

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MAPEAMENTO DOS PARÂMETROS PEDOLÓGICOS E AMBIENTAIS  
DA BACIA DO RIBEIRÃO LAVAPÉS, EM BOTUCATU – SP,  
UTILIZANDO TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO**

ANDRÉ CASTILHO ORSI

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP  
Setembro de 2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**MAPEAMENTO DOS PARÂMETROS PEDOLÓGICOS E AMBIENTAIS  
DA BACIA DO RIBEIRÃO LAVAPÉS, EM BOTUCATU – SP,  
UTILIZANDO TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO**

ANDRÉ CASTILHO ORSI  
Engenheiro Agrônomo

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK  
Orientadora

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU – SP  
Setembro de 2004

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO -  
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO  
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Orsi, André Castilho, 1976-  
Or76m Mapeamento dos parâmetros pedológicos e ambientais da bacia do  
Ribeirão Lavapés, em Botucatu, SP, utilizando técnicas de  
geoprocessamento / André Castilho Orsi.  
-- Botucatu, [s.n.], 2004.  
xiii, 112 f. : il. color., mapas, tabs.  
  
Dissertação (mestrado) -- Universidade Estadual  
Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas.  
Orientadora: Célia Regina Zimback.  
Inclui bibliografia.  
  
1. Geoprocessamento. 2 . Sistemas de informação geográfica.  
2.Bacias hidrográficas. 3. Solos - Botucatu (SP). I. Zimback, Célia  
Regina. II. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho"  
(Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. IV. Título.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica; Geoprocessamento; Mapeamento do solo; Sistema de  
informação geográfica; Geoestatística.

*“... o anseio profundo nos persegue, até sermos levados ao templo onde o encontro acontece. E o encontro sempre acontece com o todo no qual estará o seu amor por tudo e por todos, e também estarão as árvores e os rios e as montanhas e as estrelas...”*

*(OSHO)*

*Deus,*

*Criador do Céu e da Terra*

*Abençoai a todos.*

*E ajudai-nos,*

*A compreender os ensinamentos da vida,*

*A alcançarmos o equilíbrio*

*Perpetuando a Paz*

*Em toda a Natureza.*

*Aos meus pais Marcos e Fátima,  
e às minhas irmãs Daniela e Alessandra,*

**OFEREÇO**

À

*Minha Amada*

*Julia*

**DEDICO**

### *Agradecimentos Especiais*

A **Professora Dra. Célia Regina Lopes Zimback**, que me ofereceu a oportunidade de cursar o mestrado, de aprender mais, e, sobretudo de evoluir em minha caminhada nesta vida, me orientando e me ajudando muito neste trabalho.

Ao **Engenheiro Agrônomo João Paulo Damiano**, pelo apoio constante em todas as etapas deste trabalho, pelos ensinamentos referentes às ferramentas de geoprocessamento e pela nossa grande amizade.

Ao **Cientista Social Paulo Henrique Malagutte**, pelos vários momentos de profundas análises de conjuntura com a relação ao nosso município de Botucatu, sempre buscando soluções para os diversos problemas que enfrentamos de ordem sócio-ambientais e pela nossa grande amizade.

### *Agradecimentos*

À Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Botucatu, pela oportunidade de participar do Curso de Pós-Graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão de bolsa que teve enorme importância no desenvolvimento desta dissertação.

Aos Professores Drs. João Carlos Cury Saad e Raimundo Leite Cruz, Coordenadores do Curso de Pós-Graduação que disponibilizaram seu tempo e não pouparam esforços no auxílio de todos os alunos durante o curso.

Aos Professores Drs. Sílvio Carlos Santos Nagy e Antônio de Pádua Sousa pelos ensinamentos passados no decorrer deste trabalho e pela amizade construída.

Ao Departamento de Ciência do Solo e aos seus professores e funcionários pela concessão de materiais, laboratórios e equipamentos para a realização das diversas análises que fizeram parte deste trabalho.

Aos amigos Antrax, Zé Pequeno e Pixador pelo apoio e trabalhos nas etapas de coletas de dados no campo.

Aos amigos Rodrigo Onça, Ricardo Kadão e João Lopes pelo apoio na realização deste trabalho.

Aos colegas do GEPAG: Caetano, Débora, Juliana, Ivana, Cristian, André Jin, Gláucia, Natália, Luíza, pelo apoio em todos os momentos.

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
1. RESUMO.....	01
2. ABSTRACT.....	03
3. INTRODUÇÃO.....	05
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	07
4.1. Bacia Hidrográfica.....	07
4.2. Geoprocessamento.....	10
4.3. Geoestatística.....	16
4.4. Drenagem superficial.....	19
4.5. Drenagem interna dos solos.....	21
4.6. Permeâmetro de Guelph.....	24
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
5.1. Caracterização da área de estudo.....	26
5.1.1. Situação geográfica.....	26
5.1.2. Clima.....	29
5.1.3. Vegetação.....	29
5.1.4. Geologia.....	30
5.1.5. Relevo.....	32
5.1.6. Solos.....	33
5.2. Material.....	33
5.2.1. Material Cartográfico.....	33
5.2.3. Fotografias aéreas.....	34
5.2.4. Equipamentos.....	34
5.2.5. Programas utilizados.....	35
5.3. Métodos.....	35
5.3.1. Método de coleta dos solos.....	35
5.3.2. Análises químicas dos solos.....	35

5.3.2. Análises físico-hídricas dos solos.....	36
5.3.2.1. Análise granulométrica (%).....	36
5.3.2.2. Densidade do solo (g/cm <sup>3</sup> ).....	36
5.3.2.3. Densidade de partículas (g/cm <sup>3</sup> ).....	37
5.3.2.4. Porosidade total do solo (%).....	37
5.3.2.5. Condutividade hidráulica (mm/h).....	37
5.3.3. Análises Estatísticas.....	40
5.3.4. Análises Geoestatísticas.....	41
5.3.4.1. Interpolação dos dados – Krigagem.....	42
5.3.5. Sistema de Informação Geográfica.....	42
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
6.1. Análise Descritiva.....	47
6.2. Análise Espacial.....	50
6.2.1. Parâmetros químicos.....	50
6.2.2 Parâmetros físico-hídricos.....	67
6.3 Modelagem espacial.....	75
7. CONCLUSÕES.....	96
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

## LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1. Relação de cartas planialtimétricas na escala de 1:10.000/IGC utilizadas para o estudo da área.....	34
Quadro 2. Categorias de meios porosos para estimativa de $\alpha^*$ (Elrick et al. 1989).....	39
Quadro 3. Parâmetros de ajuste A e B, para o cálculo do fator C.....	39
Quadro 4. Classificação e atribuição de notas para valores de pH e V%.....	44
Quadro 5. Classificação e atribuição de notas para valores de CTC e M.O.....	44
Quadro 6. Classificação, intervalo de enquadramento para os valores encontrados e classes de fertilidade aparente.....	45
Quadro 7. Análise estatística descritiva dos parâmetros químicos dos solos da bacia do Ribeirão Lavapés.....	48
Quadro 8. Análise estatística descritiva dos parâmetros físico-hídricos dos solos da bacia do Ribeirão Lavapés.....	49
Quadro 9. Resultados da análise variográfica dos parâmetros químicos dos solos da bacia do Ribeirão Lavapés.....	51
Quadro 10. Resultados da análise variográfica dos parâmetros físico-hídricos dos solos da bacia do Ribeirão Lavapés.....	67
Quadro 11. Distribuição do uso das terras e área.....	83
Quadro 12. Distribuição dos conflitos do uso das terras e área, em relação às classes de capacidade de uso.....	93

