metodologia geoestatística procura extrair, a partir de uma aparente aleatoriedade dos dados coletados, uma função de correlação entre os valores situados numa determinada vizinhança e direção no espaço amostrado (LANDIM & STURARO, 2002).

A geoestatística teve início com os estudos desenvolvidos empiricamente por Daniel Krige na década de 50/60 para prever o teor de minério entre amostras correlacionadas espacialmente nas minas de ouro da África do Sul. Tais estudos foram descritos teoricamente pela primeira vez nos trabalhos do Dr. Matheron, na França dos anos 1960, em sua teoria das variáveis regionalizadas que supõe uma correlação espacial entre os valores amostrados e a distância entre eles (MATHERON, 1965). O termo krigagem foi dado pelo Dr. Matheron em homenagem ao sr. Krige.

A Krigagem Ordinária (K.O.) é popular em estudos em todo o mundo sendo utilizada inicialmente por pedólogos, hidrólogos, geólogos e pesquisadores da atmosfera e atualmente atinge áreas como engenharia do petróleo, mineração, meteorologia, ciências do solo, agricultura de precisão, controle de poluição, saúde pública, pesca, ecologia vegetal e animal e sensoriamento remoto (OLIVER & WEBSTER, 2014).

Assim como outras variáveis ambientais, os atributos do solo também são pesquisados através de amostras pontuais que, na realidade, representam uma variação contínua de um atributo no espaço do qual as amostras foram retiradas. A grande popularidade da krigagem vem do fato de que suas estimativas nos pontos não amostrados são confiáveis, ou seja, sem parcialidade e com variância mínima (OLIVER & WEBSTER, 2014), bem como sem erros de excessos (KRAEMER, 2007). Segundo Silva et al. (2015), no que se refere à interpolação de atributos do solo, a K.O. é o método mais utilizado.

A variação dos atributos do solo é descrita em muitos estudos de estatística clássica como uma função aleatória, contudo, também é reconhecido que as variações espaciais dos solos têm como fonte primária os fatores pedogenéticos e como fonte secundária o uso e manejo do solo. Normalmente, a variação espacial tende a diminuir com a distância entre os pontos amostrados (CERRI et al., 2004). As dimensões das pesquisas são muito variáveis e, de acordo com Cerri et al. (2004), a geoestatística tem sido utilizada na ciência do solo para descrever a variação espacial em escalas da ordem de centímetros até quilômetros.

As vantagens reconhecidas da geoestatística sobre outras técnicas convencionais de predição são as seguintes: o estudo da variabilidade espacial (a análise de um variograma é a única técnica disponível para medir a variabilidade espacial de uma variável regionalizada), o desagrupamento (ou efeito de anular as concentrações localizadas de observações), a determinação da anisotropia (os comportamentos da variabilidade nas diferentes direções são considerados) e a incerteza (estimativa obtida por meio da krigagem associa a margem de erro que acompanha à estimativa) (VIEIRA et al., 1983).

Como listado por Silva Júnior et al. (2013), na literatura existem inúmeros trabalhos acerca da variabilidade espacial de atributos do solo, sendo que a maioria utiliza a krigagem ordinária (KO) para a interpolação de mapas de variabilidade espacial, por ser considerado um interpolador local ótimo, possuindo um comportamento não enviesado nos pontos não amostrados e resultados com variância mínima e sem tendências (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

O semivariograma expressa matematicamente a maneira pela qual a semivariância da propriedade muda conforme a distância e a direção de separação entre dois pontos. A

geoestatística permite que se utilize o semivariograma por toda a região analisada na suposição de que a função da semivariância (Figura 1) depende apenas da separação entre dois pontos e não da posição absoluta dos mesmos (OLIVER & WEBSTER, 2014):

$$\gamma_{(h)} = \frac{1}{2N_{(h)}} \sum_{i=1}^{N_{(h)}} [z(x+h) - z(x)]^2$$

onde:  $\gamma$  = semivariância;  $N$  = nº de pares de amostras;  $z$  e  $x$  = pares ordenados;  $h$  = distância entre os pares.

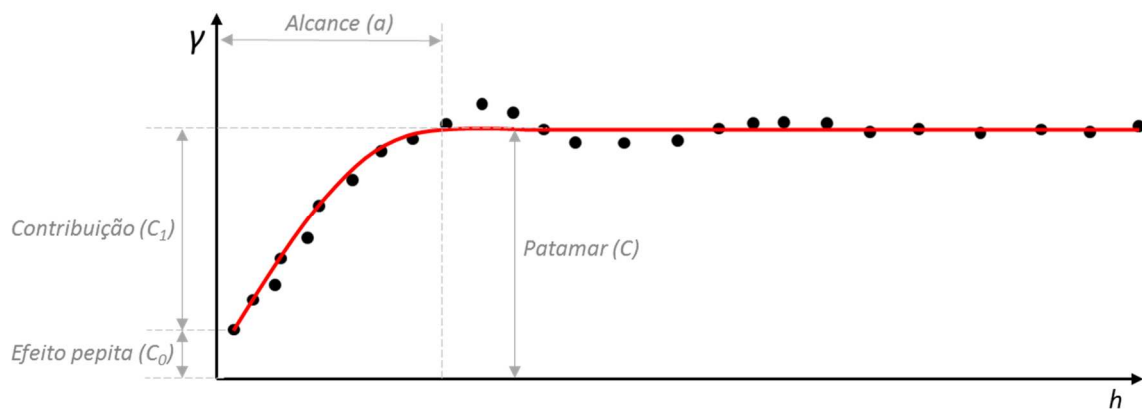


Figura 1 – Exemplo de variograma experimental; indicação dos parâmetros básicos no ajuste de modelos teóricos.

A partir da construção do variograma, o ajuste dos modelos testados deve levar em consideração os seguintes parâmetros descritos a seguir:

Alcance ( $a$ ), representa a máxima distância na qual os pontos amostrais estão correlacionados entre si. Marca o ponto a partir do qual a variabilidade se estabiliza e alcança seu máximo patamar; Efeito Pepita ( $C_0$ ) representa os erros amostrais da variável de estudo bem como as fontes de variação espacial não captadas e/ou aleatórias. Indica a descontinuidade espacial da variável; Contribuição ( $C_1$ ) representa a variabilidade encontrada e explicada pela dependência espacial medida entre as amostras analisadas; Patamar ( $C$ ) que é o valor máximo da variabilidade encontrada e é atingido concomitantemente ao máximo valor de alcance do modelo, seu valor normalmente se aproxima do valor da variância das amostras.

Quanto aos modelos teóricos necessários para a predição dos valores via krigagem, segundo Furtunato et al. (2013) existem dezenas deles, sendo mais encontrado na literatura de ciência do solo o modelo esférico.

## ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE

Segundo Capoane et al. (2015), a manutenção da qualidade ambiental de bacias hidrográficas agrícolas, está diretamente relacionada com áreas de saturação hídrica temporária ou permanente, que exercem uma importante função do ponto de vista hidrológico, ecológico e geomorfológico. Essas áreas, apresentam forte relação com a dinâmica do lençol freático, devido à expansão e contração durante eventos pluviométricos.

A modelagem do relevo e dos atributos topográficos com finalidade de estudos hidrológicos, pedológicos e geomorfológicos vem se desenvolvendo rapidamente com o avanço da computação e a implementação de novas teorias e novos modelos de cálculo. A identificação de áreas com saturação hídrica temporária ou permanente é um dos objetos de estudo desse campo e os Índices Topográficos de Umidade (sigla TWI – acrônimo em inglês para *Topographic Wetness Index*) são de grande relevância neste sentido, pois abordam a relação entre a declividade local e a área de contribuição específica de montante, possuindo assim, uma variação espacial significativa (CAPOANE et al., 2015).

Atributos topográficos podem ser divididos em primários e secundários ou compostos. Atributos primários podem ser obtidos diretamente do modelo digital de elevação (MDE) e incluem variáveis como elevação, declividade, plano e perfil de curvatura, caminho de fluxo e área específica de contribuição. Os atributos secundários ou compostos envolvem combinações de atributos primários e podem ser usados para caracterizar a variabilidade espacial de processos específicos que ocorrem na paisagem (SIRTOLI et al., 2008).

O estudo dos MDE pode auxiliar o estabelecimento de relações de influência da topografia, da hidrologia e da quantidade e tipo da vegetação sobre as classes de solos melhorando o entendimento dos componentes da paisagem e suas interações (CAMPOS et al., 2006).

Neste sentido, merece atenção especial a qualidade da base de dados que dará origem ao MDE. Atualmente, existe grande disponibilidade de diversas bases de dados altimétricos, como as cartas topográficas do território nacional digitalizadas, elaboradas pela Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) do Exército na década de 70, e as bases globais digitais obtidas por radar, como a SRTM (90 m) e a TOPODATA (30 m). Contudo, cabe ressaltar que as citadas referências não apresentam resultados confiáveis para estudos mais detalhados em escala inferior a 1: 50.000.

O índice topográfico de umidade (TWI), por definição, apresenta a distribuição das zonas de saturação de água superficial e do conteúdo de água nos solos (SIRTOLI et al.,

2008). Assim, com base no MDE, o TWI estima um balanço entre acúmulo de água e condições de drenagem em escala local (HANCOCK et al., 2010).

Numericamente o TWI é representado pela expressão (BEVEN & KIRKBY, 1979):

$$TWI = \ln \frac{a}{\tan b}$$

onde:  $a$  = área de contribuição  $\times$  tamanho do grid em  $m^2$ ;  $b$  = declividade expressa em radianos.

O modelo considera que o fluxo infiltra até um plano de mais baixa condutividade, em geral o contato solo-rocha, seguindo então um caminho determinado pela topografia. A área de contribuição permite determinar a rede de drenagem considerando a direção do escoamento superficial e o fluxo acumulado. A modelagem da área de contribuição é realizada recorrendo ao MDE, visto que este contém informações que permitem determinar a rede de drenagem superficial. Assim, a área de contribuição de cada célula (pixel) do MDE, considerando uma grade de células, é a sua própria área mais a área dos vizinhos à montante que possuam alguma fração drenada para o pixel em questão. A área de contribuição ( $a$ ) em hectares (ha) de uma grade de células é calculada a partir do produto do fluxo acumulado multiplicado pela área de cada célula ( $\eta$ ) (10m) (MOORE et al., 1993):  $a = \chi * \eta$ .

Além da área de contribuição o modelo considera também a declividade, que exerce uma influência direta não só sobre o fluxo da água, como também no processo erosivo, no sombreamento, na energia solar recebida, na reflectância da superfície, na temperatura, dentre outras variáveis. Conceitualmente, a declividade do terreno é definida como a taxa de diminuição da altura na direção do aspecto, e o aspecto corresponde à direção de máximo gradiente (MINELLA & MERTEN, 2012).

### **COBERTURA VEGETAL E ESCOAMENTO SUPERFICIAL**

O escoamento superficial e a erosão ocorrem rapidamente em áreas com menos de 70% de cobertura vegetal (GUERRA, 1998). Quando a chuva cai em uma área coberta com vegetação mais densa, a gota de chuva se divide e perde sua força de impacto. Os benefícios da cobertura vegetal podem ser classificados em: proteção direta contra as gotas de chuva; decomposição das raízes das plantas; melhoramento da estrutura do solo pela matéria orgânica e diminuição do escoamento superficial da enxurrada (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2005). A espécie vegetal, aspectos físicos e morfológicos da cobertura vegetal (tipo, densidade, grau de desenvolvimento, arquitetura da planta, índice de área foliar, alteração

sazonal da cobertura vegetal, etc) são fatores de elevada importância na redução do escoamento superficial.

Quando a chuva atinge um solo com cobertura vegetal, parte do volume precipitado é armazenado em folhas e caules. Este processo, no qual a água da chuva é temporariamente retida pela vegetação e redistribuída em água que respinga no solo, água que escoar pelo caule e água que volta à atmosfera por evaporação, é denominado interceptação. A interceptação da água da chuva é um processo que atua diretamente na redução da erosão por atenuar o impacto das precipitações, diminuindo a energia de impacto das gotas de água no solo, e causar uma redistribuição aérea da água da chuva pela cobertura vegetal, aumentando o tempo de retenção de água na paisagem.

A vegetação reduz a velocidade da água na superfície do solo uma vez que se torna um obstáculo ao escoamento superficial, promove maior sustentação mecânica do solo e favorece a existência de canais de drenagem onde a água pode penetrar, diminuindo a quantidade de água que escoar na superfície do solo e, conseqüentemente, aumentando a infiltração. A quantidade de água que evapora diretamente das folhas caracteriza a perda por interceptação, fator que pode reduzir significativamente a quantidade de água que chega ao solo, dependendo das características da vegetação e da intensidade das chuvas.

## **LÓGICA FUZZY**

A quantidade ou volume de água subterrânea de uma determinada área depende das características hidrogeológicas da camada geológica e da capacidade de infiltração ou recarga. A integração dos dados via Lógica Fuzzy, de forma a se avaliar as áreas favoráveis ao processo de recarga, permite uma observação integrada das variáveis e possibilita, para além da determinação das áreas favoráveis, um entendimento da influência de cada um dos fatores analisados e também do seu efeito conjunto. A capacidade de gerar mapas sem o estabelecimento de limites abruptos constitui uma grande vantagem deste método, sendo mais adequado para aplicações onde as mudanças ocorrem de forma gradual, como nos solos encontrados na sub-bacia de estudo.

Na literatura encontram-se inúmeras aplicações da lógica fuzzy e no tocante a este estudo, duas características merecem destaque: a capacidade de manipular processos que envolvem a resolução de equações diferenciais dependentes de parâmetros, como os que requerem o conhecimento do movimento de água no solo (DOU et al., 1999), e a capacidade de incorporar e modelar matematicamente informações vagas e imprecisas, naturais da

linguagem humana e, portanto, as fornecidas pelos especialistas (não matemáticos) ao caracterizar os processos estudados (AMENDOLA et al., 2005).

Assim, os sistemas de inferências baseados em lógica fuzzy possibilitam a captura do conhecimento próximo ao “modelo cognitivo” utilizado pelos especialistas na análise de problemas. Isto significa que o processo de aquisição do conhecimento é mais fácil, mais confiável e menos sujeito a erros não identificados (MOREIRA et al., 2001). Segundo Bonisch (2004), a lógica fuzzy tem como objetivo modelar o raciocínio humano, possibilitando trabalhar com informações incertas ou imprecisas, fornecendo respostas para questões baseadas em conhecimentos inexatos, incompletos ou não totalmente consolidados.

A lógica fuzzy foi criada por Lofti A. Zadeh no início de 1960 e é considerada uma análise algébrica de mapas não cumulativa ou análise lógica. A lógica fuzzy é definida como “a parte da lógica matemática dedicada aos princípios formais do raciocínio incerto ou aproximado, portanto, mais próxima do pensamento humano e da linguagem natural” (KATINSKY, 1994). Por ser uma ampliação da teoria convencional de conjuntos, a sua utilização é apropriada em sistemas que se caracterizam pela generalidade, ambiguidade e imprecisão (FUKS, 1998).

O método é maleável, pois, no processo de atribuição de pesos às diferentes evidências, os valores, chamados de conjuntos fuzzy, são fracionários e variam entre 0 e 1, respectivamente, para ausência e presença potencial de uma área de interesse, sendo que os valores intermediários significam diferentes graus de possibilidade da existência ou não dessa área (BONHAM-CARTER, 1994). Portanto, a lógica fuzzy permite criar classes contínuas bem mais flexíveis, onde um indivíduo pode pertencer totalmente, pertencer parcialmente ou não pertencer à determinada classe. Essas classes definidas de maneira inexata são chamadas de conjuntos fuzzy.

Para se caracterizar formalmente um conjunto, pode-se recorrer ao conceito de função de pertinência (FP), definido como uma função que, dado o valor de um atributo  $z$ , ela determina se o elemento avaliado pertence ou não a um determinado conjunto em análise (CÂMARA et al., 2001). A função de pertinência de um conjunto fuzzy depende do significado linguístico definido para esse conjunto e de sua interpretação no contexto do universo de discurso utilizado. Na lógica fuzzy, o grau de pertinência de um elemento em relação a um dado conjunto é uma função característica real, que pode assumir qualquer valor real no intervalo entre 0 e 1.

Existem atualmente diversas funções para transformação das variáveis de entrada em conjuntos fuzzy. As principais são as funções *Gaussian*, *Linear*, *Large* e *Small*. A função

*Gaussian* transforma o intervalo de entrada da variável de interesse em uma distribuição normal. O ponto médio da distribuição proposta é o valor 1 (Figura 2-A), com o restante dos valores de entrada decrescendo à medida que se afastam do ponto médio em ambas as direções, positiva e negativa, até valores muito próximos de zero (ESRI, 2014). Esta função é usualmente utilizada quando a faixa de interesse de uma determinada variável é próxima a um valor específico. A largura da zona de transição, ou seja, a abertura do “sino” referente à distribuição normal (Figura 2-A), pode ser controlada durante a transformação através do parâmetro de espalhamento da função.

A função *Linear* estabelece uma relação linear entre os valores mínimo e máximo determinados pelo operador. Assim, será atribuído o valor zero para o valor mínimo e todos aqueles abaixo deste, e o valor 1 para o valor máximo e todos aqueles acima dele (Figura 2-B). Esta relação também pode ser aplicada de forma invertida, estabelecendo maiores resultados para as áreas de valor mínimo ou abaixo, e menores resultados para as áreas de valor máximo ou acima (ESRI, 2014).

A função *Large* deve ser utilizada quando a probabilidade de interesse aumenta com o aumento da variável de entrada, ou seja, quanto maior o valor de determinada variável maior a probabilidade da presença do atributo desejado. Quando a probabilidade de interesse aumenta com a diminuição da variável de entrada, ou seja, quanto menor o valor de determinada variável maior a probabilidade da presença do atributo desejado, utiliza-se a função *Small*. Em ambas as possibilidades, o valor médio (Figura 2-C e 2-D) marca o ponto a partir do qual o valor de entrada passa a pertencer à classe de interesse e, conseqüentemente, quanto mais abaixo deste ponto, menos interesse haverá na área (ESRI, 2014).



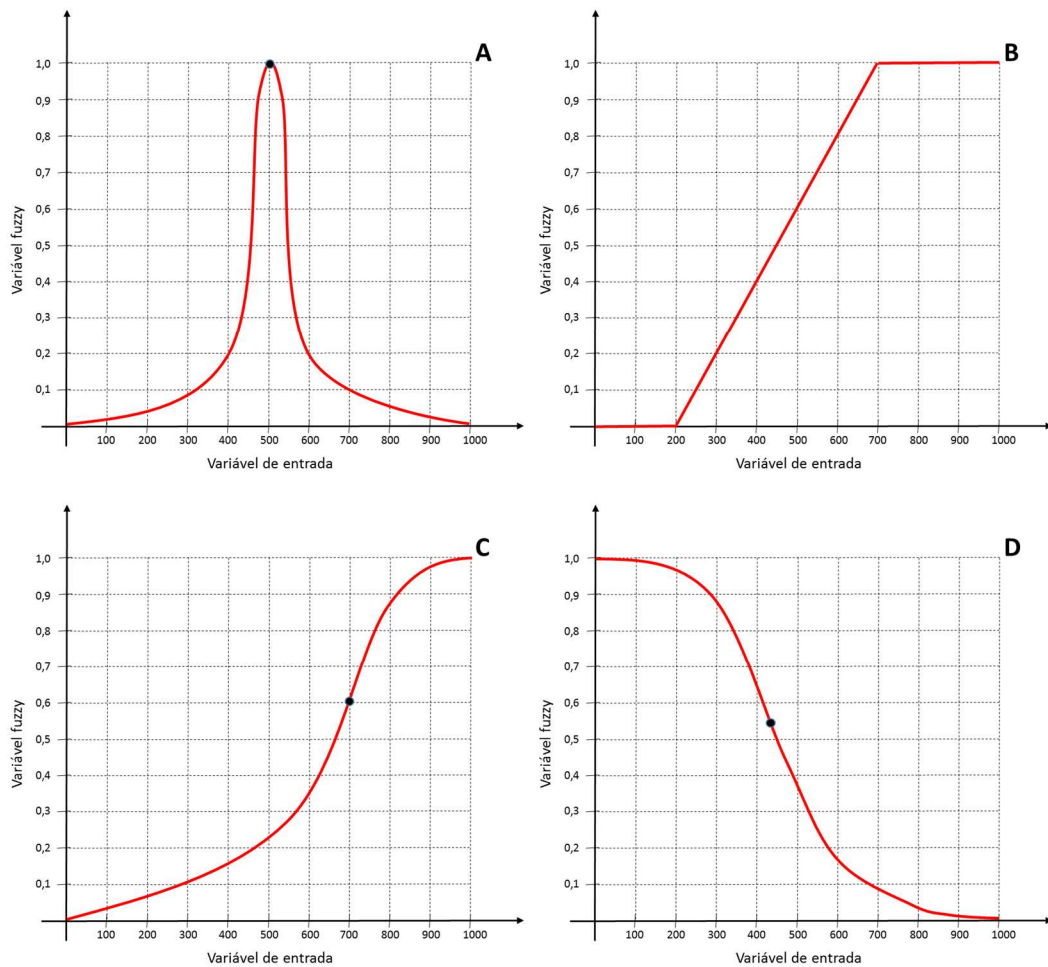


Figura 2 – Valores possíveis para variáveis fuzzy de acordo com as funções de pertinência *Gaussian* (A), *Linear* (B), *Large* (C) e *Small* (D).

Os operadores fuzzy mais comuns são: AND (e), OR (ou), produto algébrico, SUM (soma algébrica) e GAMMA. O operador fuzzy GAMMA é interessante pelo fato de contrabalancear os efeitos minimizantes do produto algébrico fuzzy com os valores maximizantes do operador soma algébrica fuzzy, caracterizando-se pela minimização de influência tendenciosa para a seleção de alvos. É dado por pela formulação apresentada a seguir (BONHAM-CARTER, 1994):

$$\mu_{\text{gamma}} = (\mu_{\text{soma}})^{\gamma} * (\mu_{\text{produto}})^{1-\gamma}$$

onde,  $\mu_{\text{gama}}$  = possibilidade fuzzy resultante,  $\gamma$  = parâmetro escolhido na variação entre 0 e 1.

Quando  $\gamma$  é 1, a combinação fuzzy gama compreende o resultado da soma algébrica fuzzy. Quando  $\gamma$  é 0, o resultado final consiste somente na contribuição do produto algébrico fuzzy (AN et al., 1991; BONHAM-CARTER, 1994). Em geral, valores mais usuais de  $\gamma$  na literatura variam de 0,7 a 0,9.

A aplicação subjetiva de uma função de pertinência fuzzy (*Small*, *Large*, categórico, entre outros) permite a modificação do mapa em dados ordenados ou intervalares, gerando as

possibilidades fuzzy (AN et al., 1991; BONHAM-CARTER, 1994). A lógica fuzzy baseia-se na simplificação de dados rasterizados por meio da fuzzyficação, ou seja, seleção de funções de pertinência fuzzy que permitem o escalonamento dos dados originais em graus de variabilidade entre 0 (pertinência ausente) e 1 (pertinência total).

## MATERIAL E MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está inserida às margens do Rio Mogi Guaçu, no município de Mogi Guaçu, SP, mais precisamente no Complexo de Unidades de Conservação de Mogi Guaçu (CUCMG) composto pela Estação Ecológica (EEc), Estação Experimental (EEEx) e Instituto de Botânica (IB) (Figura 3). A área de estudo está localizada dentro da Estação Ecológica de Mogi Guaçu (EECMG) e possui uma área aproximada de 4,8 km<sup>2</sup>, um perímetro de cerca de 9,8 km e predominância de relevo suave ondulado, com declividade média de 5% (Figura 4-b).

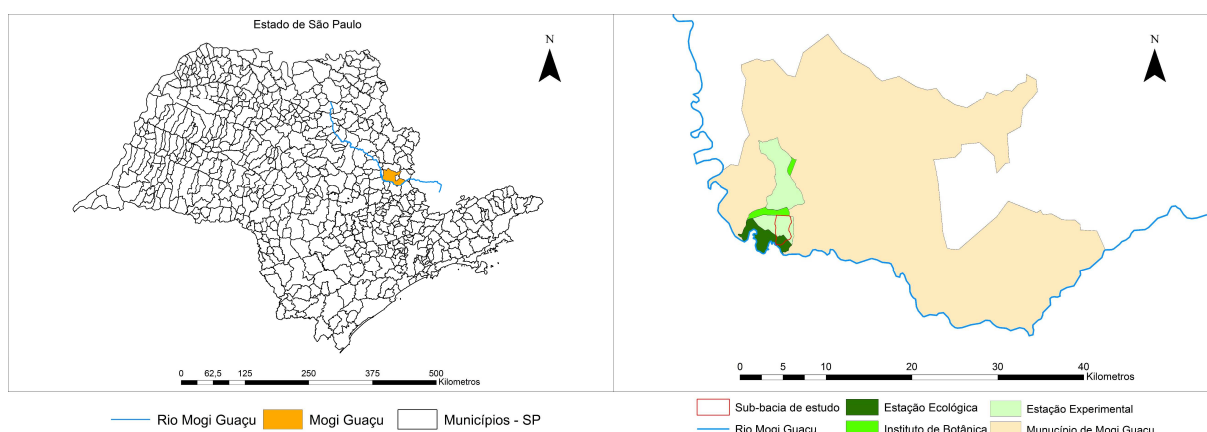


Figura 3 – Localização da sub-bacia de estudo e do Complexo de Unidades de Conservação de Mogi Guaçu (CUCMG).

De acordo com o mapa pedológico na escala 1: 50.000, Quadricula de Araras (SF-23-Y-A-II), contido no Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo de 1981, a classe de solo predominante na área de estudo é a dos Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) (Figura 4-a), sendo que o LVA Distrófico ocupa a maior parte da área, cerca de 75%, e localiza-se preferencialmente nas áreas de relevo ondulado (Figura 4-b); e o LVA Distrófico cambissólico, que pode ocorrer em associação com Cambissolos e Gleissolos, ocupa as demais porções que correspondem exclusivamente às áreas mais baixas do relevo e ocupadas por vegetação nativa. Vale citar que nesta área, os solos são formados a partir de rochas areníticas da Formação Aquidauana e de Depósitos Aluvionares (EMBRAPA, 2006).

A classe dos Latossolos constitui o agrupamento mais extenso do Estado de São Paulo correspondendo a cerca de 52% da área do Estado. São em geral solos com boas propriedades físicas e situados em relevo suave. São solos com boa drenagem interna, mesmo nos de textura argilosa. Na maioria dos casos os Latossolos Vermelho-Amarelos ocorrem em

associações com solos como os Cambissolos, Neossolos, entre outros, sendo normalmente o termo principal desta mistura (Oliveira, 1999).

Os principais usos do solo na área são: florestas plantadas de Pinus e Eucalipto, florestas nativas e pastagem (Figura 4-c). O clima definido para a área varia, de acordo com a classificação de Koppen, entre clima Aw (clima tropical com estação seca de inverno e chuvosa no verão) e clima Cwa (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente). Na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu as temperaturas médias anuais variam de 20,5 °C a 22,5 °C e as precipitações médias anuais variam de 1.400 a 1.600 mm (SPAROVEK et al., 2007).

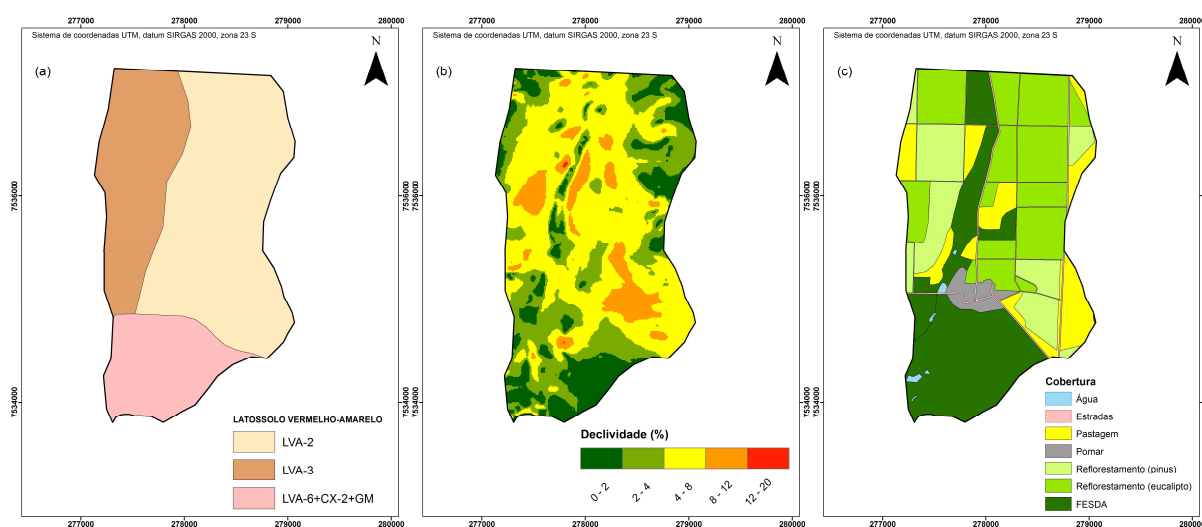


Figura 4 – Mapas de solos\* (a), declive (b) e usos do solo e amostragem (c) na sub-bacia de estudo. \*Legenda: LVA-2 = Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, A moderado, textura média, Unidade Coqueiro; LVA-3 = Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, A moderado, textura média, Unidade Laranja Azeda; LVA-6 + CX-2 + GM = Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico cambissólico, A moderado ou proeminente, textura indiscriminada, Unidade Campininha + Cambissolo Háptico, A moderado ou proeminente, textura indiscriminada, bem a imperfeitamente drenado, Unidade Sete Lagoas + Gleissolo Melânico com ou sem ocorrência de solo orgânico.

## FLORA E FAUNA

A vegetação original da região possui, de acordo com o IF-SP, variações do cerrado ao campo, incluindo as matas ciliares. As fisionomias mais presentes na área de estudo são os trechos de cerrado e as Florestas Estacionais Semidecíduais, em muitos casos, em formações Aluviais, comumente chamadas de matas de galeria ou ciliares. Estas fisionomias, abriga algumas espécies raras, constantes em listas oficiais de espécies ameaçadas de extinção como a *Aristolochia labiata* Willd, *Eriotheca pubescens* (Mart. & Zucc.) Schott & Endl. e as palmeiras *Acanthococos emensis* Toledo e *Euterpe edulis* Mart (Palmito Juçara), entre outras.

Entre as espécies comuns e encontradas abundantemente nas formações ciliares podemos citar: a louveira (*Cyclolobium vecchii*), pau-espinho (*Mimosa laticifera*), o jenipapo (*Genipa americana*), o ingá (*Inga sessilis*) e a copaíba (*Copaifera langsdorffii*). Nos trechos mais cerrados são comuns espécies como o angico (*Anadenanthera falcata*), o leiteiro (*Aspidosperma tomentosum*), o pau-santo-da-serra (*Kielmeyera lathophytum*) e a perobinha (*Acosmium dasycarpum*), entre outras espécies arbóreo-arbustivas locais.

Além disso, possui ainda uma fauna presente, destacando-se a ocorrência da onça-parda (*Puma concolor*), do tamanduá-bandeira (*Myrmecophaga tridactyla*), do lobo-guará (*Chrysocyon brachyurus*), do gavião belo (*Busarellus nigricollis*) e da perdiz (*Rhynchotus rufescens*), que também constam em listas oficiais de espécies ameaçadas.

### **PREMISSAS BÁSICAS PARA O DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS**

A elaboração dos modelos para o zoneamento de áreas favoráveis ao processo foi realizada considerando-se não somente a representatividade dos fatores texturais, estruturais, topográficos e de cobertura do solo explanados neste tópico, como também procurou-se atender aos seguintes itens:

- Modelo simples;
- Modelo ponderado;
- Modelo com o menor número de variáveis possível;
- Modelo com variáveis de amostragem simples;
- Modelo com variáveis de amostragem economicamente viável;
- Modelo com variáveis de amostragem cronologicamente viável;
- Modelo com significado físico e teórico sobre o fenômeno analisado.

Esses aspectos visaram gerar resultados que possam representar as áreas favoráveis ao processo de recarga de água de maneira prática e otimizada, com o intuito de facilitar a previsão de cenários e comportamentos das águas superficiais e subterrâneas, contribuindo assim como uma ferramenta útil para a gestão destes recursos.

### **CONSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS À SUB-BACIA DE ESTUDO**

Como consequência da fundamentação teórica, a escolha das variáveis de entrada para o mapeamento das áreas favoráveis à recarga na sub-bacia de estudo foi realizada em concordância com as seguintes diretrizes:

1. A quantidade ou volume de água subterrânea da área de estudo depende das características texturais e estruturais do solo, bem como da capacidade de infiltração ou recarga;

2. A relação escoamento/infiltração/evaporação é variável conforme alguns fatores a serem considerados em conjunto: permeabilidade, topografia e vegetação;
3. A percolação da água relaciona-se diretamente à porosidade do solo, sendo maior o predomínio desta quanto maior a porosidade;
4. Quanto à topografia, os terrenos acidentados facilitarão o predomínio do escoamento, enquanto terrenos planos irão favorecer a infiltração e/ou a evaporação;
5. Em relação à vegetação, há favorecimento da infiltração quando densa (florestal), devido à retenção de água pelas folhas que impedem o escoamento imediato, além da matéria orgânica depositada na superfície do solo e em profundidade, que também absorve umidade e contribui para melhorar as características físicas do solo, aumentando a sua permeabilidade.

Além destas, merecem destaque dois pontos relevantes a modelagem das áreas favoráveis ao processo de recarga e peculiares a esta sub-bacia de estudo:

6. O fator pluviosidade, devido a microescala da análise realizada, cerca de 400 ha, pode ser considerado homogêneo em toda a área de estudo e pouco relevante para a diferenciação das zonas favoráveis ou não a infiltração, ficando fora da elaboração dos modelos testados.
7. Em relação a profundidade dos solos, a área de estudo é constituída majoritariamente por pela classe dos Latossolos Vermelho-Amarelos. Segundo EMBRAPA (2006), os Latossolos Vermelho-Amarelos são muito profundos, associados a relevos planos, suaves ondulados ou ondulados, e são uniformes em características de cor, textura e estrutura, em profundidade. Tal fato, teoricamente, além de conferir uma boa homogeneidade em relação à profundidade dos solos na sub-bacia, torna este fator pouco influente na diferenciação entre áreas favoráveis ou não ao processo de recarga, em especial na escala de análise aplicada e, portanto, desnecessário na elaboração dos modelos testados.
8. Pelo critério operacional e prático proposto pela pesquisa, adotou-se que a camada de 20 – 40 cm do solo representa, nestas condições, as principais características texturais e estruturais atuantes no processo de infiltração de água no perfil até a zona vadosa.

## AMOSTRAGEM E ESPACIALIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS DO SOLO

Para o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo foram coletadas amostras com estruturas deformadas e indeformadas para as seguintes análises: areia (%), argila (%), silte (%) (BOUYOUCOS, 1951), densidade do solo ( $D_s$ ) ( $\text{g/cm}^3$ ) (BLAKE, 1965), macroporos ( $M_a$ ) (%), (GROHMANN, 1960) e condutividade hidráulica saturada ( $K_0$ ) ( $\text{cm/h}$ ) (KLUTE, 1965). Como equipamentos para as coletas foram utilizados um facão para a limpeza da área e um enxadão no preparo da superfície e profundidade de coleta. As amostras com estrutura indeformada foram coletadas com o amostrador de Uhland e submetidas às análises de  $D_s$ ,  $M_a$  e  $K_0$ . As amostras deformadas foram coletadas com o trado holandês e utilizadas para as análises de textura.

Para a coleta das amostras foi delineada uma malha amostral regular de 400 x 400 metros em toda a área, definida através de observações realizadas em campo acerca da distância média mínima para uma alteração significativa nas características de interesse do solo, totalizando assim 34 pontos de coleta (Figura 5). Em cada ponto foram coletadas amostras de solo, segundo o Manual de descrição e coleta de solo no campo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo publicado por Santos et al. (2005), na camada de 20 a 40 cm.