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ilustração de uma bacia hidrográfica.....	08
Figura 2. Base de dados gerada pelo SIG.....	12
Figura 4. Vista da nascente principal do Ribeirão Lavapés.....	27
Figura 5. Área da foz do Ribeirão Lavapés na Represa de Barra Bonita, Rio Tietê.....	27
Figura 6. Localização da área de estudo indicando os pontos de amostragem (sem escala).....	28
Figura 7. Mapa interpolado do pH do solo, profundidade 0-20cm.....	53
Figura 8. Mapa interpolado do pH do solo, profundidade 20-40cm.....	53
Figura 9. Mapa interpolado dos teores de Matéria Orgânica do solo ( $\text{g}/\text{dm}^3$ ), profundidade 0-20cm.....	54
Figura 10. Mapa interpolado dos teores de Matéria Orgânica do solo ( $\text{g}/\text{dm}^3$ ), profundidade 20-40cm.....	54
Figura 11. Mapa interpolado dos teores de Fósforo do solo ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ ), profundidade 0-20cm.....	55
Figura 12. Mapa interpolado dos teores de Fósforo do solo ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ ), profundidade 20-40cm.....	55
Figura 13. Mapa interpolado da acidez de reserva ( $\text{mmol}/\text{dm}^3$ ), profundidade 0-20cm.....	56
Figura 14. Mapa interpolado da acidez de reserva ( $\text{mmol}/\text{dm}^3$ ), profundidade 20-40cm.....	56
Figura 15. Mapa interpolado dos teores de Potássio do solo ( $\text{mmol}/\text{dm}^3$ ), profundidade 0-20cm.....	57
Figura 16. Mapa interpolado dos teores de Potássio do solo ( $\text{mmol}/\text{dm}^3$ ), profundidade 20-40cm.....	57
Figura 17. Mapa interpolado dos teores de Cálcio do solo ( $\text{mmol}/\text{dm}^3$ ), profundidade 0-20cm.....	58
Figura 18. Mapa interpolado dos teores de Cálcio do solo ( $\text{mmol}/\text{dm}^3$ ), profundidade 20-40cm.....	58
Figura 19. Mapa interpolado dos teores de Magnésio do solo ( $\text{mmol}/\text{dm}^3$ ), profundidade 0-20cm.....	59

Figura 20. Mapa interpolado dos teores de Magnésio do solo ( $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$ ), profundidade 20-40cm.....	59
Figura 21. Mapa interpolado do Soma de Bases ( $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$ ), profundidade 0-20cm.....	60
Figura 22. Mapa interpolado do Soma de Bases ( $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$ ), profundidade 20-40cm.....	60
Figura 23. Mapa interpolado da Capacidade de Troca Catiônica ( $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$ ), profundidade 0-20cm.....	61
Figura 24. Mapa interpolado da Capacidade de Troca Catiônica ( $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$ ), profundidade 20-40cm.....	61
Figura 25. Mapa interpolado do V% do solo, profundidade 0-20cm.....	62
Figura 26. Mapa interpolado do V% do solo, profundidade 20-40cm.....	62
Figura 27. Mapa das Classes de Fertilidade Aparente do solo, profundidade 0-20cm.....	66
Figura 28. Mapa das Classes de Fertilidade Aparente do solo, profundidade 20-40cm.....	66
Figura 29. Mapa interpolado do atributo Areia Total (g/kg), profundidade 0-20cm.....	68
Figura 30. Mapa interpolado do atributo Areia Total (g/kg), profundidade 20-40cm.....	68
Figura 31. Mapa interpolado do atributo Argila (g/kg), profundidade 0-20cm.....	69
Figura 32. Mapa interpolado do atributo Argila (g/kg), profundidade 20-40cm.....	69
Figura 33. Mapa interpolado do atributo Silte (g/kg), profundidade 0-20cm.....	70
Figura 34. Mapa interpolado do atributo Silte (g/kg), profundidade 20-40cm.....	70
Figura 35. Mapa interpolado do atributo Densidade do Solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), profundidade 0-20cm.....	71
Figura 36. Mapa interpolado do atributo Densidade do Solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), profundidade 20-40cm.....	71
Figura 37. Mapa interpolado do atributo Porosidade Total, profundidade 0-20cm.....	72
Figura 38. Mapa interpolado do atributo Porosidade Total, profundidade 20-40cm.....	72
Figura 39. Mapa interpolado do atributo Infiltração Básica do solo (mm/h), profundidade 0-20cm.....	73
Figura 40. Mapa interpolado do atributo Infiltração Básica do solo (mm/h), profundidade 20-40cm.....	73
Figura 41. Mapa interpolado do atributo Condutividade Hidráulica (mm/h), profundidade 0-20cm.....	74
Figura 42. Mapa interpolado do atributo Condutividade Hidráulica (mm/h), profundidade 20-40cm.....	74
Figura 43. Modelo Digital de Elevação do Terreno da bacia do Ribeirão Lavapés.....	77

Figura 44. Mapa de Classes de Declive da bacia do Ribeirão Lavapés.....	79
Figura 45. Bacia do Ribeirão Lavapés em 3D, com exagero vertical de 5x, mostrando áreas das nascentes e mancha urbana em primeiro plano.....	80
Figura 46. Bacia do Ribeirão Lavapés em 3D, sem exagero vertical, mostrando a área da foz do Ribeirão Lavapés na Represa de Barra Bonita, Rio Tietê.....	81
Figura 47. Mapa da distribuição do uso atual da bacia do Ribeirão Lavapés, no ano 2000.....	82
Figura 48. Voçoroca do Jardim Evelin, área de nascente do Ribeirão Lavapés.....	84
Figura 49. Assoreamento da nascente do Córrego da Água Fria.....	84
Figura 50. Construções irregulares dentro de A.P.P do Ribeirão Lavapés, no centro da cidade de Botucatu.....	85
Figura 51. Mapa demonstrativo da localização obrigatória das Áreas de Preservação Permanente.....	87
Figura 52. Mapa de adequação da recomposição das áreas de preservação permanente.....	89
Figura 53. Mapa de Classes de Capacidade de Uso para a bacia do Ribeirão Lavapés.....	94
Figura 54. Mapa de conflito entre o uso atual e as classes de capacidade de uso.....	95

## 1. RESUMO

A realidade atual mostra um quadro adverso quanto ao modo de vida do homem em relação à Natureza. Regiões, que anteriormente encontravam-se sob vegetação natural de florestas, com grande infiltração de água, hoje estão completamente impermeabilizadas pelas áreas urbanas ou ocupadas por cultivos agrícolas intensivos e já apresentam sinais de erosão acelerada, evidenciando o manejo inadequado dos solos. Vendo a necessidade de um planejamento ambiental, fazem-se necessários estudos mais aprofundados sobre as características das bacias hidrográficas. O presente trabalho foi conduzido na bacia do Ribeirão Lavapés no município de Botucatu, Estado de São Paulo, abrangendo uma área de 10.704 ha. A finalidade deste estudo foi mapear os principais parâmetros pedológicos e ambientais da bacia hidrográfica caracterizada, através da utilização das ferramentas do geoprocessamento como os sistemas de informações geográficas e o emprego da interpolação em geoestatística (“krigagem”), visando criar um banco de dados georreferenciado, e oferecer suporte às tomadas de decisões no planejamento ambiental. Os resultados obtidos permitiram observar que a bacia do Ribeirão Lavapés possui como maior uso as pastagens representando 40,7%, seguida de culturas agrícolas como o cultivo de cana de açúcar na porção inferior da bacia perfazendo 20,1%, sendo que a mancha urbana do município abrange 21,7% do total da bacia. Os impactos ambientais devido à falta de planejamento na ocupação desta bacia são evidentes, ao se analisar os resultados obtidos do conflito referente ao uso atual, em relação às classes de capacidade de uso, onde os cultivos agrícolas ocupam 4,6% de áreas impróprias e a

mancha urbana invadiu 4,15% de áreas próprias para a agricultura. Outro conflito verificado na bacia do “Lavapés” é com relação às áreas de preservação permanente, que deveriam representar 9,2% segundo a legislação ambiental. Porém, para a adequação deste problema será necessário restaurar 6,03% de área da bacia, juntamente também com a reserva legal que deveria representar 20% da área total, ou seja, 2.141 ha, sendo necessário, portanto recompor 8,9% do total desta bacia hidrográfica. A utilização das técnicas de geoprocessamento, neste trabalho, permitiu desenvolver metodologias mais versáteis e argumentos consistentes para fundamentar decisões no planejamento, que minimizem os impactos ambientais da ocupação da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés.