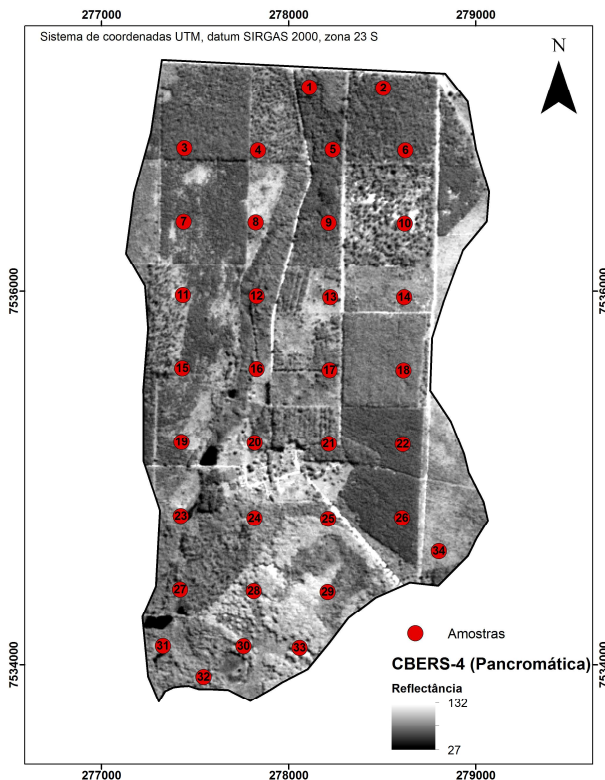


Figura 5 – Mapa da amostragem em grid utilizado para os atributos do solo avaliados.

Todas as análises texturais e físicas citadas foram realizadas pelo Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB) – Esalq – USP - Piracicaba.

Em vista da preparação dos dados para a análise geoestatística, foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados onde, para cada variável estudada, os seguintes parâmetros foram avaliados: máximo, mínimo, amplitude, média, variância e coeficiente de variação (CV). O gráfico de dispersões dos desvios em relação à média também foi elaborado, permitindo a identificação e exclusão de quatro amostras que ficaram fora da distribuição esperada, com valores discrepantes, excessivamente altos ou baixos frente o conjunto de dados. Este procedimento é de grande importância, pois tais valores afetam muito o desempenho dos modelos geoestatísticos causando distorções irreais (OLIVER & WEBSTER, 2014). Por fim, 30 amostras permaneceram para a modelagem espacial, três das quais foram aleatoriamente selecionadas para a validação externa do modelo e, portanto, não utilizadas na construção dos variogramas. Também foram calculadas as correlações entre todas as variáveis estudadas de acordo com o coeficiente de Pearson.

A aplicação da metodologia geoestatística seguiu os procedimentos clássicos descritos por Matheron (1965) e as considerações de Oliver & Webster (2014) sendo testados os modelos teóricos esférico, exponencial e gaussiano.

O variograma de cada modelo testado foi ajustado levando-se em consideração o conceito da continuidade espacial existente nos atributos do solo na área de estudo, a variância das amostras coletadas, a conformidade visual do ajuste e também o cálculo da soma dos quadrados dos resíduos (acrônimo em inglês RSS). A RSS produz uma medida exata da capacidade de ajuste do modelo aos dados de origem e quanto menor o RSS, melhor o ajuste do modelo (ROBINSON & METTERNICHT, 2006).

Os mapas das variáveis foram gerados a partir da Krigagem Ordinária (K.O.), considerando os melhores modelos teóricos ajustados para cada atributo. Os mapas krigados foram testados pela validação externa, que compara valores conhecidos (amostras) com valores estimados (K.O.), através do teste de Tukey a 5% de significância.

## **ANÁLISE TOPOGRÁFICA**

Com o objetivo de se obter uma base de dados sólida e detalhada da sub-bacia de estudo para subsidiar a geração do MDE, foi realizado o levantamento topográfico da área através de uma malha de pontos altimétricos de alta precisão espalhados sistematicamente e tecnicamente em toda a área de estudo, através do equipamento Receptor GNSS Geodésico



Topcon Hiper L1/L2, com 40 canais universais capaz de rastrear sinais de satélites GPS e GLONASS, precisão horizontal de 3 mm + 0,5 PPM e precisão vertical de 5mm + 0,5 PPM.

Os dados levantados foram transferidos para o software ArcGIS 10.2, onde foi realizada a construção do MDE com o auxílio da ferramenta *Topo to Raster*. Esta ferramenta apresenta um método específico de interpolação desenvolvido para a geração de modelos de elevação hidrologicamente corretos. Seu funcionamento prioriza a geração de uma rede fluxo coerente e conectada, bem como garante a correta representação das linhas de cumeada e das linhas de drenagens presentes na base original (ESRI, 2014).

Os atributos topográficos obtidos a partir do MDE e utilizados para a geração do Índice Topográfico de Umidade foram: elevação, declividade, direção de fluxo, fluxo acumulado ou área de contribuição.

A direção, a distribuição e a consequente acumulação do fluxo superficial em um MDE são os principais pontos a serem controlados em um estudo hidrológico. Neste sentido, foi utilizado o software SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*) que apresenta a mais completa base em relação aos algoritmos de direção de fluxo. Merece destaque na literatura e foram testados neste estudo os algoritmos  $D_{\infty}$  (TARBOTON, 1997), MFD – Multiple Flow Direction (FREEMAN, 1991) e Rho 8 (FAIRFIELD & LEYMARIE, 1991).

## **ANÁLISE DA COBERTURA VEGETAL**

Considerando a morosidade e o custo da avaliação direta da cobertura vegetal em campo, e também a boa precisão dos métodos atualmente disponíveis, que consideram a refletância da vegetação via sensoriamento remoto, no presente estudo a cobertura vegetal foi representada pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Para a análise da vegetação através do NDVI utilizou-se a imagem do sensor CBERS-4, disponibilizadas no site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). As imagens passaram por um pré-tratamento, e em seguida foi realizado o registro das cenas pela técnica “mapa para mapa” com auxílio da imagem GeoCover, disponibilizada pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), como referência.

Em seguida, o NDVI foi processado com as bandas 3 (refletância no vermelho) e 4 (refletância no infravermelho próximo) (ASRAR et al., 1984). Este índice representa a vegetação com a habilidade de minimizar os efeitos topográficos ao produzir uma escala linear de medida, a qual varia de -1 (ausência de vegetação) a +1 (alta densidade), em relação à cobertura vegetal.

## MODELAGEM VIA LÓGICA FUZZY

A técnica utilizada para o zoneamento das áreas favoráveis ao processo de recarga de água foi a Lógica Fuzzy. No presente estudo, a escolha das variáveis de entrada foi realizada com base nos critérios apresentados na fundamentação teórica, e seus resultados fuzzyficados expressos em forma de gradiente, sendo os valores mais próximos de 0 (hipótese não satisfeita), com menor possibilidade de ocorrência do fenômeno de interesse e quanto mais próximos de 1 (hipótese satisfeita), maiores as possibilidades de ocorrência.

Todas as variáveis de entrada avaliadas ocorrem de maneira contínua na paisagem, como os índices físicos do solo, o TWI e o NDVI, e foram transformadas através das funções de pertinências fuzzy *Large* e *Small*, as quais melhor representam as variáveis avaliadas. A forma da função foi ajustada em função dos parâmetros ponto médio, que significa o valor de 0,5 de pertinência fuzzy, e/ou pelo espalhamento, que indica o quão rápido a pertinência fuzzy decresce do valor 1 ao 0 (CARRINO et al., 2011).

Para a combinação dos mapas temáticos utilizando à lógica fuzzy, foram aplicados os operadores: AND, SUM e GAMMA. A metodologia fuzzy permite fazer previsões quanto aos cenários mais ou menos suscetíveis a um determinado fenômeno, por meio de manipulação dos valores do Índice Gama ( $\gamma$ ) (SILVA, 2003). Neste estudo, o operador GAMMA foi testado com 5 variações no valor do Índice Gama ( $\gamma$ ): 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9. Assim, foram gerados modelos de lógica fuzzy com os operadores citados com três diferentes grupos de variáveis de entrada: índices físicos do solo (areia, macroporosidade e densidade do solo); índices físicos + TWI (*Topographic Wetness Index*); índices físicos + TWI + NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

O mapeamento da condutividade hidráulica saturada (K0) realizado com amostras de campo foi utilizado como referência para a avaliação qualitativa dos modelos gerados, devido à grande representatividade deste atributo no processo de infiltração da água na paisagem. Além disso, para um melhor entendimento dos modelos, foi feita uma análise quantitativa dos resultados gerados pelos modelos de lógica fuzzy elaborados. Para tanto, os mapas foram classificados em 4 classes de pertinência (possibilidade): 1 – muito baixa (0 – 0,25); 2 – baixa (0,25 – 0,50); 3 – média (0,50 – 0,75); e 4 – alta (0,75 – 1).

## RESULTADOS

### ANÁLISE DOS ATRIBUTOS DO SOLO

Os resultados da análise descritiva dos atributos do solo amostrados referentes a textura (argila, silte, areia) e estrutura (Ds, Ma e K0) são apresentados na Tabela 1 a seguir. Analisando a variabilidade de cada um deles, de acordo com a classificação dos coeficientes de variação (CV) proposta por Warrick & Nielsen (1980), os atributos areia e Ds apresentaram CV baixo (< 12%), já argila e Ma apresentaram CV médio (12 a 60%). Os atributos K0 e silte apresentaram alta variabilidade (> 60%), sendo 67 e 124%, respectivamente (Tabela 1). O CV superior a 65% indica um material bastante heterogêneo, quando superior a 35% é ainda uma série heterogênea e, inferior a 35%, é representativo de maior homogeneidade (WARRICK & NIELSEN, 1980). Os resultados por ponto amostral estão apresentados no ANEXO I.

Tabela 1 – Estatística descritiva dos atributos amostrados.

Atributos	Máximo	Mínimo	Amplitude	Média	Variância	CV (%)
Areia (%)	87,2	65,32	21,88	77,41	38,50	8,02
Argila (%)	25,46	9,93	15,53	16,65	23,01	28,81
Silte (%)	23,22	2,13	21,09	5,94	16,13	67,58
Ds (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	1,41	0,39	1,60	0,01	6,74
Ma (%)	25,18	3,05	22,13	13,45	28,92	39,98
K0 (cm/h)	41,61	0,06	41,55	7,31	82,33	124,14

CV: coeficiente de variação; Ds: densidade do solo; K0: condutividade hidráulica saturada; Ma: macroporosidade.

As análises granulométricas revelaram que os solos da área de estudo possuem textura média a arenosa, de acordo com o Diagrama Textural (Figura 6), com teor de areia variando de 65 a 87% (Tabela 1), o que convergiu diretamente ao material de origem da área, referente às rochas areníticas da Formação Aquidauana, unidade litoestratigráfica pertencente a Bacia Sedimentar do Paraná do Rio Mogi Guaçu. O fracionamento da areia apontou uma média de 8% para areia muito grossa, 15% para areia grossa, 35% para areia média, 33% de areia fina e 4% de areia muito fina. As partículas de menor tamanho como argila e, principalmente, silte, foram encontradas em quantidades relativamente pequenas, sendo 16% a média de argila e 6% a média de silte.

A textura do solo é um atributo fundamental ao entendimento do comportamento físico-hídrico do solo, pois afeta de forma marcante a capacidade de infiltração. Assim, verificou-se que os solos na área estudada apresentam condições texturais favoráveis ao processo de infiltração, conferindo bom potencial de recarga de água subterrânea no que se refere a este aspecto. As pequenas quantidades de silte associadas a grandes porções arenosas garantem uma boa permeabilidade aos solos da área, uma vez que em locais com muito silte a possibilidade de obstrução dos poros é potencializada, diminuindo significativamente a permeabilidade do solo (SANTOS et al., 2012a). Os mesmos resultados também foram observados por Batista & Couto (1992) ao avaliar a textura do solo na Reserva Biológica de Mogi Guaçu, os quais ressaltaram os baixos teores de silte característicos do Latossolo Vermelho-Amarelo textura média e a pequena variação percentual na composição granulométrica. O silte apresentou CV maior do que as frações areia e argila (Tabela 1), fato que pode estar relacionado à grande mobilidade destas partículas no solo bem como a grande movimentação de massa nas planícies aluviais (SANTOS et al., 2012b).

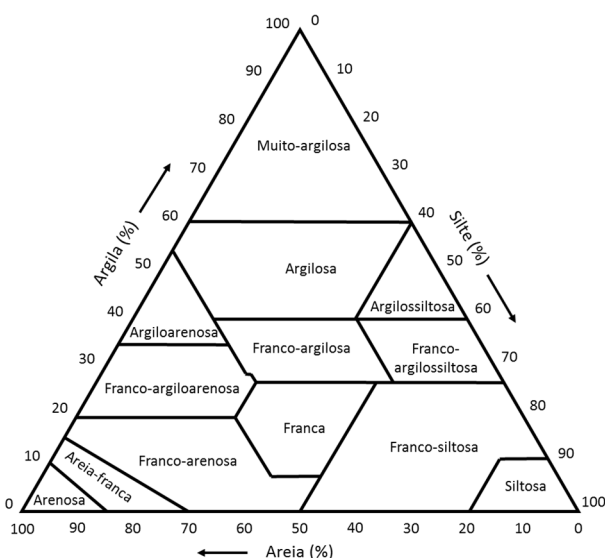


Figura 6 – Diagrama Textural utilizado para classificação do solo (adaptado EMBRAPA 2006).

A porosidade define a relação entre o volume de poros e o volume total de solo, sofrendo influência tanto da textura como da estrutura do solo. Determinante na formação da porosidade, a textura explica a ocorrência de poros grandes em solos arenosos, os quais também apresentam baixa porosidade total quando comparados a solos mais argilosos, muito devido ao maior volume de microporos nestes últimos. De acordo com Freire (2006), uma porosidade de 50% é esperada para solos de textura franca e de 40 a 60% para solos arenosos. Vale citar também a influência que a elevada densidade vegetal presente na área exerce,

favorecendo o crescimento das raízes, a atividade biológica e a abertura de poros no solo, contribuindo, assim, para manter sua estrutura preservada.

A distribuição dos poros na matriz do solo determina a evolução espacial e temporal dos processos que envolvem o movimento da água no solo, de forma que a distribuição dos poros por tamanho condiciona o comportamento físico-hídrico do solo. O volume de Ma é determinante na dinâmica de água no solo e variou de 3 a 25% com média de 14% (Tabela 1), resultados muito similares aos observados por Carvalho et al. (2003), cujos valores de macroporosidade variaram de 3 a 29% com média de 14% para Argissolos e Latossolos. Ribeiro et al. (2007) relatou uma menor média de Ma, de 12%, em LVA. A Ma média observada na área de estudo é considerada adequada para a aeração e desenvolvimento das plantas, conforme Baver et al. (1972), que estabelece um mínimo de 10% como condição ideal.

A densidade do solo ( $D_s$ ) sofre influência da textura, estrutura e do grau de compactação, fornecendo a medida da relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros (volume total). A  $D_s$  encontrada foi de 1,4 a 1,8 g cm<sup>-3</sup> e CV de 7% (Tabela 1), classificada como de baixa variabilidade, concordando com os resultados de Carvalho et al. (2003) e Santos et al. (2012b) que encontraram CV abaixo de 10% para este atributo. Para solos arenosos, a  $D_s$  varia de 1,3 a 1,8 g cm<sup>-3</sup>, o que corrobora as análises granulométricas apresentadas anteriormente.

Por ser um atributo dependente de manifestações que influenciam a disposição das partículas do solo, a  $D_s$  é capaz de fornecer indicações sobre a sua influência em propriedades como infiltração e retenção de água, permitindo analisar o estado de conservação do solo. Os valores de  $D_s$  verificados no presente trabalho estão associados à estrutura mais preservada do solo. Devido à ausência de atuação antrópica na área, a porosidade original do solo e a sua capacidade de transmitir água ao longo do perfil permanecem preservadas.

A  $K_0$  é considerada uma das propriedades do solo que melhor caracterizam a estrutura do solo (KLUTE, 1965), pois sofre influência dos atributos físicos que controlam a proporção entre as fases sólida, líquida e gasosa. Na sub-bacia de estudo, a  $K_0$  variou de baixa (0,06 cm h<sup>-1</sup>) a excessiva (41,6 cm h<sup>-1</sup>), com média de 7,3 cm h<sup>-1</sup> (Tabela 1) classificada como de alta permeabilidade, segundo Kutílek & Nielsen (1994). Os elevados valores podem ser explicados em função dos altos teores de areia, além de elevadas taxas de macroporosidade. Resultado semelhante ao maior valor de  $K_0$  foi encontrado para Neossolo Quartzarênico sob mata nativa em estudo desenvolvido por Ribeiro et al. (2007), que também observaram alta permeabilidade média para LVA distrófico sob mata nativa.

Na análise de correlação entre todos os atributos estudados e a K<sub>0</sub>, a macroporosidade foi a melhor, sendo de 0,53 e confirmando a relação direta entre esses atributos, uma vez que os macroporos são responsáveis por grande parte do transporte de água no perfil do solo (SANTOS et al., 2012b). A correlação encontrada foi também muito similar à descrita para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em estudo conduzido por Amorim et al. (2011), com correlação de 0,47 entre a condutividade e a porosidade.

A relação direta encontrada entre a condutividade hidráulica e a macroporosidade é descrita, entre outros, nos trabalhos de Furtunato et al. (2013) e Scherpinski et al. (2010), que também destacam o caráter essencialmente variável da porosidade não apenas entre diferentes solos, mas dentro de um mesmo solo em função das variações estruturais.

Em relação à variabilidade, em condições semelhantes as deste estudo Santos et al. (2012b) também encontraram CV alto, de 261%, para K<sub>0</sub>. Os autores ressaltaram que tal resultado era esperado, devido às condições locais da pesquisa que, assim como o presente estudo, foi realizada às margens de cursos d'água. Nestas áreas podem ocorrer deposições sucessivas de diversos materiais com textura variável, acarretando assim numa maior diversidade da condutividade hidráulica.

## **MAPEAMENTO DOS ATRIBUTOS DO SOLO**

A abordagem geoestatística teve início com os ajustes em quatro direções, dos três modelos teóricos testados (esférico, exponencial e gaussiano). O melhor ajuste foi determinado em função do menor RSS encontrado. Assim, constatou-se que as pequenas anisotropias detectadas inicialmente nos variogramas obtidos com os dados de campo, não se refletiram necessariamente nos ajustes dos modelos teóricos, que em muitos casos resultaram em alcances e patamares idênticos nas quatro direções modeladas. Dessa forma, os atributos areia, silte, argila e densidade não apresentaram anisotropia no ajuste de seus modelos, sendo então considerados como isotrópicos e seus variogramas ajustados de forma omnidirecional, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de ajuste dos modelos isotrópicos testados.

Variável	Modelo	Co	Co + C	Alcance	RSS
<u>Areia (%)</u>	<u>Esférico</u>	<u>0,1</u>	<u>40,35</u>	<u>939</u>	<u>28</u>
Areia (%)	Exponencial	0,1	42,39	427	97,3
Areia (%)	Gaussiano	0,1	40,64	443	45
<u>Argila (%)</u>	<u>Esférico</u>	<u>0,01</u>	<u>22,34</u>	<u>538</u>	<u>42,2</u>
Argila (%)	Exponencial	1,11	22,32	170	49,1
Argila (%)	Gaussiano	2,24	22,41	266	43,9
<u>Silte (%)</u>	<u>Esférico</u>	<u>0,01</u>	<u>16,27</u>	<u>829</u>	<u>21</u>
Silte (%)	Exponencial	0,01	16,39	332	34,6
Silte (%)	Gaussiano	0,01	16,33	417	22
<u>Ds (g/cm<sup>3</sup>)</u>	<u>Esférico</u>	<u>0,00061</u>	<u>0,01222</u>	<u>538</u>	<u>0,0000174</u>
Ds (g/cm <sup>3</sup> )	Exponencial	0,00135	0,0121	137	0,00001829
Ds (g/cm <sup>3</sup> )	Gaussiano	0,0018	0,0122	259	0,00001757

Co: Efeito Pepita; Co + C: patamar; RSS: soma dos quadrados dos resíduos; Ds: densidade do solo.

Já os atributos macroporosidade e condutividade hidráulica confirmaram suas anisotropias também no ajuste dos modelos teóricos, que foram refletidas em diferentes alcances dependendo da direção de análise. Os resultados dos ajustes para as variáveis anisotrópicas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de ajuste dos modelos anisotrópicos testados.

Variável	Modelo	Co	Co + C	Alcance Menor	Alcance Maior	RSS	Azimuth Anisotropia
<u>Ma (%)</u>	<u>Esférico</u>	<u>0</u>	<u>28,9</u>	<u>400</u>	<u>600</u>	<u>494</u>	
Ma (%)	Exponencial	0	38	1630	1660	1371	45°
Ma (%)	Gaussiano	0	30	662	680	766	
<u>K0 (cm/h)</u>	<u>Esférico</u>	<u>0</u>	<u>83</u>	<u>300</u>	<u>600</u>	<u>13589</u>	
K0 (cm/h)	Exponencial	0	83	50	400	13648	45°
K0 (cm/h)	Gaussiano	0	83	50	500	13629	

Co: Efeito Pepita; Co + C: patamar; RSS: soma dos quadrados dos resíduos; K0: condutividade hidráulica saturada; Ma: macroporos.

Durante os ajustes, foram feitos testes com acréscimos do efeito pepita e nenhum apresentou resultado mais satisfatório daqueles aqui apresentados. Todos os patamares ajustados foram muito próximos às suas respectivas variâncias e confirmaram a hipótese da estacionariedade na variância a partir de um certo alcance. A utilização do RSS como critério de qualidade no decorrer dos ajustes foi decisiva para o não estabelecimento de maneira equivocada do efeito pepita (OLIVER & WEBSTER, 2014), uma vez que a bacia de estudo é coberta praticamente em sua totalidade por solos de mesma classe e mesmas coberturas florestais refletindo, assim, a continuidade dos fatores pedogenéticos que se sobressaem.

Todos os atributos analisados, areia, silte, argila, Ds, Ma e K0 obtiveram seus melhores ajustes no modelo esférico. Este modelo é citado por Furtunato et al. (2013) como o mais frequentemente encontrado na ciência do solo. Destaca-se a maior anisotropia encontrada para o atributo K0, com alcance de 2:1 na direção de maior continuidade. O ajuste do modelo esférico para K0 também foi encontrado por outros autores como Amorim et al. (2011), Furtunato et al. (2013) e Scherpinski et al. (2010).

A partir da análise da estatística descritiva apresentada na Tabela 4, pode-se observar que os parâmetros: máximo, mínimo, média e amplitude, não apresentaram alterações entre as amostras e os modelos gerados pela krigagem. Entretanto, conforme o esperado devido a formulação matemática da K.O., a variância e o CV diminuíram, embora ainda conservando boa parte da variabilidade original.

Tabela 4 – Estatística descritiva dos valores gerados pela K.O.

Atributos	Máximo	Mínimo	Amplitude	Média	Variância	CV (%)
Areia (%)	87,12	65,41	21,71	78,05	23,27	6,18
Argila (%)	25,38	10,01	15,38	16,25	7,97	17,37
Silte (%)	23,14	2,14	21,00	5,86	9,28	52,03
Ds (g/cm <sup>3</sup> )	1,80	1,41	0,39	1,61	0,004	3,96
Ma (%)	25,09	3,24	21,85	13,32	8,75	22,22
K0 (cm/h)	41,33	0,22	41,11	7,39	20,43	61,13

CV: coeficiente de variação; Ds: densidade do solo; K0: condutividade hidráulica saturada; Ma: macroporosidade.

O teste de Tukey, que testou a hipótese de igualdade entre os valores amostrados e os valores krigados (H0), segue apresentado na Tabela 5. Para todos os atributos, com nível de confiança de 95%, H0 foi aceita confirmando a consistência das estimativas da K.O. relatadas



por autores como Furtunato et al. (2013), Kamimura et al. (2013), Lima et al. (2014), Oliver & Webster (2014) e Parfitt et al. (2014).

Tabela 5 – Teste de Tukey aplicado a todos os atributos analisados.

	Areia	Argila	Silte	Ds	Ma	K0
$t_{calc}$	0,13	0,13	0,77	0,53	0,71	0,75
$t_{tab}$	----- 4,30 -----					

K0: condutividade hidráulica saturada; Ds: densidade do solo; Ma: macroporosidade;  $t_{calc}$ : t calculado;  $t_{tab}$ : t tabelado bicaudal, grau de liberdade 2 e alfa de 0,05.

A interpolação dos dados através da K.O. permitiu gerar mapas de distribuição essenciais à análise do fluxo de água no perfil do solo e, conseqüentemente, identificar áreas favoráveis ao processo de recarga e áreas prioritárias de conservação, de modo a garantir a manutenção das condições favoráveis e manejar adequadamente os locais menos favoráveis à infiltração de água. A variabilidade espacial dos atributos físicos do solo constitui informação chave para garantir a conservação do mesmo, a qual afeta diretamente a preservação dos recursos hídricos tanto superficiais como subterrâneos.

Como todos os atributos analisados (areia, macroporosidade, densidade e condutividade hidráulica saturada) apresentaram dependência espacial, todos tiveram seus padrões de distribuição espacial estimados pela Krigagem Ordinária (K.O.) Para a areia, a espacialização revelou os maiores teores nas partes altas da paisagem (Figura 7-1) sendo relacionados, possivelmente, ao transporte diferenciado de sedimentos, que deslocam com maior facilidade as partículas mais finas como a argila para as partes mais baixas do relevo (GOMES et al., 2007). Ao estudar a variabilidade da condutividade hidráulica dos solos de Goiás, Fiori et al. (2010) observaram resultados similares quanto a interferência da textura na condutividade hidráulica. Em solos mais argilosos há uma redução na macroporosidade responsável pelo movimento da água no perfil e um aumento da microporosidade que favorece a retenção da água, decorrente do reduzido tamanho da partícula.

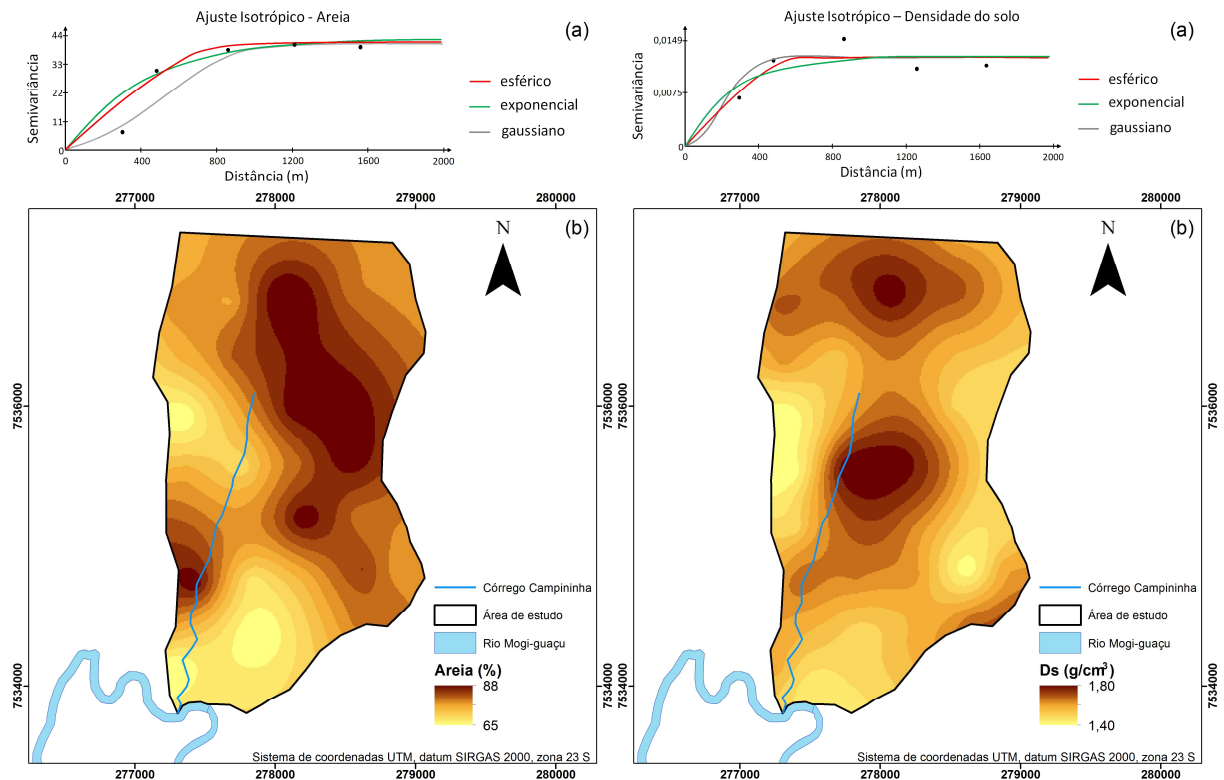


Figura 7 – Mapas dos atributos areia (1) e densidade do solo (2) resultantes do processo de krigagem ordinária e seus respectivos variogramas omnidirecionais ajustados.

Em relação a distribuição espacial da Ds, apresentada na Figura 7-2, constatou-se uma distribuição bastante homogênea na área de estudo, entretanto, podemos perceber uma ocorrência mais frequente de valores elevados nas proximidades da rede de drenagem, em áreas com valores relativamente baixos de K0 (Figura 9). O mesmo padrão foi encontrado de forma inversa para a macroporosidade (Figura 8), registrada com valores maiores onde a Ds é menor e valores menores onde a Ds é maior, conforme o esperado.

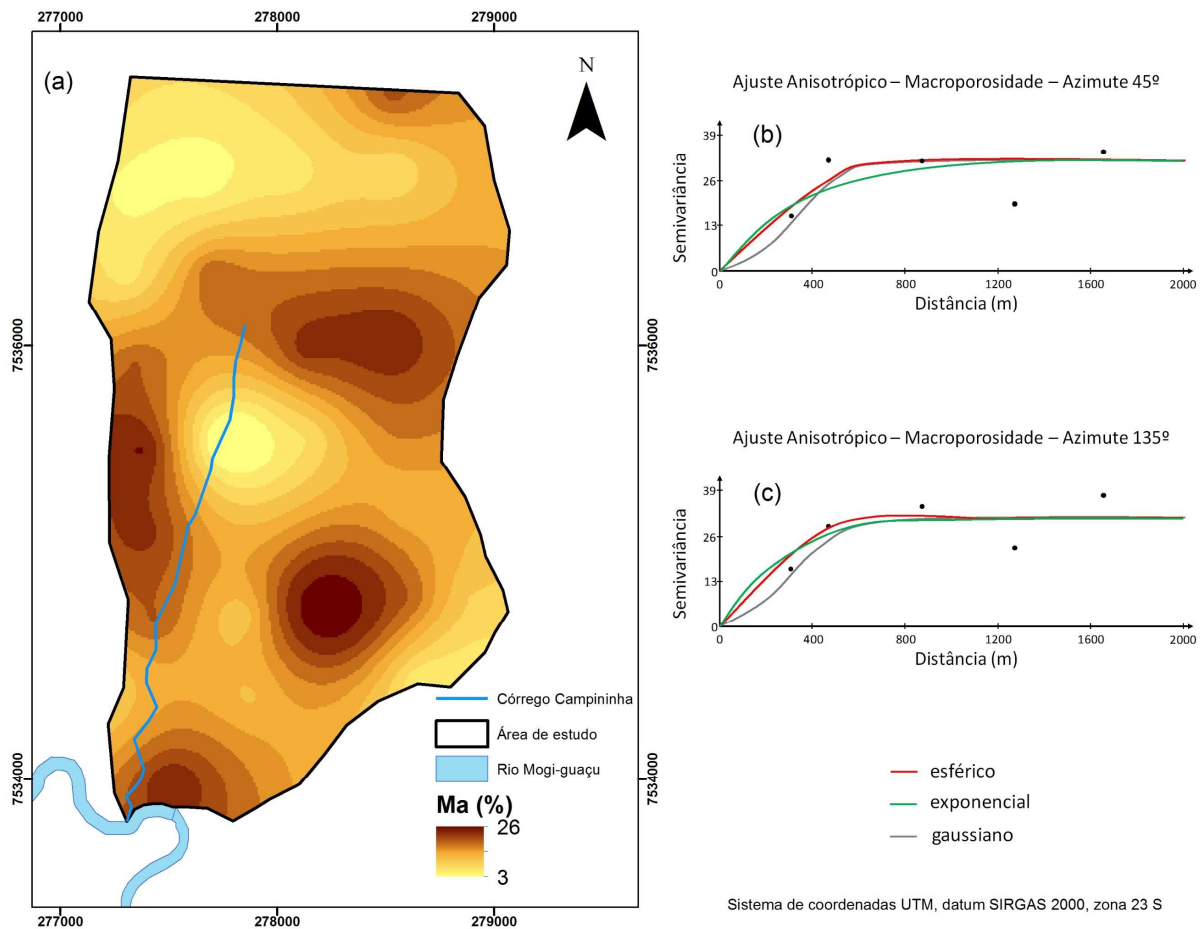


Figura 8 – Mapa do atributo macroporosidade resultante do processo de krigagem ordinária e seu respectivo variograma bidirecional ajustado.

A K0 apresentou, de maneira geral, uma tendência a valores menores localizados próximos à rede de drenagem, normalmente sendo estas áreas com teores relativamente altos de argila e Ds, indicando que o fluxo superficial tende a escoar pela rede e não conseguir boas taxas de infiltração. Assim, tais áreas são menos favoráveis à recarga de água e considerando as características edáficas e a topografia pouco movimentada, fica caracterizada uma maior propensão ao assoreamento nas áreas de drenagem e a importância da cobertura vegetal permanente como mecanismo de proteção dos canais fluviais. A preservação da vegetação exerce função primordial para a recarga de água, conforme verificado por Lima et al. (2013) ao estimar áreas com potencial de recarga e sub-bacia componente do Sistema Cantareira. Dessa forma, a vegetação nas áreas menos favoráveis ao processo de recarga favorece a retenção hídrica na superfície e subsuperfície do solo e evita que a taxa de entrada subterrânea da água seja ainda menor, ajudando na manutenção da vazão do curso d'água. As áreas a sudeste do levantamento, apresentaram os maiores valores de K0 e também de Ma,

confirmando a relação direta entre estes dois atributos, também relatado por Fiori et al. (2010).