---

Palavras-chave: Bacia hidrográfica; geoprocessamento; mapeamento do solo; sistema de informação geográfica; geoestatística, krigagem; interpolação.

## **MAPPING THE PEDOLOGICS AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF RIBEIRÃO LAVAPÉS WATERSHED, IN BOTUCATU – SP, UTILIZING GEOPROCESSED TECHNIQUES.**

Botucatu, 2004. 152p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

**Author: ANDRÉ CASTILHO ORSI**

**Adviser: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK**

### **2. SUMMARY**

The present reality shows an adverse relation between the human life style and the Nature. Natural regions that in the past were covered by natural forests, with high level of water infiltration, today are completely impermeable by the expansion of the urban areas or are occupied by intensive agriculture. So these regions present accelerated signals of erosion, evidencing inadequate soil management. Consequently the need of an environmental planning has been necessary, demanding more detailed studies of the watersheds characteristics. The present work was realized in the Ribeirão Lavapés watershed, located on Botucatu City, Sao Paulo State, draining 10,704 ha. The aim of this study was to map the main pedologic-environmental parameters of this watershed using geoprocessed instruments like as geographic information systems and employment of interpolation in geostatistics (kriging), targeting to create a “georeferenced” data bank and offer support for decisions in environmental planning. The results lead to conclude that Ribeirão Lavapés watershed has as major use in pasture representing 40.7%, followed by agriculture like as sugar cane culture in the bottom part of the watershed taking 20.1%, and the urban zone represents 21.7% of the total area. The environmental impacts occur because no planning of the “Lavapés” watershed occupation is evident, analyzing the results obtained with the present use of its lands. Also, the class capacity use has been characterized as agriculture occupying 4.6% of improper areas, and the urban zone invades 4.15% of proper agriculture areas. Another conflict evidenced in this watershed is related with permanent preservation areas that should represent 9.2% as the

environmental protection law determine. However, to correct this problem it is necessary to restore 6.03% of the watershed area, whose legal reserve should represent 20% of the total area, corresponding to 2,141 ha, and it is also necessary to restore 8.9% of the total watershed. Thus the use here of geoprocessed techniques permitted to develop versatile methodologies and solid arguments to found decisions on the planning that permit to minimize the environmental impacts on the Ribeirão Lavapés watershed occupation.

---

Key words: Watershed; geoprocessing; soil mapping; geographic information system; geostatistics; kriging; interpolation.

### **3. INTRODUÇÃO**

A crescente complexidade das interações existentes entre o modo de vida do homem com a natureza, torna a administração dos recursos naturais um dos problemas mais críticos deste momento. Regiões, que anteriormente encontravam-se sob vegetação natural de florestas, com grande infiltração de água, hoje estão completamente impermeabilizadas pelas áreas urbanas ou ocupadas por cultivos agrícolas intensivos e já apresentam sinais de erosão acelerada, evidenciando o manejo inadequado dos solos.

O diagnóstico da situação real em que se encontram os recursos em dado espaço geográfico passa a ser um instrumento necessário em um trabalho de planejamento ambiental. Dentre as metodologias para se diagnosticar a situação atual do meio ambiente, destacam-se as Bacias Hidrográficas.

Torna-se necessário no planejamento ambiental de bacias hidrográficas o levantamento e mapeamento das características das áreas em estudo, que se constituem em instrumentos imprescindíveis para representar as diferentes informações temáticas, as potencialidades naturais relativas ao meio físico e ao uso atual do solo, visando técnicas e manejos que minimizem os impactos ambientais.

Nos últimos anos, observa-se um avanço nas áreas da informática, dos registros georreferenciados e sistemas de informação geográfica, o que possibilita melhores estratégias para o manejo do meio ambiente, auxiliando o melhor entendimento e representação dos modelos complexos de distribuição espacial dos atributos e propriedades dos solos. Os sistemas de informações geográficas permitem manipular e analisar os dados

físicos e hidrológicos da bacia, automaticamente apresentando os resultados sob a forma de mapas, permitindo-se, então, planejar ações concretas e buscar novas soluções para a ocupação racional reduzindo os impactos nas bacias hidrográficas.

As diversas propriedades físicas e químicas do solo apresentam um comportamento variável no espaço e no tempo, caracterizando a existência de variabilidade espacial. Tal variabilidade é devida a uma série de fatores geohidrológicos. Portanto, os parâmetros envolvidos requerem uma boa análise para a melhor interpretação dos dados.

Ao estudar-se a variabilidade do solo, podem ser utilizados, basicamente, dois enfoques que se diferenciam na forma de análise dos dados. A estatística tradicional, que exige a validade de algumas hipóteses básicas sobre as variáveis, como a independência entre as observações, a variância constante e a distribuição normal dos dados; e a geoestatística, que vem apresentando uma aplicação crescente na avaliação da variabilidade espacial de diversos parâmetros de interesse em ciências do solo, permitindo a interpretação dos resultados baseados na estrutura da sua variabilidade natural, levando em consideração a existência da dependência espacial dentro do espaço de amostragem. Portanto, a variabilidade espacial das diversas propriedades dos solos precisa ser definida, sendo que a geoestatística vem-se mostrando uma ferramenta adequada para esse propósito.

A bacia do Ribeirão Lavapés tem suas nascentes principais e seus afluentes praticamente dentro da área urbana de Botucatu, percorrendo grande extensão até sua foz no Rio Tietê. A cidade de Botucatu está sofrendo transformações estruturais importantes com a expansão urbana na cabeceira da bacia do Ribeirão Lavapés. Grande parte das áreas contribuinte à bacia está praticamente toda urbanizada, com o solo quase que totalmente impermeabilizado, elevando, em consequência, os valores das vazões e causando problemas de enchentes em alguns locais da macrodrenagem.

Diante do exposto, o presente estudo teve por objetivo mapear e caracterizar alguns parâmetros pedológicos e ambientais da bacia do Ribeirão Lavapés, utilizando-se de técnicas de geoprocessamento, para a construção de um banco de dados georreferenciado que permitiu gerar planos de informação do relevo, uso do solo, capacidade de uso e conflitos, utilizando de um Sistema de Informação Geográfica, que possibilitou analisar e quantificar a adequação das áreas de preservação permanente e reserva legal da bacia, propondo um direcionamento no planejamento ambiental.