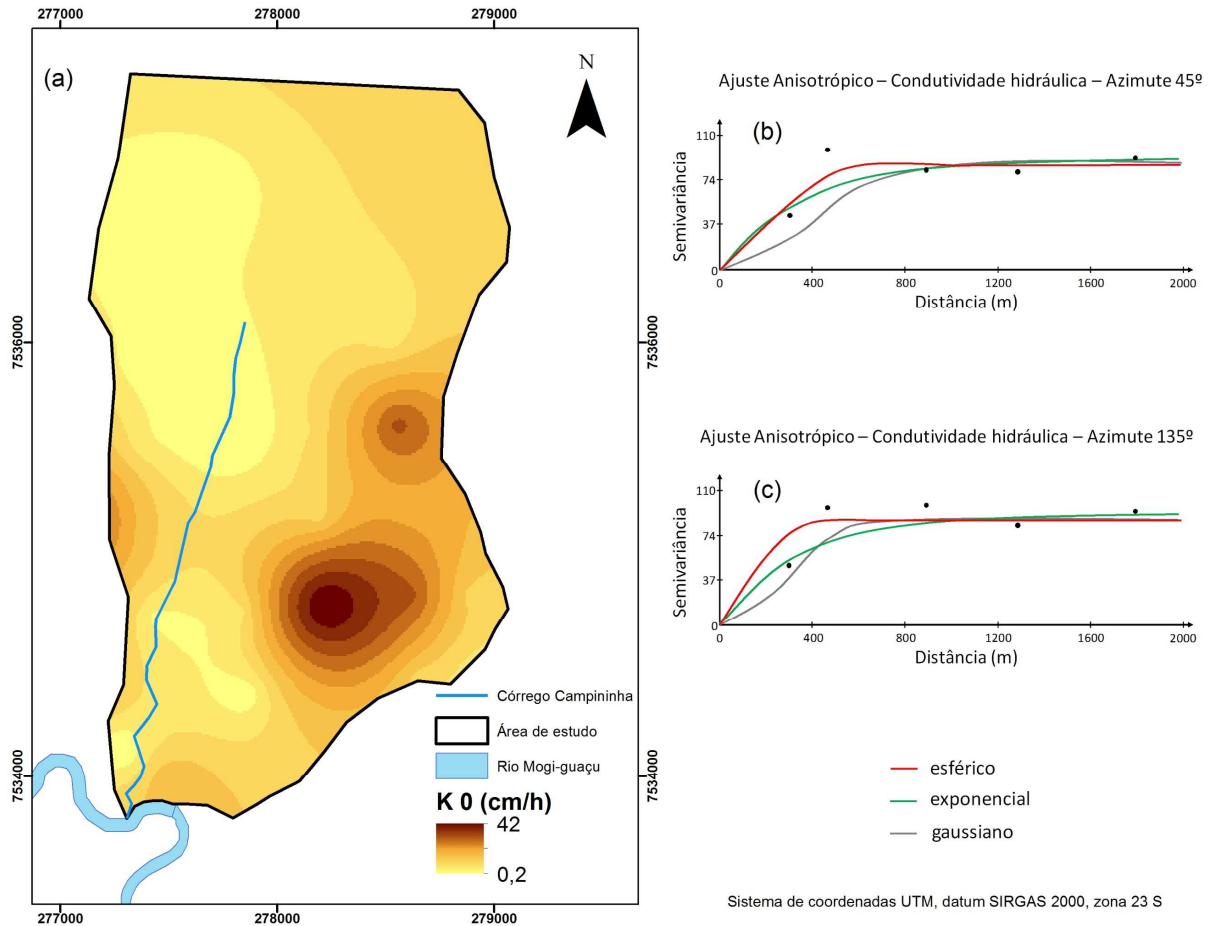


Figura 9 – Mapa do atributo condutividade hidráulica saturada resultante do processo de krigagem ordinária e seu respectivo variograma bidirecional ajustado.

### ÍNDICE TOPOGRÁFICO DE UMIDADE

Após uma chuva intensa ou em condições de lençol freático elevado, todo o volume de poros do solo está preenchido com água e assim, portanto, o solo está saturado. Na grande maioria dos casos, o espaço poroso do solo está apenas parcialmente ocupado com ar e parcialmente ocupado com água, quando se diz que o solo está não saturado ou insaturado. Os mapas de Índices Topográficos de Umidade apresentam as zonas que possuem condições suficientes para saturar e ocorrer fluxo superficial, ou das áreas onde a água da chuva infiltra no solo, não havendo água disponível para o escoamento superficial. É importante ressaltar o conceito de que a taxa de infiltração diminui com o tempo até atingir valor constante, que é

equivalente à condutividade hidráulica saturada, influenciando todo o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica (JULIÀ et al., 2004).

Na área de estudo, em comparação direta com a rede de drenagem obtida em campo, dentre os modelos de direção de fluxo testados, optou-se pelo algoritmo  $D_{\infty}$  (Figura 10-a), o qual melhor se equiparou ao observado. O método  $D_{\infty}$  tem a vantagem de considerar também a forma da superfície divergente, ou seja, o fluxo também pode ser divergente (BOGAART & TROCH, 2006). Consequentemente, este método proporciona o maior detalhamento e uma melhor definição dos caminhos preferenciais do fluxo que formam a rede de drenagem da sub-bacia, sendo mais preciso e, portanto, adequado as análises hidrológicas em pequenas escalas como nesta pesquisa.

O modelo gerado revelou com detalhes o sistema de drenagem de águas pluviais presentes na bacia e os caminhos preferenciais do fluxo durante um evento pluviométrico. Além do próprio curso d'água presente na área, podemos perceber a presença de dois drenos principais na parte norte da sub-bacia e também, a concentração de fluxo nas áreas ao sul, áreas estas de relevo plano e ocupadas por florestas nativas, evidenciando o caráter protetor do solo que neste caso se torna ainda mais importante devido ao alto fluxo superficial nestes locais.

O TWI encontrado (Figura 10-b) apresentou como distribuição espacial uma boa interação entre a declividade e o fluxo acumulado. As áreas com maior umidade se concentram não somente ao longo das linhas de drenagem, mas, preferencialmente nas conexões de áreas planas com regiões de concentrações de fluxo. Estas áreas favorecem o espalhamento da água na superfície do relevo e, consequentemente, aumentam o tempo de escoamento, possibilitando assim uma maior infiltração da água no perfil do solo.

O índice mais elevado na rede de drenagem principal, com destaque para a área ao sul da bacia onde a linha de drenagem se encontra com o Rio Mogi Guaçu, denota a importância de se preservar estas áreas por atuarem como elementos de conectividade hidrológica entre a paisagem e os corpos hídricos, corroborando as observações de Siefert & Santos (2010).

A parte sul da sub-bacia, apresenta uma área de várzea inundável sazonalmente, de relevo muito plano e rede de drenagem difusa. Neste caso, o solo turfosos e de baixa densidade favorece diretamente a infiltração de água no perfil do solo, agindo também como área de retenção de sedimentos e consequente inibidor do assoreamento causado por perturbações no uso do solo na parte superior da bacia.

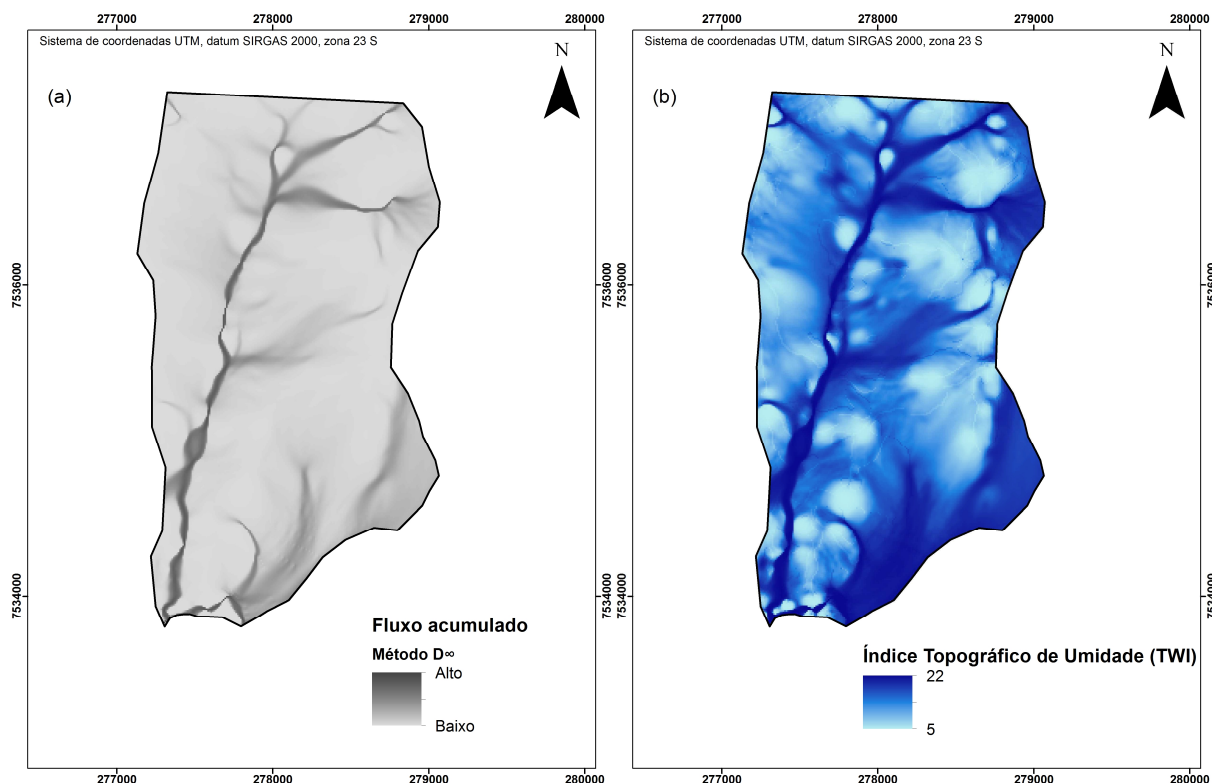


Figura 10 – Mapa de fluxo acumulado (a) e do Índice Topográfico de Umidade - TWI (b).

As áreas a noroeste da sub-bacia, de maior elevação e maior declividade, representaram as áreas de menor TWI, fato este explicável pela menor presença de linhas de drenagem associadas a uma maior velocidade de escoamento, não gerando condições propícias a infiltração. As áreas de cabeceira são fundamentais para o processo de recarga da água subterrânea, contudo, o relevo ondulado destes locais favorece o escoamento superficial afetando negativamente a umidade e, conseqüentemente, ocasionando uma redução na infiltração de água. Assim, é importante a conservação da vegetação e adoção de práticas conservacionistas do solo nestas áreas de relevo mais movimentado, a fim de aumentar a infiltração, reduzir o potencial erosivo e aumentar a infiltração.

Na estação seca, a água do solo percola lentamente em direção ao aquífero, que alimenta o deflúvio da bacia. Já no período chuvoso, a infiltração é alta e as camadas superficiais do solo tendem a adquirir condições de saturação. Como o uso da bacia é florestal, durante um evento de precipitação contínua a maior parte da área tem capacidade de infiltração superior à intensidade da chuva, não gerando escoamento superficial (HEWLETT & HIBBERT, 1967). A parcela de água infiltrada formará os fluxos subsuperficial e subterrâneo, alimentando os canais e cursos da água. No momento em que a taxa de fluxo subsuperficial exceder a capacidade do solo em transportá-lo ocorrerá o processo de elevação

do nível de água no solo, emergindo à superfície como escoamento de retorno, de importância direta nos processos de escoamento direto e expansão das áreas saturadas próxima aos canais perenes em direção aos canais intermitentes resultantes dos processos desencadeados a partir do evento de precipitação. Assim, o rápido aumento do deflúvio na sub-bacia ocorre devido ao escoamento subsuperficial e este escoamento irá variar conforme a topografia e a umidade antecedente do solo.

### **COBERTURA VEGETAL**

A avaliação da cobertura vegetal na área de estudo foi realizada através do NDVI, que expressa um gradiente da densidade da vegetação. Segundo Mitsova (1996) o NDVI representa com propriedade as diferenças existentes entre as variadas coberturas vegetais presentes na paisagem.

Ao analisar a intensidade das atividades fotossintéticas pelo NDVI verificou-se que a vegetação com maior quantidade de biomassa, identificada pelos tons mais escuros de verde (valores mais elevados), é referente à parte sul da sub-bacia, trecho de menor elevação e declividade, onde se encontra a formação nativa de Floresta Estacional Semidecidual já bem estruturada e com dossel fechado. Percebe-se também um trecho de mata nativa alongado na região central da área, referente a mata ciliar do córrego presente no local. O restante da bacia, em sua maioria, é ocupado por uma cobertura vegetal de média densidade (tons mais claros de verde) (Figura 11). Tais áreas representam primariamente antigos reflorestamentos de pinus ou eucalipto, que no tocante ao ciclo hidrológico, agem protegendo o solo, favorecendo a infiltração e aumentando o tempo de permanência da água no sistema.

Os baixos valores de NDVI marcados pontualmente na sub-bacia (tons amarelados e avermelhados), caracterizam regiões de solo exposto referentes às pequenas áreas em recuperação e também a algumas pastagens degradadas sendo, portanto, locais definidos espacialmente e propensos à erosão hídrica. Há ainda as áreas sem vegetação referentes às estradas, corpos d'água e várzeas, as quais apresentam os menores valores de NDVI mapeados.

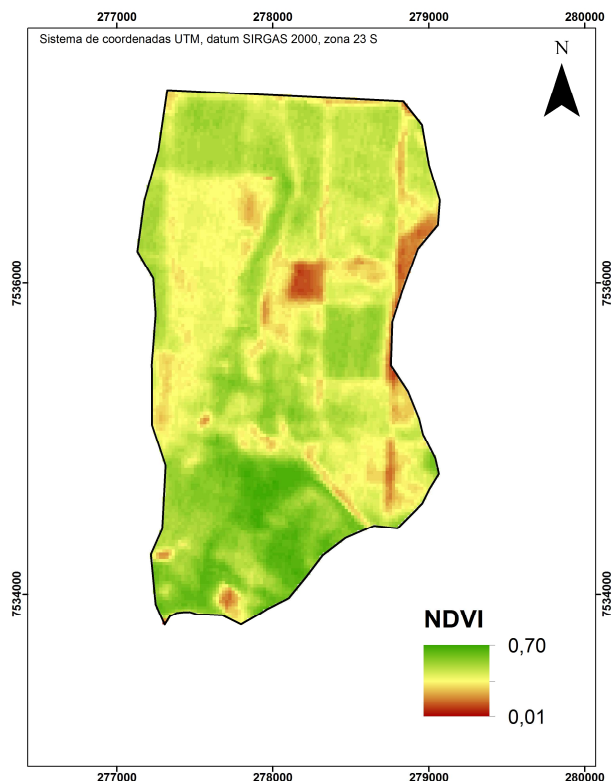


Figura 11 – Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Devido a sub-bacia de estudo apresentar, de maneira geral, uma boa cobertura vegetal, as estradas não pavimentadas que cortam toda a área e atualmente se encontram em mau estado de conservação, apresentando intensas erosões e ausência de manutenção, representam a principal fonte de erosão e assoreamento da área.

### **ZONEAMENTO DAS ÁREAS FAVORÁVEIS AO PROCESSO DE RECARGA**

A geração dos modelos para o zoneamento das áreas favoráveis ao processo de recarga na sub-bacia de estudo, foi realizada através da Lógica Fuzzy, e a escolha das variáveis de entrada teve como base os fundamentos apresentados anteriormente no item acerca da fundamentação teórica dos modelos. Assim, as variáveis selecionadas representam os principais fatores reconhecidamente associados ao processo de recarga e que na área de estudo atuam de maneira seletiva, ou seja, a textura e estrutura do solo, a topografia e a cobertura vegetal. Para representar a textura, devido ao caráter arenoso dos solos da área, foi escolhido o teor de areia (%), para representar a estrutura, foram selecionados os atributos macroporosidade e densidade do solo, para a topografia o TWI (Índice Topográfico de Umidade) e para a cobertura o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada). Portanto, os modelos testados associam as áreas favoráveis ao processo de recarga com as



seguintes características: maior porcentagem de areia; maior porcentagem de macroporosidade; menor densidade do solo; maior valor de TWI; e maior valor de NDVI.

Para a transformação das variáveis de entrada em variáveis fuzzy, foram utilizadas as seguintes funções: para areia (%), macroporosidade (%), TWI e NDVI foi utilizada a função *Large* com ponto médio de 76, 14, 13 e 0,4 e espalhamento de 10, 15, 15 e 5, respectivamente. Nesta opção, quanto maior o valor do pixel original mais próximo de 1 será o valor do pixel fuzzyficado. Para a variável densidade do solo ( $\text{g/cm}^3$ ) (ponto médio de 1,5 e espalhamento de 15) foi utilizada a opção *Small*, que atribui altos valores fuzzyficados (próximos de 1) aos menores valores originais, função oposta à opção *Large*. As variáveis de entrada já transformadas em variáveis fuzzy estão apresentadas na Figura 12 a seguir.

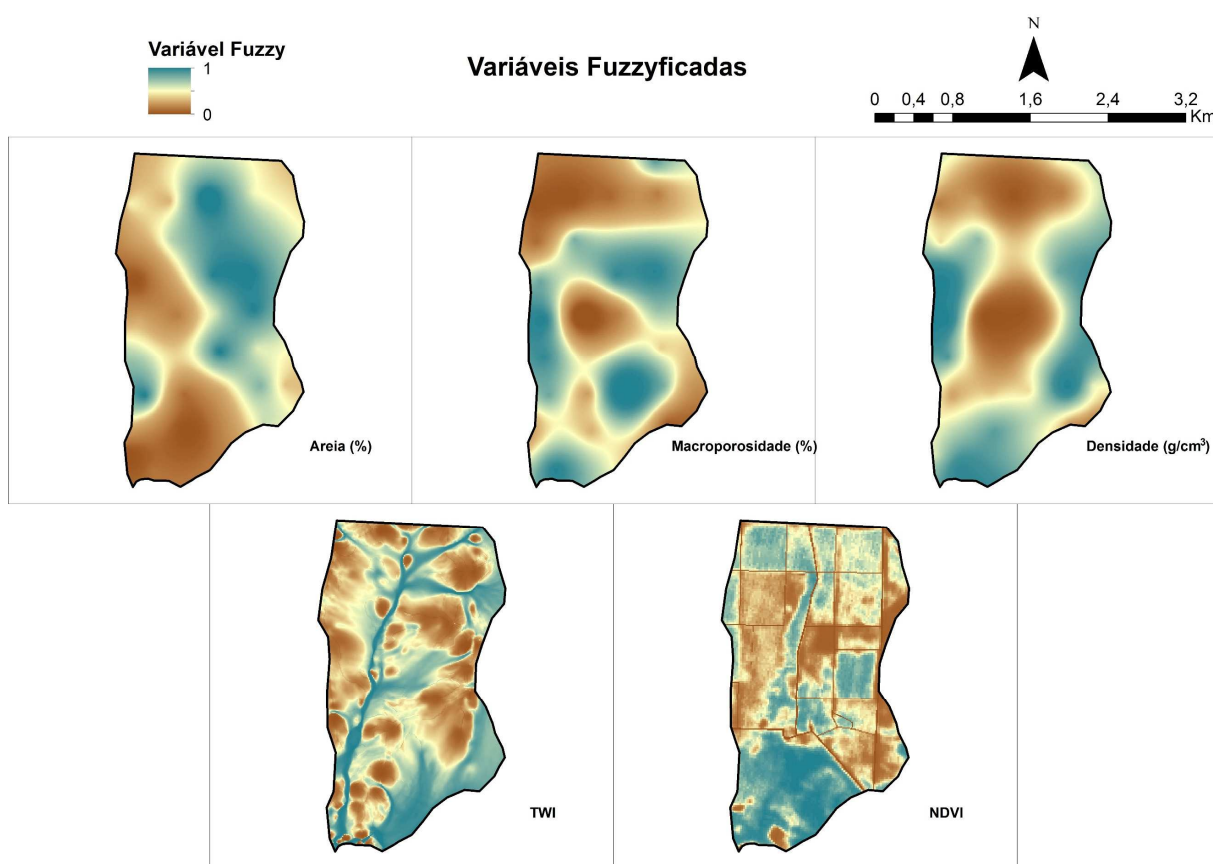


Figura 12 – Variáveis de entrada transformadas em variáveis fuzzy.

Os primeiros operadores testados na geração dos modelos para áreas favoráveis ao processo de recarga, foram os operadores AND e SUM. Conceitualmente, o operador fuzzy AND representa um cenário bastante conservador, pois o valor resultante de cada pixel é definido em função da menor variável de entrada, recebendo um alto valor somente quando possuir altos valores em todos os critérios de entrada empregados. Já o operador SUM representa um cenário otimista, classificando com alto valor pixels que possuem alto valor em pelo menos um dos critérios de entrada, sendo teoricamente a parte complementar do

operador PRODUCT (BONHAM-CARTER, 1994). A Figura 13 apresenta os modelos gerados pelos operadores fuzzy AND e SUM apenas com os índices físicos do solo e também os modelos gerados com o acréscimo das variáveis TWI e NDVI.

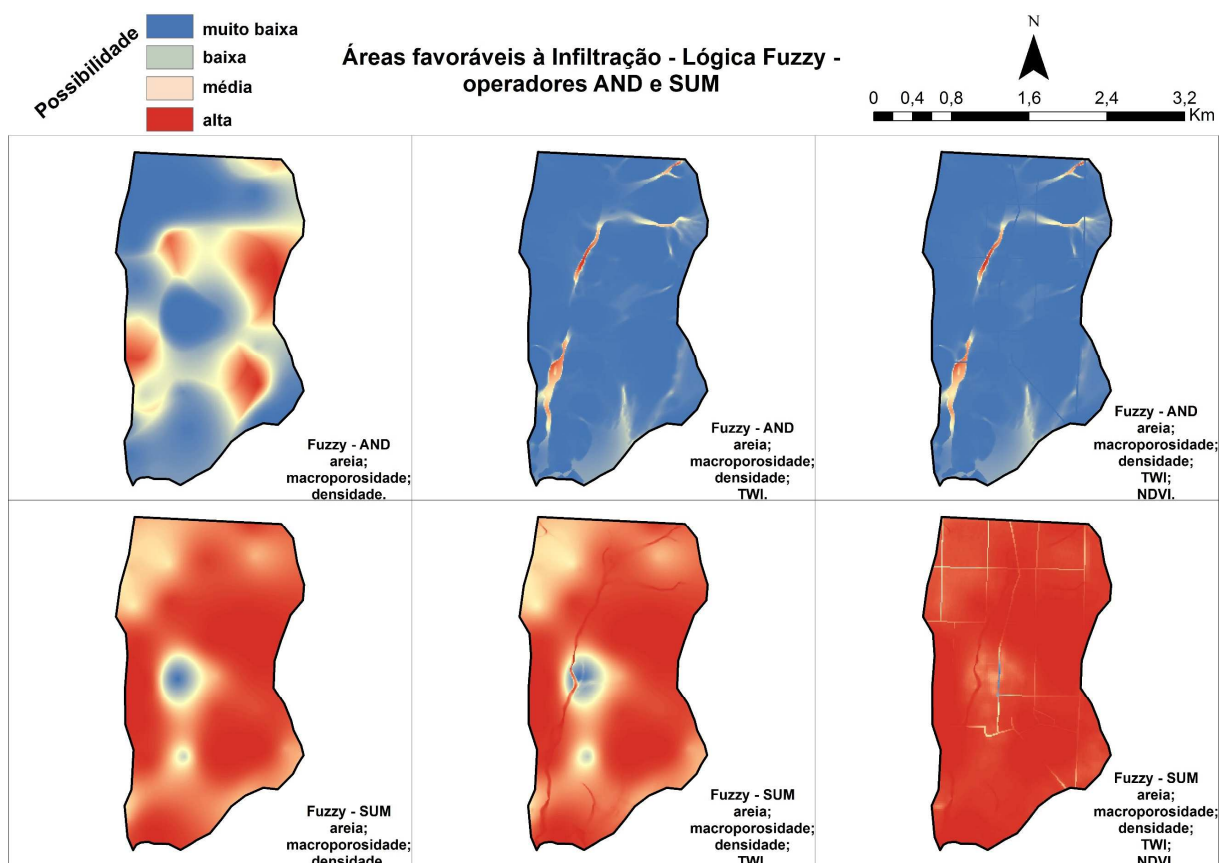


Figura 13 – Modelos gerados com os operadores fuzzy AND e SUM, com o acréscimo de variáveis de entrada (areia, macroporosidade, densidade, TWI e NDVI).

A sensibilidade dos modelos gerados por ambos os operadores ao acréscimo de novas variáveis de entrada foi muito eficiente, resultando em espacializações cada vez mais detalhadas que possibilitaram uma melhor delimitação das áreas de interesse tornando, inclusive, o modelo mais compatível com o cenário verificado em campo. Contudo, devido a tendência dos operadores, não apresentaram resultados satisfatórios em termos de zoneamento. De maneira geral, a sub-bacia de estudo possui uma boa cobertura vegetal que minimiza o desenvolvimento do processo erosivo, tornando esse fator menos influente na diferenciação das áreas, com exceção das áreas de estradas, onde o solo é exposto.

O terceiro operador testado foi o GAMMA, tendo como variáveis de entrada inicialmente, apenas os representantes do fator solo (textura e estrutura), neste caso, os índices físicos indicados pelas variáveis de areia (%), macroporosidade (%) e densidade ( $\text{g/cm}^3$ ). Os resultados estão apresentados na Figura 14.

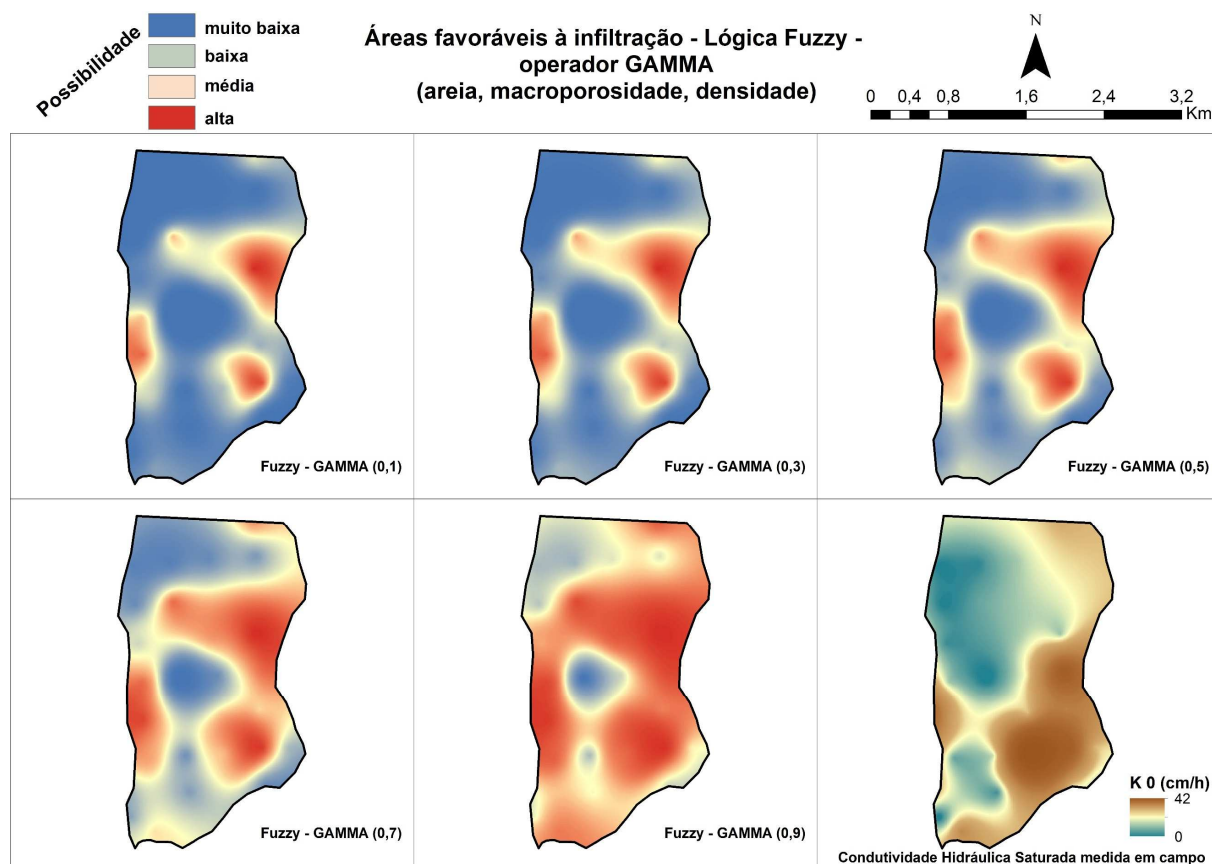


Figura 14 – Modelos gerados com o operador fuzzy GAMMA, com o acréscimo no Índice Gama ( $\gamma$ ) de 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9 para as variáveis de entrada: areia, macroporosidade e densidade; Mapa da condutividade hidráulica saturada.

Devido a entrada somente dos índices físicos do solo, o aspecto geral dos modelos gerados condiz diretamente com o aspecto das variações que ocorrem nos mesmos, apresentando gradientes homogêneos e uniformes. Assim, os modelos não apresentam grande detalhamento das áreas de interesse, sendo um bom indicador da região de interesse, porém de maneira mais abrangente. Contudo, os resultados apresentaram boa relação com o mapa de condutividade hidráulica saturada, um indicador direto de áreas favoráveis ao processo de recarga.

Na Figura 15, encontra-se a proporção das áreas favoráveis ou não ao processo de recarga encontradas para cada modelo fuzzy gerado com as variáveis de entrada areia, macroporosidade e densidade. É possível identificar a influência do acréscimo no valor do Índice Gama ( $\gamma$ ) que aumenta a quantidade de áreas com maior possibilidade de existência das características de interesse. Segundo Carrino et al. (2011), com a maleabilidade do Índice Gama, os resultados de saída são flexíveis entre a tendência de maximização do operador SUM e a minimização do operador PRODUCT. Assim, os valores entre 0,35 e 0,80

apresentam valores de saída intermediários em relação aos valores de entrada, ponderando melhor as possibilidades resultantes.

Levando-se em consideração apenas os atributos físicos do solo e os modelos gerados pelo operador Gama, a porcentagem da área identificada com média e alta possibilidades de serem favoráveis ao processo de recarga chegou a 78% no cenário mais otimista e variou de 12 a 48% nos cenários intermediários.

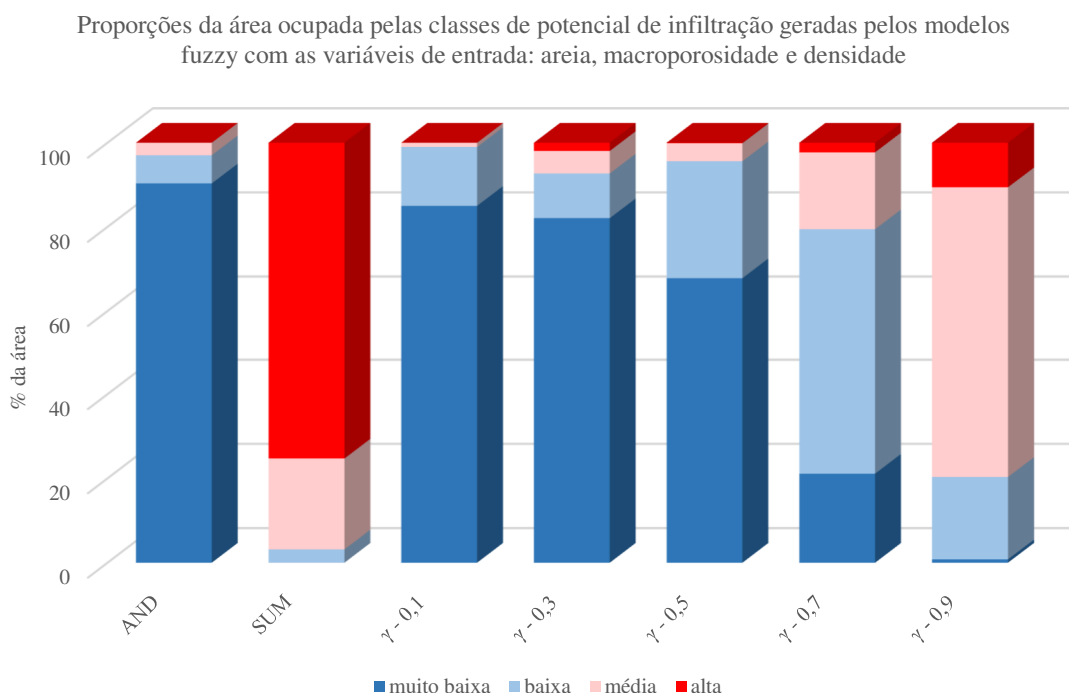


Figura 15 – Proporção entre as classes de potencial de infiltração geradas pelos diferentes operadores fuzzy, com as variáveis de entrada: areia, macroporosidade e densidade.

Com o acréscimo da variável topográfica, representada pelo Índice Topográfico de Umidade (TWI), nos modelos gerados pelo operador fuzzy GAMMA, houve uma tendência natural a diminuição das áreas com alta pertinência, uma vez que as exigências para satisfazer as condições de entrada aumentam (Figura 16). Contudo, devido à grande maioria da área ser de relevo plano, pequenas variações na topografia representam um importante reflexo nas características que determinam o movimento da água na superfície do terreno. Neste aspecto, o levantamento topográfico de alta precisão influenciou significativamente na qualidade dos modelos gerados, conferindo detalhamento e precisão aos resultados.

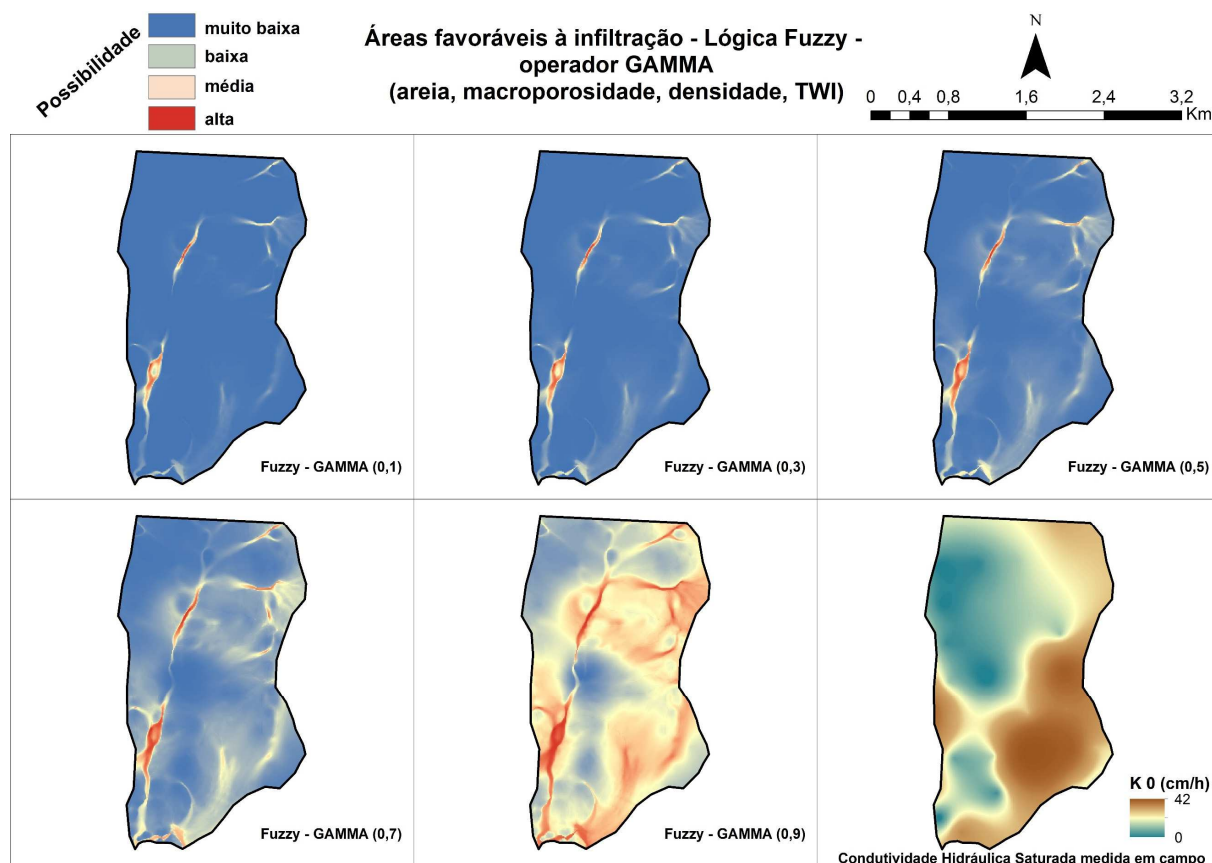


Figura 16 – Modelos gerados com o operador fuzzy GAMMA, com o acréscimo no Índice Gama ( $\gamma$ ) de 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9 para as variáveis de entrada: areia, macroporosidade, densidade e TWI; Mapa da condutividade hidráulica saturada.

Na Figura 17, verifica-se a proporção das classes de potencial de infiltração encontradas para cada modelo fuzzy gerado pelas variáveis de entrada areia, macroporosidade, densidade e TWI. Assim como nos modelos gerados somente com os índices físicos do solo, naqueles gerados com a adição do fator topográfico (TWI), o acréscimo no valor do Índice Gama ( $\gamma$ ) resultou no aumento da quantidade de áreas com maior possibilidade de existência das características de interesse, contudo, inferiores aos gerados do primeiro caso, restringindo de maneira favorável a localização das áreas de interesse, ou seja, indicando com mais precisão geográfica os pontos chaves mais favoráveis ao processo de recarga na paisagem analisada.