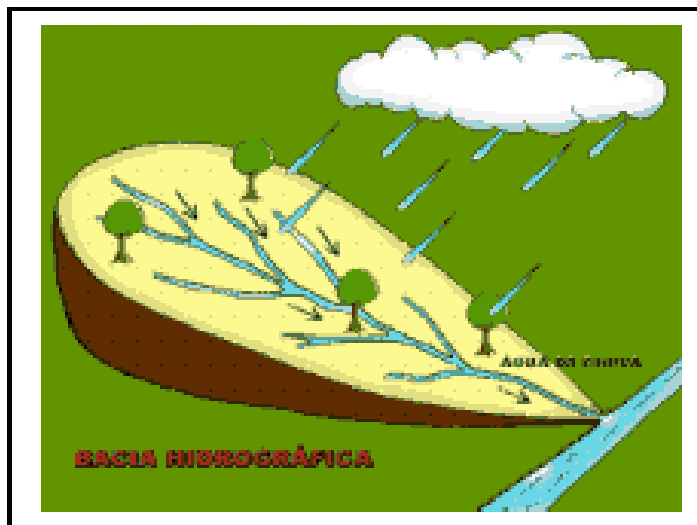
## **4. REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1. Bacia Hidrográfica**

Uma bacia hidrográfica é o conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes (GUERRA, 1993) cuja delimitação é dada pelas linhas divisoras de água que demarcam seu contorno. Essas linhas são definidas pela conformação das curvas de nível e ligam os pontos mais elevados da região em torno da drenagem considerada.

Encostas, topos ou cristas e fundos de vale, canais, corpos de água subterrânea, sistemas de drenagem urbanos e áreas irrigadas, entre outras unidades espaciais, estão interligados como componentes de bacia de drenagem.

Segundo Silveira (1993), a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico (Figura 1) onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados, transpirados e também os infiltrados através do escoamento subterrâneo. O papel hidrológico da bacia hidrográfica é o de transformar uma entrada de volume (precipitação) em uma única saída de água (escoamento).



**Figura 1.** Ilustração de uma bacia hidrográfica.

Dentre as regiões hidrológicas de importância prática destacam-se as bacias hidrográficas ou bacias de drenagem, devido à simplicidade que oferecem na aplicação do balanço de água. A bacia hidrográfica abrange uma área na superfície da Terra, onde todas as ações que envolvem os diversos usos de água ou de líquidos provocam seu escoamento para os rios e córregos existentes no fundo do vale.

Uma determinada paisagem pode conter um certo número de bacias drenando para um reservatório terminal comum, como os oceanos ou mesmo um lago. Bacias de diferentes tamanhos articulam-se a partir dos divisores de drenagem principais e drenam em direção a um canal, tronco ou coletor principal, constituindo um sistema de drenagem hierarquicamente organizado (NETTO, 1998).

Segundo Christofolletti (1999), a bacia de drenagem compreende um conjunto de unidades estruturais, destacando-se as formas de relevo representadas pelas vertentes e as relacionadas diretamente com os canais fluviais. Em qualquer segmento ao longo de um rio, o uso de procedimentos para a ordenação fornece informações relacionadas com a escala de grandeza e a posição no conjunto da rede. Sob esta perspectiva, uma bacia de drenagem de grande tamanho engloba diversos conjuntos de bacias fluviais de escalas menores.

Christofoletti (1999) ressaltou que, em geral, costuma-se considerar como pequenas bacias aquelas com área inferior a 100 km<sup>2</sup>, como médias as situadas na grandeza entre 100 e 1000 km<sup>2</sup> e como grandes, as que possuem área maior que 1000 km<sup>2</sup>.

A medida que aumenta a grandeza espacial da bacia, há a possibilidade de ocorrer variações nas características internas desta, devendo-se levar em consideração a distribuição espacial desses aspectos. Outros aspectos de grande importância são as categorias de uso de solo, que são fatores influentes nas características hidrológicas.

O ciclo hidrológico é normalmente estudado com maior interesse na fase terrestre, onde o elemento fundamental de análise é a bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água precipitada que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório.

De acordo com Prochnow (1985), a bacia hidrográfica é a unidade de estudo funcional que mais favorece ao desenvolvimento de muitos conceitos hidrológicos e a que mais se ajusta aos objetivos do planejamento ambiental.

Moraes et al. (1995) afirmou que o conhecimento do uso atual da terra é um pré-requisito para o planejamento integral de uma bacia hidrográfica. Este, ao ser representado de forma cartográfica, transforma-se em material indispensável para a definição do grau de proteção fornecido ao solo pela cobertura vegetal atual, do grau de degradação da cobertura vegetal original, do uso racional da terra, auxiliando também na definição da aptidão para uso agrícola.

Jonys (1973) afirmou que uso e conservação do solo e da água são as essências do manejo de uma bacia hidrográfica. Solo e água atuam interativamente e qualquer ação que cause efeito adverso num destes elementos afetará o outro. Como exemplo o autor cita que a estabilidade ecológica dos ambientes aquáticos é freqüentemente modificada pela ruptura das seqüências temporais de escoamento superficial com perdas de solo. As perdas de solo ocorridas na natureza tem sido aceleradas e intensificadas pelo uso inadequado do solo, desmatamentos e a urbanização (CARVALHO, 1994).

A precipitação sobre as vertentes infiltra-se totalmente nos solos até haver saturação superficial destes, momento em que começa a decrescer as taxas de infiltração e a surgir crescentes escoamentos superficiais, se a precipitação persistir. O escoamento superficial gerado nas vertentes, no contexto da bacia hidrográfica, pode ser interpretado como

uma “produção” de água para escoamento rápido e, portanto, as vertentes seriam vistas como as fontes produtoras. Seguindo com este enfoque, a água produzida pelas vertentes tem como destino imediato a rede de drenagem, que se encarrega de transportá-la à seção de saída da bacia. Na zona de inundação dos cursos de água (leito maior) há um comportamento ambíguo, ora de produção, quando os rios estão inicialmente com níveis de água baixos, funcionando esta zona como vertente, ora de transporte, quando os rios estão em cheia, com a zona de inundação usada para escoamento (TUCCI, 1998).

Segundo Jenkins et al. (1994), a bacia hidrográfica é a unidade ecossistêmica e morfológica que melhor reflete os impactos das interferências antrópicas, como a urbanização.

Em vista disto, no Brasil, a bacia hidrográfica é referenciada como área de influência a partir da Resolução de n.º 001/86 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), sendo que esta unidade passou a ser considerada como área a ser analisada no estudo prévio de impacto ambiental. Na Legislação do Estado de São Paulo, o Decreto n.º 36.787, de 18 de maio de 1993, que regulamenta a Lei n.º 7.663, discrimina grupos de bacias hidrográficas e esta divisão hidrográfica é aprovada pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CRH (SÃO PAULO, 1994).

## **4.2. Geoprocessamento**

O geoprocessamento atualmente é uma ferramenta indispensável à consecução de projetos relacionados à área de meio ambiente. As vastas áreas normalmente abrangidas por estes projetos, bem como o grande número de variáveis contempladas por esses, fazem do uso do geoprocessamento o principal recurso para o manuseio das grandes bases de dados envolvidos, sejam de natureza espacial ou não (PETERSEN et al. 1995). Mais do que isto, o geoprocessamento permite o tratamento de dados, gerando informações e possibilitando soluções através de modelagem e simulações de cenários (ROCHA & LAMPARELLI, 1998).