Quantitativamente, com o acréscimo da topografia na geração dos modelos pelo operador GAMMA, a porcentagem da área identificada com média ou alta possibilidade de ser favorável ao processo de recarga caiu para 34% no cenário mais otimista e variou de 0 a 16% nos cenários intermediários.

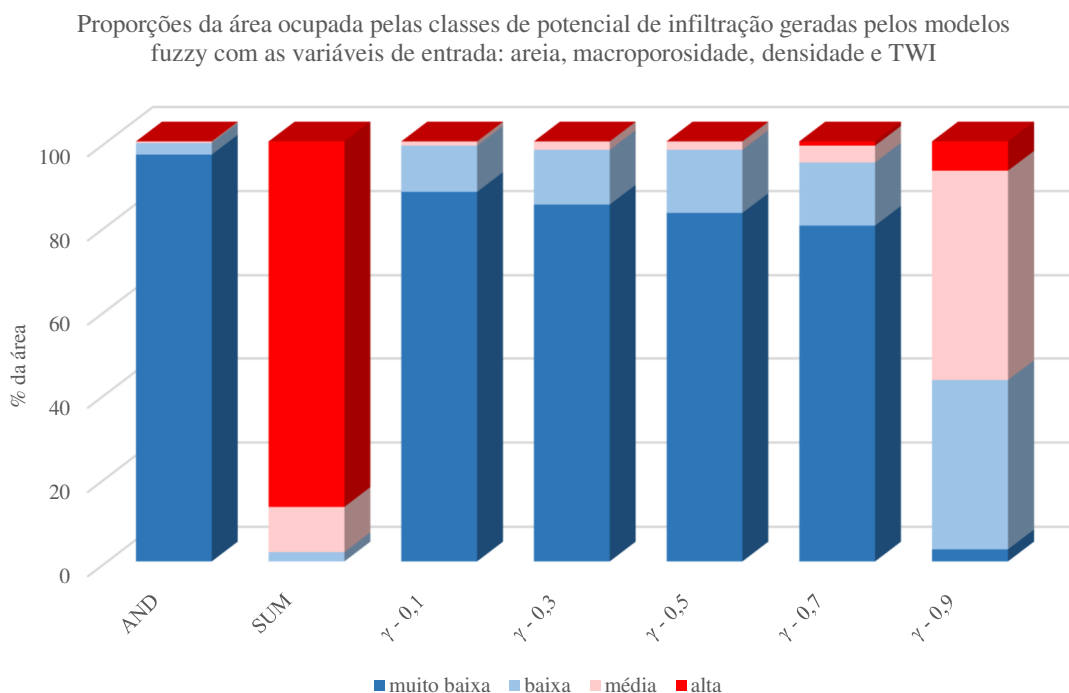


Figura 17 – Proporção entre as classes de potencial de infiltração geradas pelos diferentes operadores fuzzy, com as variáveis de entrada: areia, macroporosidade, densidade e TWI.

Por fim, foram criados os modelos através do operador fuzzy GAMMA com as variáveis de entrada areia, macroporosidade, densidade e TWI, acrescidas do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) de forma a considerar o impacto deste último fator nas condições que influenciam os processos de infiltração e recarga da área (Figura 18).

Ao adicionar o fator NDVI, os modelos gerados tornaram-se conceitualmente mais completos, pois, passaram a reunir as principais variáveis que influenciam diretamente no processo de infiltração e recarga da área, aqui representados pelas características do solo, através dos índices físicos, pelas características do relevo, com o Índice topográfico de umidade (TWI) e pelas características da cobertura do solo, via NDVI.

No caso da sub-bacia de estudo, a cobertura vegetal encontrada se apresenta, de maneira geral, adequada à proteção do solo e, portanto, não influencia com grande peso nos resultados. Contudo, nas áreas onde a exposição do solo é significativa, como nas estradas, o reflexo nos modelos é considerável, mostrando mais uma vez a capacidade da lógica fuzzy em obter resultados ponderados e confiáveis. Assim, os modelos gerados neste caso, especificamente pelos operadores GAMMA (0,5 e 0,7) foram os mais satisfatórios ao representar o potencial de recarga da área, apontando áreas que além de condizerem com o



mapa da condutividade hidráulica saturada, representaram com precisão as características do relevo e da vegetação.

A proporção das classes de potencial de infiltração encontradas para cada modelo fuzzy gerado com as variáveis de entrada areia, macroporosidade, densidade, TWI e NDVI pode ser visualizada na Figura 19. Os percentuais de área ocupada por cada classe de pertinência para todos os modelos fuzzy gerados pelos diferentes operadores avaliados são apresentados na Tabela 6.

A projeção das áreas favoráveis ao processo de recarga com todas as variáveis de entrada estudadas estimou uma área correspondente a 32% da sub-bacia no cenário mais otimista e de 0 a 17% nos cenários intermediários.

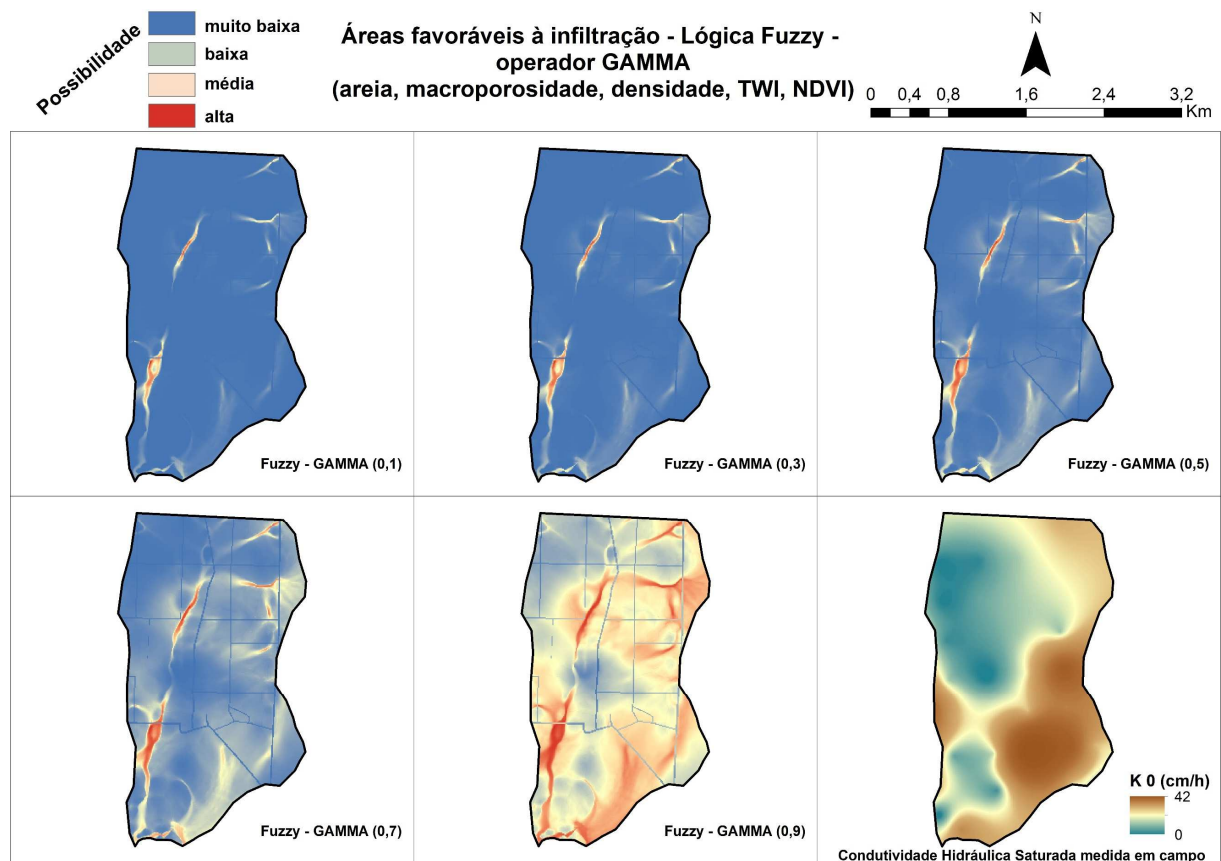


Figura 18 – Modelos gerados com o operador fuzzy GAMMA, com o acréscimo no Índice Gama ( $\gamma$ ) de 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9 para as variáveis de entrada: areia, macroporosidade, densidade, TWI e NDVI; Mapa da condutividade hidráulica saturada.

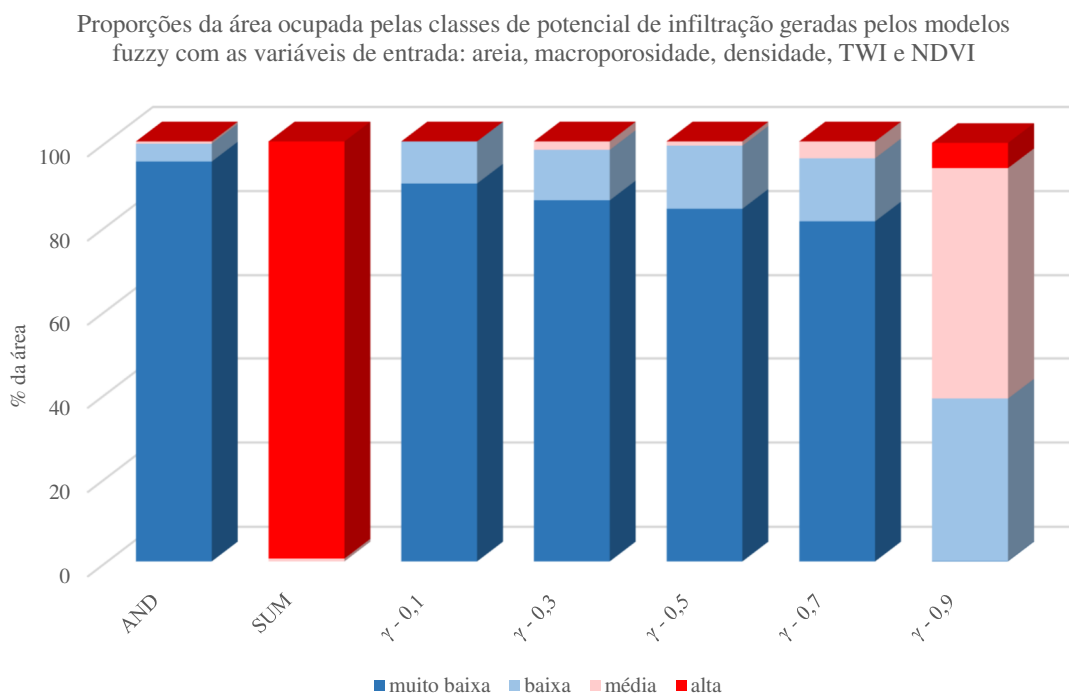


Figura 19 – Proporção entre as classes de potencial de infiltração geradas pelos diferentes operadores fuzzy, com as variáveis de entrada: areia, macroporosidade, densidade, TWI e NDVI.

Em relação aos modelos de Índice Gama 0,5 e 0,7, referenciados por Carrino et al. (2011), Bonham-Carter (1994) e An et al. (1991) como os mais equilibrados, neste estudo também foram os que apresentaram os melhores resultados tanto quando confrontados com as observações realizadas em campo como quando confrontados com o mapeamento da condutividade hidráulica saturada. Além disso, tais operadores geraram modelos capazes de detalhar com clareza a localização das áreas de interesse, neste caso, as favoráveis ao processo de recarga. Para o Índice ( $\gamma = 0,7$ ), cenário considerado intermediário otimista, foi prevista como favorável, ou seja, as classes de pertinência acima de 0,5 (classes de média e alta pertinência), uma área variando entre 17 e 39% dependendo da quantidade das variáveis de entrada, conforme observado na Tabela 10. Já os cenários considerados intermediários ( $\gamma = 0,5$ ) estimaram como favoráveis ao processo de recarga um a área variando de 8 a 21% do total da sub-bacia de estudo.



Tabela 6 – Porcentagem da área ocupada na sub-bacia de estudo por cada classe de pertinência gerada por todos os operadores fuzzy testados.

Operadores fuzzy	Porcentagem da área ocupada por classe de pertinência fuzzy			
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta
AND (índices físicos)	53,8	29,5	13	3,7
SUM (índices físicos)	97,9	1,9	0,3	0
GAMMA 0,1 (índices físicos)	74,1	18	7,9	0
GAMMA 0,3 (índices físicos)	64,5	23,2	11,8	0,5
GAMMA 0,5 (índices físicos)	50,5	27,7	18	3,8
GAMMA 0,7 (índices físicos)	27,4	33,6	27,7	11,3
GAMMA 0,9 (índices físicos)	2	19	37,8	41,2
AND (índices físicos + TWI)	97,9	1,9	0,3	0
SUM (índices físicos + TWI)	0	1,4	13,8	84,8
GAMMA 0,1 (índices físicos + TWI)	99,8	0,2	0	0
GAMMA 0,3 (índices físicos + TWI)	99,2	0,8	0	0
GAMMA 0,5 (índices físicos + TWI)	77,3	14,2	8	0,5
GAMMA 0,7 (índices físicos + TWI)	78	17	15,9	1
GAMMA 0,9 (índices físicos + TWI)	13	53,3	31,8	1,9
AND (índices físicos + TWI + NDVI)	97,9	1,9	0,3	0
SUM (índices físicos + TWI + NDVI)	0	0	0,5	99,5
GAMMA 0,1 (índices físicos + TWI + NDVI)	100	0	0	0
GAMMA 0,3 (índices físicos + TWI + NDVI)	99,4	0,6	0	0
GAMMA 0,5 (índices físicos + TWI + NDVI)	76,1	15,2	8,2	0,4
GAMMA 0,7 (índices físicos + TWI + NDVI)	79	16	16,4	1
GAMMA 0,9 (índices físicos + TWI + NDVI)	7,2	58,2	32,9	1,8

É possível concluir que o acréscimo das variáveis de entrada melhorou a capacidade de classificação e detalhamento dos modelos fuzzy obtidos, apresentando seus melhores resultados com as variáveis de entrada areia, macroporosidade, densidade do solo, TWI e NDVI, quando comparados aos modelos testados com menos variáveis (índices físicos e índices físicos + TWI). Neste sentido, duas características principais se destacam nos modelos fuzzy: quantitativamente resulta em uma redução das áreas classificadas como favoráveis ao processo de recarga, resultante da maior capacidade de detalhamento do modelo; e qualitativamente apresenta espacializações mais claras e confiáveis, influenciando positivamente no zoneamento geográfico das áreas de interesse com alta probabilidade de sucesso.

## **CONSIDERAÇÕES E LIMITAÇÕES DO MÉTODO AVALIADO**

Na sub-bacia de estudo foram classificadas como mais favoráveis ao processo de recarga principalmente as regiões de mata nativa associadas a drenagem principal, com destaque ainda para os trechos que apresentam também características como boa macroporosidade e relevo plano. Além destas, no sudeste da sub-bacia, locais que apresentam baixa densidade, alta porosidade, alta umidade e boa cobertura florestal nativa também foram classificados como favoráveis à recarga. Já na região nordeste as áreas classificadas como favoráveis à recarga, estão relacionadas com locais que reúnem características como um alto teor de areia, uma boa quantidade de macroporos e um bom índice de umidade.

Assim, as considerações e observações realizadas neste estudo são válidas apenas para a área da pesquisa, tendo em vista as condições peculiares de cada local.

Do ponto de vista prático, apesar da homogeneidade da área em termos de classes de solo, a amostragem dos atributos foi realizada apenas na camada de 20 a 40 cm, de forma que investigações e coletas de dados em maiores profundidades podem ser realizadas a fim de refinar os resultados de interesse. A fim de viabilizar a validação prática dos modelos propostos, recomenda-se também o monitoramento do nível freático da área via poços de monitoramento.

## CONCLUSÕES

A análise dos atributos do solo na sub-bacia revelou uma textura variando de média a arenosa, com teor de areia entre 65 e 87%, denotando uma tendência natural favorável à infiltração, neste aspecto.

A condutividade hidráulica saturada variou de baixa ( $0,06 \text{ cm h}^{-1}$ ) a excessiva ( $41,6 \text{ cm h}^{-1}$ ), com média de  $7,3 \text{ cm h}^{-1}$ , classificada como de alta permeabilidade.

Em relação à geoestatística, todos os atributos analisados: textura, macroporosidade, densidade e condutividade hidráulica saturada; apresentaram dependência espacial e obtiveram seus melhores ajustes ao modelo esférico. Destes, apenas a macroporosidade e a condutividade apresentaram anisotropia.

O Índice Topográfico de Umidade (TWI) foi eficaz em revelar os principais caminhos da drenagem superficial durante um evento pluviométrico e apresentou uma boa relação com as áreas planas e de alta acumulação de fluxo.

A cobertura vegetal da área contribui para a proteção do solo e é considerada como importante fator de retenção de água na sub-bacia, contudo, as estradas de solo exposto contribuem para a “canalização” dos fluxos e para o aumento da erosão na área.

A construção de modelos via lógica fuzzy, com a entrada de variáveis que representam o solo, o relevo (TWI) e a vegetação (NDVI), se mostrou muito eficiente na elaboração de mapeamentos complexos e diferentes cenários, representando de forma consistente não só as observações de campo como também o mapa de condutividade hidráulica saturada obtida a partir das amostras coletadas em campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, C.C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 2011. v. 35, p.1745-1757.

ALVARENGA, C.C. et al. Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQSRA) na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 2012, v.36, n.5, pp.1608-1619.

AMENDOLA, M.; SOUZA, A.L.; BARROS, L.C. Manual do uso da teoria dos conjuntos fuzzy no MATLAB 6.5. FEAGRI & IMECC/UNICAMP, 2005, p. 1-44.

AMORIM, D.D.; GONTIJO, I.; SANTOS, E.O. DE J.; NICOLE, L.R. Correlação espacial entre a condutividade hidráulica e atributos físicos do solo. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, 2011, v.7, n.13, p.263-265.

AN, P.; MOON, W.M.; RENCZ, A. Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 1991, 27(1): 1–11.

ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E.T.; HATFIELD, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, Madison, 1984, v. 76, n. 2, p. 300- 306.