Segundo Dainese (2001), o geoprocessamento transfere as informações do mundo real para o sistema computacional. Esta transferência é feita sobre bases cartográficas, através de um sistema de referência adequado. Um sistema de

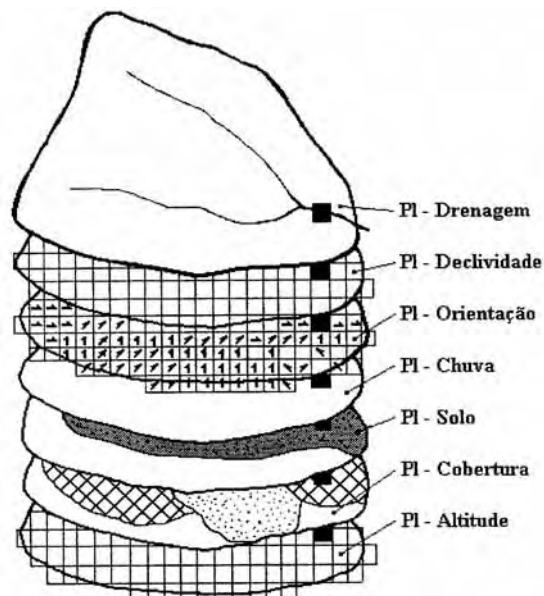
geoprocessamento é, geralmente, destinado ao processamento de dados referenciados geograficamente (georreferenciados), desde a sua aquisição até a geração de saídas na forma de mapas, relatórios ou arquivos digitais.

O objetivo principal do geoprocessamento é fornecer ferramentas computacionais para que sejam determinadas as evoluções espacial e temporal de um fenômeno geográfico e as inter-relações entre diferentes fenômenos (RODRIGUES, 1990 e CÂMARA & MEDEIROS, 1998).

Mendes & Cirilo (2001) definiram conceitualmente o geoprocessamento como uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características e relações importantes, através de dados espacializados.

De uma maneira mais específica pode-se designar que um Sistema de Informações Geográficas (SIG), incluem-se no ambiente tecnológico que se convencionou chamar de geoprocessamento, que é definido como o conjunto de técnicas relacionadas com coleta, armazenamento e tratamento de definições espaciais e georreferenciadas para serem utilizadas em sistemas específicos a cada aplicação, que de alguma forma utiliza-se do espaço físico geográfico (CÂMARA, 1996).

Visando basicamente o projeto e planejamento de um mapeamento, o SIG tem por objetivos adquirir, armazenar, combinar, analisar e recuperar informações codificadas espacialmente, integrando em uma única base de dados informações espaciais provenientes de várias fontes de dados, como: mapas analógicos, fotografias aéreas, imagens de satélite, dados de análise e de campo (CASTRO, 1996 e EASTMAN, 1999). Esta integração de dados pode ser vista na Figura 2:



**Figura 2.** Base de dados gerada pelo SIG.

A tecnologia SIG sistematiza dados georreferenciados que possibilitam planejar e monitorar questões ligadas ao espaço físico geográfico através dos produtos gerados pelo sistema, que são arquivos digitais contendo mapas, gráficos, tabelas e relatórios convencionais (CÂMARA, 1996).

Informações georreferenciadas têm como característica principal a localização, ou seja, estão ligadas a uma posição específica do globo terrestre por meio de suas coordenadas (CÂMARA, 1996).

A informação geográfica apresenta uma natureza dual: um dado geográfico possui uma localização geográfica, expressa com coordenadas em um espaço geográfico e atributos descritivos, que podem ser representados em um banco de dados convencional. De forma intuitiva, pode-se definir o termo espaço geográfico como a coleção de localização na superfície da terra, sobre a qual ocorrem fenômenos geográficos. O espaço geográfico define-se, portanto, em função de suas coordenadas, suas altitudes e sua posição relativa, sendo possível de ser cartografado (CÂMARA, 1996).

Dados geográficos descrevem objetos do mundo real em termos de posicionamento, com relação a um sistema de coordenadas, seus atributos não aparentes e das relações topológicas existentes. Portanto, um SIG pode ser utilizado em estudos relativos ao

meio ambiente e recursos naturais, na pesquisa da previsão de determinados fenômenos ou no apoio a decisões de planejamento, considerando a concepção de que os dados armazenados representam um modelo do mundo real (BURROUGH, 1996, citado por CÂMARA & ORTIZ, 1998).

De acordo com Eastman (1999) e Bonham-Carter (1994), a representação de dados espaciais em um SIG pode ser feita de dois formatos: o vetorial e o raster. No formato vetorial os limites das feições são definidos por uma série de pontos que se agrupam formando linhas ou polígonos. Os pontos possuem coordenadas geográficas (X e Y). Os atributos das feições são armazenados separadamente no programa e a ligação entre ambos pode ser feita através de um número identificador. No formato raster a representação gráfica das feições e atributos é unificada. A área de estudo é dividida em uma malha de células ou pixels que armazenam os atributos da área. A cada célula é dado um valor numérico que pode representar tanto o identificador da feição quanto atributos qualitativos e quantitativos.

Segundo Castro (1996), da manipulação e análise dos dados ocorrem operações que visam o tratamento, gerenciamento, confecção de modelos digitais do terreno, processamento de imagens, geração e confecção de mapas.

Segundo Silva & Righetto (1997), um sistema de informação geográfica é uma ferramenta poderosa que permite a manipulação e operação de dados gráficos e alfanuméricos através de consulta a um banco de dados, associando a cada entidade um identificador de modo a relacioná-lo com suas características não gráficas.

Silva (1998) ressaltou que, quando apoiados em sistemas de informações geográficas, os cenários ambientais ganham grande complexidade e uma enorme aplicabilidade. Análises de redes de drenagem, uso de modelos tridimensionais para visualização do terreno e estimativas de impactos ambientais são alguns exemplos do uso integrado de conhecimentos geomorfológicos em SIGs.

O termo SIG refere-se àqueles sistemas que efetuam tratamento computacional de dados geográficos. Armazenando a geometria e os atributos dos dados georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre e numa projeção cartográfica qualquer. Os dados tratados em geoprocessamento têm como principal característica a diversidade de fontes geradoras e de formatos apresentados (CÂMARA & MEDEIROS, 1998).

Segundo Christofolletti (1999), o SIG foi desenvolvido a partir da dificuldade que alguns pesquisadores encontraram para manipular diferentes tipos de dados em grande escala. A partir desta dificuldade, o SIG foi desenvolvido como um sistema capaz de extrair os dados adequados a partir de banco de dados, tornando-os acessíveis para análise e podendo apresentar os resultados sob a forma de mapas.

Discutindo novas técnicas de avaliação ambiental Crestana, 1994, citado por Ranieri (2000), afirma que é possível observar, modelar, avaliar e simular o comportamento local de variáveis ambientais pela utilização do SIG.

Segundo Silva (2000), os sistemas que compõe os SIGs podem ser divididos em:

- sistemas de entrada de dados: sistema de processamento digital de imagens, digitalização de mapas, sistema de posicionamento global, dados tabulares e dados estatísticos;
- sistemas de armazenamento de dados: banco de dados espacial (mapas digitais) e banco de dados de atributos (alfanuméricos);
- sistemas de análise de dados: sistema de análise geográfica (operações algébricas), sistema de análise estatística e sistema de gerenciamento de banco de dados; e
- sistema de saída de dados: sistema de exibição cartográfica (saída de mapas para a tela, impressora, plotter e arquivos digitais).

De acordo com Campos (2001), com a utilização do SIG é possível a elaboração de projetos de conservação de determinadas áreas. Os SIGs utilizam como bases de dados os mapas de solos, mapas topográficos, fotografias aéreas além de imagens de satélites. Ainda segundo o autor, os SIGs vêm sendo utilizados não apenas para substituir os trabalhos que antes eram realizados manualmente, mas sim devido a sua grande eficiência.

De acordo com Dainese (2001), atualmente existe um grande número de SIGs, diferenciando-se com relação aos tipos de estrutura de dados, modelos de banco de dados, sistemas de análise e outras. Entretanto, a maioria dos SIGs possui alguns módulos em comum:

- sistema de aquisição e conversão dos dados;
- banco de dados espaciais e de atributos;

- sistema de gerenciamento de banco de dados;
- sistema de análise geográfica;
- sistema de processamento de imagens;
- sistema de modelagem digital do terreno (MDT);
- sistema de análises estatísticas; e
- sistema de apresentação cartográfica.