BATISTA, E.A. & COUTO, H.T.Z. do. Influência de fatores físicos do solo sobre o desenvolvimento das espécies florestais mais importantes do cerrado da Reserva Biológica de Moji-Guaçu, SP. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS, 2, 1992. Resumos Expandidos... São Paulo: Instituto Florestal, 1992, p. 318–323.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. Soil structure: evaluation and agricultural significance. In: BAVAR, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. *Soil physics*. 4.ed. New York: J. Wiley, 1972. p.178-223.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 2005, 5ª ed. São Paulo: Ícone, 355 p.

BEVEN, K.J.; GERMANN, P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 1982, v.18, n.5, p.1311-1325.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrology Science Bulletin*, 1979, n. 24(1), p.43-69.

BLAKE, G.R. Particle Density. In: BLACK, C.A (Coordinator). *Methods of Soil Analysis: Part 1 – Physical and Mineralogical Properties, including Statistics of Measurement and Sampling*. Madison, Wisconsin USA: American Society of Agronomy, Inc., 1965, p. 371–373.

BOGAART, P. W.; TROCH, P. A. Curvature distribution within hillslopes and catchments and its effect on the hydrological response. *Hydrology and Earth System Sciences*, Göttingen, 2006, v. 10, p. 925-936.

BONHAM-CARTER GF. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Oxford, Pergamon, 1994, 398p.

BONISCH, S.; LOPES ASSAD, M.L.; MONTEIRO A.M.V.; CÂMARA, G. Representação e propagação de incertezas em dados de solo. II – Atributos numéricos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2004. Viçosa, v. 28, p 33-47.

BOTELHO, R.G.M.; SILVA, A.S. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. In: VITTE, A.C.; GUERRA, A.J.T. (Orgs.). *Reflexões sobre geografia física no Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand, 2004. p. 153-192.

BOUYOUCOS, G.H. A Recalibration of the hydrometer for making mechanical analysis of soils. *Journal of Agronomy*, Madison, 1951, v.43, n. 9, p. 434–438.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. *Introdução à Ciência da Geoinformação*, 2001. Acesso em outubro de 2015. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>>.

CAMPOS, M.C.C.; CARDOZO, N.P.; MARQUES JÚNIOR, J. Modelos de paisagem e sua utilização em levantamentos de pedológicos. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, 2006, v. 6, n. 1, p. 104-114.

CAPECHE, C. L. et al. *Parâmetros técnicos relacionados ao manejo e conservação do solo, água e vegetação: perguntas e respostas*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 16 p. (Embrapa Solos. Comunicado técnico, 28).

CAPOANE, V.; TIECHER, T.; ALVAREZ, J.W.R.R.; PELLEGRINI, A.; SCHAEFER, G.L.; SANTOS, L.J.C.; dos SANTOS, D.R. influência da resolução do modelo digital de elevação na determinação do índice topográfico de umidade e na capacidade de predição dos teores carbono orgânico do solo. *Revista Geo UERJ*, 2015, nº 27, p. 144-155, Rio de Janeiro, RJ. doi: 10.12957/geouerj.2015.13452.

CARRINO, T.A.; SILVA, A.M.; BOTELHO, N.F.; da SILVA, A.A.C. Lógica fuzzy e técnica SAM para modelagem previsional do ouro no setor oeste da província mineral do Tapajós usando dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geofísica*, 2011, vol. 29(3).

CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2003, Viçosa, v.27, n.4.

CERRI, C. E. P. et al. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: Basis for selecting an agronomic experimental area. *Geoderma*, 2004, v. 123, n. 1-2, p. 51–68.

COGO, N.P.; MOLDENHAUER, W.C.; FOSTER, G.R. Soil reductions from conservation tillage practices. *Soil Science Society of America*, 1984, v. 48, p. 368-373.

DOU, C.; WOLDT, W.; BOGARDI, I. Fuzzy rule-based approach to describe solute transport in the unsaturated zone. *Journal of Hydrology*, 1999, v. 220, p. 74-85.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006, 306p.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE – ESRI. ArcGIS Professional GIS for the desktop, version 10.2. Redlands, 2014. CD ROM.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 1991, 27:709-717.

FIORI, J.P.O.; CAMPOS, J.E.G.; ALMEIDA, L. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do Estado de Goiás. *Geociências*, São Paulo, 2010, v.29, n.2, p. 229-235.

FREEMAN, G.T. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers and Geosciences*, 1991, 17:413-22.

FREIRE, O. Solos das regiões tropicais. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2006, 271 p.

FURTUNATO, O.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANTONINO, A.C.D.; OLIVEIRA, L.M.M. de; SOUZA, E.S. de; MOURA, A.E.S.S. de. Variabilidade Espacial de Atributos Físico-hídricos de Solos em uma Bacia Experimental no Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, 2013, v.18, n.2, p.135–147.

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

GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solos do estado de São Paulo. *Bragantia - Boletim Técnico do Instituto Agrônômico do Estado São Paulo*, Campinas, 1960, v.19, n.21, p. 319-328.

GUERRA, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. In: *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Orgs.: A.J.T. Guerra e S.B. da Cunha. 1998, 3ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

HANCOCK, G.R.; MURPHY, D.; EVANS, K.G. Hillslope and catchment scale soil organic carbon concentration: Na assessment of the role of geomorphology and soil erosion in an undisturbed environment. *Geoderma*, 2010, v.155, n.36–45.

HEWLETT, J.D.; HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in the humid areas. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY*, 1., 1965, New York. *Proceedings...* New York: Pergamon, 1967. p. 275-290. *Hydrogeology Journal*, 2011, n. 19, p. 1563-1575.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press. 1989, 561 p.

JULIÀ, M.F. et al. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*, 2004, 123:257-277.

KAMIMURA, K.M.; DOS SANTOS, G.R.; OLIVEIRA, M.S. de; DIAS JUNIOR, M.D.S.; GUIMARÃES, P.T.G. Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho-amarelo, sob lavoura cafeeira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 2013, v.37, n.4, p.877–888.

KATINSKY, M. Fuzzy set modelling in Geographical Information Systems. Madsin Wisconsin – USA. *Dissertação de Mestrado: University of Wisconsin*, 1994. 43p.

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK CA (Coordinator). *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Properties, including Statistics of Measurement and Sampling*. Madison, Wisconsin USA: American Society of Agronomy, Inc., 1965, p. 210–221.

KRAEMER, G. B. Variabilidade espacial dos atributos do solo na delimitação das unidades de mapeamento. *Dissertação apresentada ao Programa de PósGraduação em Ciência do Solo*, 2007, Universidade Federal do Paraná.

KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D.R. Soil hydrology. Reiskirchen, Germany: Catena Verlag GMBH, 1994, 370 p.

LANDIM, P.M.B.; STURARO, J.R. Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. Rio Claro - SP. DGA, IGCE,UNESP / Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático n. 06, 19p. 2002. Disponível em: [www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/kindicativa.pdf](http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/kindicativa.pdf).

LEAP, D.I. Geological occurrence of groundwater. In: Delleur, J. W. (ed.) The Handbook of Groundwater Engineering. CRC Press LLC. E.U.A., 1999, 2-53.

LIMA, G.C.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; SILVA, M.A. da; OLIVEIRA, A.H.; AVANZI, J.C.; FREITAS, D.A.F. de. Estimativa do potencial de recarga na Sub-bacia das Posses, Extrema (MG), em função dos atributos fisiográficos, pedológicos e topográficos. Geociências, São Paulo, 2013, v.32, n.1, p. 51-62.

LIMA, G.C.; SILVA, M.L.N.; OLIVEIRA, M.S. de; CURI, N., SILVA, M.A. da; OLIVEIRA, A.H. Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, 2014, v.18, n.5, p. 517–526.

LIMA, J.E.F.W.; et al. Suspended sediment fluxes in the large river basins of Brazil. In: Sediment budgets, I. IAHS Scientific Assembly, Foz do Iguaçu, Brazil, 2005. IAHS Publ. 291, p.355-363.

LIN, H. Earth's critical zone and hydropedology: concepts, characteristics, and advances. Hydrology and Earth Systems Science, Göttingen, 2010. v. 14, p.25-45.

MATHERON, G. Les Variables Régionalisées et leur estimation: Une Application de la Théorie des Fonctions Aléatoires aux Sciences de la Nature. Paris: Masson, 1965, 305 p.

MELLO, C.R. de; CURI, N. Hydropedology. Ciência & Agrotecnologia., Lavras, 2012. v. 36, n. 2, p. 137 -146.

MENEZES, M.D. de; JUNQUEIRA JÚNIOR, J.A.; MELLO, C.R. de; SILVA, A.M. de; CURI, N.; MARQUES, J.J. 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). Revista Scientia Forestalis, Piracicaba, 2009, v.37, n. 82, p. 175-184.

MESQUITA, M. da G.B. de F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. Revista Ciência Rural, Santa Maria, 2004, v.34, n.3, p.963-969, ISSN 0103-8478.



MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. *Revista Ciência Rural*, 2012, volume 42, n. 9.

MITASOVA, H. et al. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal Geographical Information System*, 1996. 10: 629– 641.

MONTENEGRO, A.A.A.; ABRANTES, J.R.C.B.; LIMA, J.L.M.P.; SINHGH, V.P.; SANTOS, T.E.M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena*, Amsterdam, 2013, v. 109, p. 139-149.

MOORE, I.D. et al. GIS and land surface subsurface process. In: GOODCHILD, M.F.; BRADLEY, O. *Environmental Modeling with GIS*. Parks & Louis T. Steyaert (eds), 1993. pp. 196-230.

MOREIRA, F.R.; CÂMARA, G.; ALMEIDA FILHO, R. Técnicas de suporte a decisão para modelagem geográfica por álgebra de mapas. São José dos Campos: INPE, 2001. 121p. Relatório Técnico.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). Basic research opportunities in earth science. Washington: National Academy Press, 2001. 168p.

OLIVEIRA, J.B. de. Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. *Boletim Científico* nº 45, Instituto Agrônomo Campinas, SP, 1999, 108p.

OLIVEIRA, M.J.P.M. Recarga de Águas Subterrâneas – Métodos de Avaliação. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade de Lisboa, Lisboa – Portugal, 2004, 24p.

OLIVER, M.A. & WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, Amsterdam, 2014, v.113, n.1, p.56–69.

PARFITT, J.M.B.; TIMM, L.C.; REICHARDT, K.; PAULETTO, E.A.. Impacts of Land Leveling on Lowland Soil Physical Properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 2014, v.38, n.1, p.315–326.

PINTO, V.A.P.; BOTELHO, S.A.; DAVIDE, A.C.; FERREIRA, E. Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. *Scientia Forestalis*, 2004, Piracicaba. n. 65, p. 197-206.

PRUSKI, F.F. (Ed.) *Conservação do solo e da água*. Viçosa, 2006. 240 p.

RAWLS, W.J.; DAVID, G.; VAN MULLEN, J.A.; WARD, T.J. Infiltration. In: American Society of Civil Engineers. *Hidrology Handbook*. 2ª ed. New York: ASCE, 1996, p. 75-124. (ASCE Manuals and Report on Engineering Practice, 28).

RESENDE, M. et al. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 5. ed. Lavras: Editora UFLA, 2007. 322 p.

RESENDE, S.B.; LANI, J.L.; RESENDE, M. Solo como reservatório dinâmico na produção de água. *Ação Ambiental*, 1998, Viçosa, v.3, p.23-26.

RIBEIRO, K.D.; MENEZES, S.M.; MESQUITA, M.G.B.F.; SAMPAIO, F.M.T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. *Ciência & Agrotecnologia*, Lavras, 2007, v.31, n.4, p.1167-1175.

ROBINSON, T.P. & METTERNICHT, G. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, Amsterdam, 2006, v.50, n.2, p.97-108.

SANTOS, J.N.; PEREIRA, E.D. Carta de susceptibilidade a infiltração da água no solo na sub-bacia do rio Maracanã-MA. *Cadernos de Pesquisa*, São Luís, 2013, v. 20, n. especial.

SANTOS, D. dos; SOUZA, E.G. de; NÓBREGA, L.H.P.; BAZZI, C.L.; GONÇALVES JÚNIOR, A.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2012a, Campina Grande, v.16, n.8, p.843-848.

SANTOS, K.S.; MONTENEGRO, A.A.A.; ALMEIDA, B.G. de; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANDRADE, T.D.S.; FONTES JÚNIOR, R.V.D.P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2012b, Campina Grande, v.16, n.8, p.828.

SANTOS, I. dos; KOBIYAMA, M. Aplicação do TOPMODEL para determinação de áreas saturadas da bacia do rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, Taubaté, 2008, v. 3, n. 2, p. 77-89.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Viçosa. 2005. 100p.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M.A.; VILAS BOAS, M.A.; SAMPAIO, S.C.; JOHANN, J.A. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, 2010, v.32, n.1, p.7-13.

SCHOENEBERGER, P.J.; WYSOCKI, D.A. Hydrology of soils and deep regolith: a nexus between soil geography, ecosystems and land management. *Geoderma*, 2005. v. 126, p. 117-128.

SIEFERT, C.A.C.; SANTOS, I. dos. Áreas hidrologicamente sensíveis: teoria e aplicação para a bacia do rio Barigui, PR, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, Taubaté, 2010, v. 5, n. 2, p. 61-7610.

SILVA JÚNIOR, J.F. da; PEREIRA, G.T.; CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J. Métodos geoestatísticos na modelagem espacial do diâmetro médio do cristal da goethita. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2013. V. 17, n. 11, p. 1127-1134, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

SILVA, A. F. DA et al. Simulação sequencial de atributos diagnósticos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2015, v. 19, n. 1, p. 418-425.

SILVA, AB. *Sistemas de Informações Geo-Referenciadas: Conceitos e Fundamentos*. Campinas, SP, Editora da Unicamp, 2003, 236 p.

SIRTOLI, A.E.; da SILVEIRA, C.T.; da SILVA, C.R.; MONTOVANI, L.E.; RIBEIRO, S.R.A.; OKA-FIORI, C. Atributos topográficos secundários no mapeamento de pedoformas. *Revista Geociências*, 2008, volume 27, n. 1, p. 63-77, UNESP, São Paulo.

SPAROVEK, G.; VAN LIER, Q.D.J.; DOURADO NETO, D. Short Communication Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil. *International Journal of Climatology*, 2007, New York, v.27, p.257–266.

TARBOTON, D.G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 1997, vol. 33, n. 2, p.309-319.

TEIXEIRA, W. et al. *Decifrando a terra*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2003, 558 p.

TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 1997, v. 2, n. 1, p. 165-152.

UCRBEEc. *Plano de Manejo da Reserva Biológica e Estação Ecológica de Mogi-Guaçu – SP*. Piracicaba, 2015. 137p.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*. Berkeley, 1983, v.31, n.3, 75 p.

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

WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. *Terrain analysis: Principles and applications*. New York, John Wiley & Sons, 2000. p.1-27.

XU, Y.; BEEKMAN, H.E. Groundwater recharge estimation in Southern Africa. UNESCO IHP, 2003. Series n. 64, UNESCO Paris. 207p.

YIN, L.; HU, G.; HUANG, J.; WEN, D.; DONG, J.; WANG, X.; LI, H.  
“Groundwater recharge estimation in the Ordos Plateau, China: comparison of methods”.

ZHOU, G.Y.; MORRIS, J.D.; YAN, J.H.; YU, Z.Y.; PENG, S.L. Hydrological impacts of reforestation with eucalypts and indigenous species: a case study in Southern China. *Forest Ecology and Management*, 2002, v. 167, p. 209-222.

## ANEXO I

Resultados de todas as análises de textura e estrutura realizadas, apresentados por ponto amostral.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Condut. (cm/h)	Macroporos (%)	UTM X (m)	UTM Y (m)
1	47,44	19,61	32,95	1,44	31,75	15,5	278031	7537172
2	17,19	4,8	78,01	1,60	7,76	17,3	278526	7537154
3	18,79	3,43	77,78	1,68	0,57	6,6	277279	7536708
4	17,71	6,35	75,94	1,65	1,18	6,7	277674	7536734
5	9,97	2,83	87,2	1,78	3,90	8,2	278066	7536775
6	14,66	7,01	78,33	1,68	6,57	9,3	278549	7536809
7	20,64	4,94	74,42	1,62	0,71	8,4	277307	7536312
8	14,36	5,8	79,84	1,54	2,75	16,2	277692	7536339
9	12,7	3,33	83,97	1,31	94,45	28,4	278017	7536385
10	12,58	6,47	80,95	1,59	4,82	17,8	278566	7536420
11	25,05	8,39	66,56	1,41	1,59	16,5	277341	7535914
12	12,21	7,15	80,64	1,32	0,28	15,4	277733	7535940
13	11,76	3,44	84,8	1,65	4,20	18,7	278123	7535969
14	11,33	3,49	85,18	1,52	3,81	19,8	278521	7536008
15	18,66	5,73	75,61	1,41	3,94	20,5	277372	7535514
16	25,13	3,58	71,29	1,80	0,06	3,1	277764	7535554
17	18,18	2,75	79,07	1,78	5,69	9,6	278160	7535585
18	12,91	2,13	84,96	1,60	23,29	15,5	278554	7535614
19	14,5	5,58	79,92	1,50	9,29	18,7	277385	7535123
20	13,95	3,48	82,57	1,65	1,32	12,5	277790	7535148
21	12,09	2,63	85,28	1,65	7,07	14,3	278189	7535183
22	17,04	4,24	78,72	1,53	13,01	12,8	278583	7535220
23	9,93	4,93	85,14	1,65	2,65	16,6	277427	7534726
24	24,6	5,76	69,64	1,63	4,61	11,0	277829	7534749
25	14,07	10,5	75,43	1,62	41,61	25,2	278220	7534777
26	14,23	4,25	81,52	1,41	22,99	16,3	278614	7534826
27	11,16	8,04	80,80	1,51	18,21	19,4	277428	7534345
28	11,25	23,22	65,53	1,51	1,72	12,0	277867	7534370
29	6,19	13,11	80,70	0,56	2,40	13,6	278254	7534397
30	14,98	5,68	79,34	1,66	6,57	7,5	278645	7534443
31	25,46	9,22	65,32	1,58	0,11	13,9	277268	7534115
32	23,16	6,47	70,37	1,46	11,23	20,1	277503	7533969
33	13,93	7,62	78,45	1,69	3,13	7,7	278948	7534452
34	17,92	5,69	76,39	1,59	7,34	10,8	278878	7534838