Segundo Ranieri (2000), em trabalhos de planejamento ou previsão de impactos ambientais cujo enfoque é a erosão do solo, percebe-se o crescente uso dos SIGs. Além da rapidez na manipulação dos dados, os SIGs permitem um diagnóstico mais criterioso da situação da área, por tratar as informações de forma espacial. No caso da erosão, a posição geográfica das áreas de maior perda ou acúmulo de terra, principalmente em bacias hidrográficas, é uma informação de suma importância para apoiar decisões de intervenção na área.

Mellerowicz et al., 1994, citados por Ranieri (2000), enfatizam a importância do SIG para o planejamento do solo e da água. Os autores mostram ter havido um aumento da aplicação do SIG para este fim devido a diversos fatores como a melhora da qualidade, facilidade de manipulação dos sistemas, o aumento da disponibilidade de informações básicas para alimentar o sistema e o aumento da demanda por trabalhos de planejamento que exijam eficiência e rapidez. Semelhante opinião é dada por Gomes et al. (1993) que descreveram que a busca de maior agilidade na manipulação de dados propiciou o surgimento dos sistemas computacionais para aplicações gráficas, como os SIGs, que imprimem maior dinâmica, objetividade e rapidez na obtenção dos resultados.

Os SIGs além de melhorar a organização e integração de dados, podem ser utilizados para estudos de variabilidade espacial e temporal bem como na avaliação da rede de drenagem de bacias hidrográficas (PETERSEN et al., 1991).

Em estudo sobre a aplicação de SIG em microbacia hidrográfica, Assad et al. (1998) puderam concluir que, para pequenas áreas, as principais vantagens decorrentes da utilização do SIG são a elevada precisão do produto final e a economia de tempo em relação aos métodos tradicionais de análise. Assim sendo, os planejamentos de

manejo e de conservação de solo e água de uma microbacia hidrográfica, maior ou menor, podem ser executados com precisão e rapidez com a utilização de SIGs.

Uma metodologia completa envolve a caracterização fisiográfica, hidrológica, sócio-econômica e ambiental da área. Normalmente uma metodologia sofre modificações quando aplicada em regiões com características diferentes. A caracterização fisiográfica inclui a elaboração de mapas básicos e temáticos da área e estes podem ser feitos mediante o uso dos SIGs. Diante da difusão e disponibilidade de computadores, torna-se cada vez mais crescente a disponibilização de mapas em formato digital (SCHWAB et al., 1993).

Para Palavecino et al. (2000), o conhecimento do uso e cobertura da terra é um dos primeiros planos de informação que podem ser inseridos em SIG já que respondem as clássicas perguntas: de que, quando e onde se localizam os recursos em uma determinada estrutura político administrativa.

Em seus estudos, Simões (2001), concluiu que o geoprocessamento favorece a percepção holística do meio ambiente, principalmente quando aplicado a bacias hidrográficas.

### **4.3. Geoestatística**

No Brasil, as primeiras publicações sobre geoestatística datam dos anos 80 e, inicialmente, as aplicações eram apenas para questões de geologia mineira, posteriormente estendendo-se para outros campos, e, notadamente, nesses últimos anos, para problemas ligados ao meio ambiente (LANDIM, 1998).

A partir dos estudos em mineração, a geoestatística está sendo aplicada a várias áreas da pesquisa agrônoma, principalmente relacionadas ao estudo da variabilidade espacial dos parâmetros dos solos. Devido à grande heterogeneidade dos solos, o conhecimento da variabilidade espacial de suas diversas propriedades é de fundamental importância. Com esse propósito, diversos trabalhos têm sido realizados para explorar a variabilidade das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (OLIVER, 1999).

Trangmar et al. (1985) afirmaram que a precisão das análises sobre os parâmetros dos solos, em qualquer localização, depende muito do grau de variação dentro da área amostrada, e, a medida que a heterogeneidade dos solos aumenta, a precisão dos

resultados decresce. Cientistas do solo são limitados à observações de superfícies, necessitando de extrapolação das propriedades do solo de locais conhecidos para outros locais, não conhecidos. A precisão de tal extrapolação é fortemente influenciada pela variabilidade dos solos, ambos dentro das unidades de amostragem, e entre localizações. Os autores salientaram que o reconhecimento da variabilidade espacial e uso do solo tem levado ao estudo da heterogeneidade, cercada desde uma escala global até uma micro-escala.

Além de sua importância para o estudo de vários atributos do solo, a geoestatística também apresenta consideração merecida, quando se pensa na movimentação da água no solo, e torna-se necessário considerar fatores relativos à água, e ao solo, que apresentam um comportamento variável no tempo e no espaço, o que exige uma análise estatística adequada para a interpretação de dados. Para esse propósito, pode-se utilizar não somente a análise descritiva geral, como a análise descritiva espacial. A análise geoestatística dos dados servirá para o suporte de decisões, que poderão nortear em técnicas de manejo de uma determinada área (OLIVER, 1999).

Com essa finalidade, diversos trabalhos vêm sendo conduzidos para o estudo da variabilidade espacial de vários atributos relacionados com a água no solo. Outros estudos referentes à dinâmica da água no solo têm utilizado a geoestatística e, mais especificamente, a técnica da krigagem para verificar a dependência espacial entre os vários atributos de água e solo.

A variabilidade espacial do processo de infiltração de água em solos foi abordada por Sisson & Wierenga (1981) através da medição de constantes taxas de infiltração num campo com infiltrômetros de 5cm, 25cm e 127cm de diâmetro interno. As taxas de infiltração foram encontradas lognormalmente distribuídas para todos os tamanhos de anéis e autocorrelacionada para o tamanho de anel de 5cm. Recomendações baseadas nos resultados obtidos pelos autores incluem amostragens em espaço repetidos em tempo para detectar efeitos de tratamento. Para amostragem de campo de algum atributo, as amostras devem ser de localizações amplamente dispersas, enquanto que para amostragem em tempos repetidos, o oposto é verdadeiro.

Sales (1992) estudou a variabilidade espacial da velocidade de infiltração básica de dois solos, sendo um Latossolo Roxo e um Podzólico Vermelho-Amarelo. Para a análise dos dados, utilizou-se a estatística clássica e a geoestatística. As propriedades

que apresentaram uma maior variação foram a condutividade hidráulica saturada e a velocidade de infiltração básica, pois seguiram uma distribuição de frequência lognormal. As propriedades físicas da camada de 60-80cm do Podzólico Vermelho-Amarelo apresentaram uma melhor associação com a velocidade de infiltração básica, sendo verificado pelos maiores coeficientes de correlação, enquanto que para o Latossolo Roxo, isso ocorreu na camada de 0-20cm. Comparando-se os números de amostras necessárias para estimar a velocidade de infiltração básica e condutividade hidráulica saturada pelos dois métodos de análises verificou-se que a geoestatística necessitou de um menor número de amostras.

A geoestatística tem aplicação também em estudos de drenagem de solos. Aboufirassi & Mariño (1983) estudaram o nível do lençol freático do Aquífero Souss no Marrocos para o mapeamento da variabilidade espacial. Com o uso de medidas de elevações do nível de água, os variogramas experimentais foram ajustados com modelos esféricos e gaussianos. A krigagem proporcionou um mapa de contorno de elevação do nível de água esperado ou de tendência. Os modelos de variograma esférico e gaussiano representaram bem onde havia uma alta densidade dos dados, porém diferiram para a área nordeste do Aquífero onde faltavam dados. O mapa produzido pelo modelo esférico foi preferível, pois mostrou um gradiente mais regular do nível de água. De acordo com os resultados apresentados, a krigagem é superior para a análise de superfície de tendência e produziu um bom mapa da estimativa da variância.

Ao estudarem a variabilidade espacial de propriedades de solos, Ciollaro & Romano (1995) estimaram os valores da condutividade hidráulica a partir de dados obtidos em laboratório, com amostras indeformadas das seguintes propriedades dos solos: distribuição do tamanho das partículas, densidade do solo, água retida à 1/3 e 15 atm. Para a condutividade hidráulica, em solos homogêneos encontraram um alcance ao redor de 6m.

Mallants et al. (1996) estudaram a variabilidade espacial de um planossolo (de horizonte B textural com textura franco arenosa) quanto a cinco parâmetros: condutividade hidráulica saturada, retenção de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, difusividade do ar e densidade do solo. Os variogramas obtidos foram específicos para cada camada do solo, pelo modelo esférico, com alcances de 4m a 7m.

#### **4.4. Drenagem superficial**

Segundo Lueder (1959), a finalidade maior da análise da drenagem superficial é fornecer indicações sobre a relação infiltração/deflúvio, capacidade de infiltração, erodibilidade e textura dos materiais presentes em uma área.

O escoamento superficial é impulsionado pela gravidade para as cotas mais baixas, vencendo principalmente o atrito com a superfície do solo. O escoamento superficial manifesta-se inicialmente na forma de pequenos filetes de água que se moldam ao microrrelevo do solo. A erosão de partículas de solo pelos filetes em seus trajetos, aliada à topografia preexistente, molda, por sua vez, uma microrrede de drenagem efêmera que converge para a rede de cursos de água mais estável, formada por arroios e rios. A presença de vegetação na superfície do solo contribui para dificultar o escoamento superficial, favorecendo a infiltração em percurso (TUCCI, 1995).

Horton (1945) interpretou a composição da rede de drenagem quantitativamente, considerando as relações infiltração/deflúvio e os processos de erosão pelas águas correntes, estabelecendo leis fundamentais para o estudo do número e comprimento dos rios às diversas ordens de ramificação da rede hidrográfica. Segundo o autor, a composição da rede de drenagem tem alto grau de significância hidrológica, enquanto que o padrão isolado tem pouco ou nenhum sentido, embora seja um indicador de controle geológico.

De acordo com Ruhe (1960), a bacia de drenagem constitui uma unidade geomórfica fundamental, onde todo o fluxo de água superficial é governado por suas propriedades, e tem propriedades geométricas onde, numa análise de sistemas naturais, os dados hidrológicos, de erosão e de sedimentação podem ser relacionados.

Horton (1945) descreveu o desenvolvimento de sistemas de drenagem pela erosão hídrica e sua dependência com a proporção infiltração/deflúvio que, por sua vez, é determinada pelo declive do terreno, velocidade do deflúvio, capacidade e resistência do solo à erosão. O mesmo foi descrito por Zinke (1960) e Smith et al. (1962).

Segundo Ray (1963), em um dado ambiente climático, a densidade de drenagem está relacionada, principalmente, com a resistência do substrato à erosão, aumentando a densidade a medida que diminui a resistência à erosão. Outros autores

estudaram e interpretaram as relações entre rede de drenagem e resistência à erosão, como: Miller & Miller (1961), Smith & Wischmeier (1962) e Ricci & Petri (1965).

Christofoletti (1969) descreve que alguns fatores naturais podem influenciar no padrão e densidade de drenagem: o clima, a vegetação, a litologia, e o relevo.

Ranzani (1969) explicou que o escoamento das águas superficiais de uma região promove incisões na superfície do terreno sendo que, quando o solo é relativamente impermeável, o deflúvio erode os caminhos d'água, criando um padrão de drenagem denso; por outro lado, quando os solos são relativamente permeáveis, o padrão de drenagem é pouco denso. Para Bridges & Doornkamp (1963), o mesmo ocorre com relação a permeabilidade do estrato rochoso.

Christofoletti (1981), fazendo uma revisão sobre a variabilidade espacial da densidade de drenagem, disse que o conjunto dos canais de escoamento pode ser considerado como resposta ao estímulo fornecido pelas condições ambientais. Se a rede de drenagem está devidamente ajustada, em estado de equilíbrio, então é possível estabelecer correlação entre os valores da densidade de drenagem e as condições ambientais controladoras. O autor cita, ainda, que a densidade de drenagem é regida por variáveis como amplitude altimétrica, relação altimétrica, índice de precipitação efetiva, intensidade de precipitação, capacidade de infiltração, fluxo da base do rio e cheia anual média. Segundo o autor, é de consenso, entre os pesquisadores, que o estudo da relação entre densidade de drenagem e a área da bacia deve ser utilizado na análise da variabilidade espacial interna das bacias, e não como elemento para fazer a comparação entre bacias hidrográficas.

Com o inevitável desmatamento de áreas pela urbanização e para a exploração agrícola, as parcelas das águas de chuva que antes infiltravam, nas áreas não impermeabilizadas, são transferidas para o escoamento superficial direto, sobrecarregando o sistema de macrodrenagem natural (TUCCI, 1995).

No período em que ocorrem precipitações sobre a bacia hidrográfica, a vazão aumenta de instante a instante até atingir um ponto máximo, decrescendo em seguida, de modo mais lento. Este acréscimo na descarga por certo período de tempo denomina-se cheia ou enchente (TUCCI, 1995).

Ainda, segundo Tucci (1995), as enchentes ocorrem por um processo natural do rio que ocupa o seu leito maior, de acordo com eventos extremos chuvosos, em

média com tempo de recorrência superior a dois anos. Esse tipo de enchente ocorre, normalmente em bacias com áreas, em geral, superiores a 1000 km<sup>2</sup> e, em bacias urbanas são provocadas pela falta de restrição quanto à ocupação de áreas de risco de inundação.

A cidade de Botucatu registra enchentes anuais dentro de sua macrodrenagem, como no caso da confluência entre o Córrego da Água Fria com o Ribeirão Tanquinho, nas proximidades da Estação Rodoviária. Alguns eventos ocorridos no passado trouxeram grandes prejuízos e destruições como as enchentes de janeiro de 1957 (CORREIO DE BOTUCATU, 1957) de fevereiro de 1962 (FOLHA DE BOTUCATU, 1962) e outubro de 1991 (A GAZETA DE BOTUCATU, 1991) do Ribeirão Lavapés.

A filosofia preconcebida, de que a boa drenagem seria aquela que permitisse o escoamento rápido das águas precipitadas sobre as bacias, mostrou-se falha, pois tem transferido, sucessivamente, o problema das enchentes para as áreas de jusante e ampliando sua magnitude. No entanto, a melhor drenagem é aquela que drena o escoamento sem produzir impactos nem no local, nem a jusante (TUCCI, 1995).

Christofoletti (1981), descrevendo a variabilidade temporal da rede de drenagem, disse que, do ponto de vista humano, ela é estável, pois a variabilidade que se verifica no decorrer dos aguaceiros, é em escala espacial, de grandeza muito pequena, sendo que as transformações que ocorrem na escala temporal de milhões de anos são responsáveis pela variação da rede de drenagem, só assim assumindo importância para a pesquisa.

#### **4.5. Drenagem interna dos solos**

A água que atinge o solo pode percorrer dois caminhos distintos até chegar aos canais de drenagem ou rios: escoam superficialmente, chegando mais rapidamente à rede de drenagem existente ou infiltram no solo, demorando maior tempo para serem retiradas do sistema (TUCCI, 1995).

Como o solo é um meio poroso, com vários tamanhos de poros, a água que infiltra, ou fica retida ou percola para camadas mais profundas do perfil, sendo que as características e distribuição dos poros têm influência considerável sobre o mecanismo de infiltração-percolação (BAVER, 1966).

Infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. Portanto, é um processo que depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presentes no seu interior. A infiltração e a percolação no interior do solo são comandadas pelas tensões capilares nos poros e pela gravidade (LIBARDI, 1973).

Segundo Parr & Bertrand (1960), a infiltração de líquidos no solo está intimamente relacionada com sua distribuição dos poros e define como infiltração o volume de água que passa pelo solo por unidade de área e por unidade de tempo e, permeabilidade como a propriedade específica de um meio poroso em conduzir ou transmitir fluídos.

A infiltração é um processo que depende, em maior ou menor grau, de diversos fatores, sendo as características dos solos de grande destaque. A textura e a estrutura são características que influenciam expressivamente a movimentação da água no solo, uma vez que determinam a quantidade de macroporos presentes no perfil, que é um fator de extrema importância na condutividade hidráulica. Também interferem expressivamente na infiltração a forma dos poros e a sua continuidade (SALES, 1992).

Solos de textura grosseira (arenosos), possuem maior quantidade de macroporos do que solos de textura fina (argilosos) e, conseqüentemente, apresentam maior condutividade hidráulica e taxa de infiltração. Por outro lado, solos argilosos bem estruturados, ou com estrutura estável, podem apresentar maiores taxas de infiltração do que os solos com estrutura instável, que sofrem dispersão quando umedecidos ou submetidos a algum agente desagregador. A estabilidade dos agregados é determinada pelos chamados agentes cimentantes, que são representados principalmente pela matéria orgânica e pelos óxidos de Fe e Al. Desta forma, à medida que aumenta a presença destes compostos no solo, maior é a possibilidade deste apresentar uma estrutura mais estável (SHAINBERG & LEVY, 1995; SILVA & KATO, 1997).

À medida que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão-se umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há aporte de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade, sendo a superfície, naturalmente, o primeiro nível a saturar. Normalmente, a infiltração decorrente de precipitações naturais não é capaz de saturar todo o solo, restringindo-se a

saturar, quando consegue, apenas as camadas próximas à superfície, conformando um perfil típico onde o teor de umidade decresce com a profundidade (ZIMBACK, 1997).

Quando o aporte de água à superfície cessa, isto é, deixa de haver infiltração, a umidade no interior do solo se redistribui, evoluindo para um perfil de umidade inversa, com menores teores de umidade próxima à superfície e maiores nas camadas mais profundas (ZIMBACK, 1997).

A movimentação da água no solo é importante para se compreender os processos de infiltração e retenção de água e, segundo Libardi (1973), um dos principais parâmetros a ser avaliado para esse fim é a condutividade hidráulica ou infiltração básica.

Libardi & Reichardt (1973) estudaram as curvas de retenção de água e condutividade hidráulica de cinco solos do Estado de São Paulo, podendo-se observar pelos resultados que existe uma relação inversa entre retenção de umidade de um solo e sua condutividade hidráulica, isto é, o solo que apresentou menor retenção de umidade foi o que apresentou maior condutividade hidráulica.

Alguns autores propõem modelos matemáticos para determinação da infiltração a partir de outras características físicas do solo, como: conteúdo de umidade inicial do solo (LIBARDI et al., 1980; SISSON et al., 1980; RAWLS et al., 1991; WILLIAMS & AHUJA, 1993; MEHTA et al., 1994 e ZHANG & GENUCHTEN, 1994), macroporosidade (NACHABE, 1995), porosidade efetiva (HELALIA, 1993), volume global do solo e teor de argila (BRUAND et al., 1994), e das características presentes em mapas genético-litológicos (SCHMIDT et al., 1992).

A condutividade hidráulica de um solo saturado é o principal parâmetro para se determinar a capacidade de drenagem de um solo. Segundo Elrick & Reynolds (1992), esta propriedade também é útil para caracterizar os meios porosos quanto a resistência à passagem de água e a permeabilidade dos dutos ou poros.

Embora a condutividade hidráulica seja essencial para a determinação qualitativa e quantitativa do movimento de água no solo, esta determinação envolve uma série de dificuldades experimentais, devido principalmente à sua alta dependência do teor de água no solo (JABRO, 1996), da variabilidade espacial das propriedades do solo, em condições de campo (WILSON et al., 1989 e ASARE et al., 1993), a textura e estruturação do solo (JABRO

& FRITTON, 1990, SALVERDA & DANE, 1993 e REYNOLDS & ZEBCHUCK, 1996) e ao manejo das propriedades hidráulicas dos solos (WU et al., 1992).

No campo existem situações em que o nível freático está bastante distante da superfície do solo, sendo que nesses casos a determinação da condutividade hidráulica saturada requer processos diferentes dos usuais, com a desvantagem de serem muito trabalhosos e demandarem grandes quantidades de água e grande tempo para obtenção de dados (REYNOLDS & ELRICK, 1985).

Reynolds & Elrick (1983) propuseram um método de determinação da condutividade hidráulica mais prático e rápido, denominado “Permeâmetro de Guelph”. Este permeâmetro é usado para a determinação da condutividade hidráulica saturada ( $K_f$ ), em solos não saturados, considerando-se a tridimensionalidade da infiltração em um poço, em condições de campo.

#### **4.6. Permeâmetro de Guelph**

Segundo Pizarro (1978), a Lei de Darcy de 1856 é a base fundamental para descrever o fluxo de água através de um solo, sob o enfoque macroscópico. A equação ajustada mostra que a condutividade hidráulica ( $K_0$ ) é o coeficiente de proporcionalidade da equação:

$$q = K_0 \Delta H/L$$

sendo:  $\Delta H$  = variação de carga hidráulica e  $L$  = espessura da coluna de solo.

A condutividade hidráulica ( $K_0$ ) de um solo saturado é o principal parâmetro para determinar a sua capacidade de drenagem. Sendo assim, sua determinação é de muita importância para o dimensionamento dos sistemas de drenagem (BERNARDO, 1989). Esta propriedade também serve para caracterizar os meios porosos: permeáveis ou condutivos (baixa resistência à passagem de água) e pouco permeáveis (alta resistência), quando seus valores resultam altos ou muito baixos, respectivamente (FERREIRA, 1990).

Segundo Klute (1965), a condutividade hidráulica fornece também informações indiretas da estrutura e da estabilidade estrutural do solo. A condutividade

hidráulica é considerada como sendo a propriedade mais importante do solo, relacionada à sua drenagem.

A condutividade hidráulica de um solo é um parâmetro essencial para a determinação qualitativa do movimento de água no solo. Devido a isto, sua determinação é essencial no cálculo de fluxos de água, e envolve uma série de dificuldades experimentais, devido principalmente à sua alta dependência do teor de água no solo e da variabilidade das propriedades do solo como material poroso, em condições de campo. Existem situações no campo em que o nível freático, após um rebaixamento, está bastante afastado (profundo) da superfície do solo. Nestes casos a determinação da condutividade hidráulica saturada requer processos diferentes dos usados atualmente. Existem vários métodos para esta determinação, como o método do “poço seco” (Auger Hole invertido), método dos anéis concêntricos, etc. Esses métodos têm a desvantagem de serem muito trabalhosos e demandam de um grande tempo para se obter os dados (VIEIRA, et al., 1988).

A condutividade hidráulica de um solo, sob um determinado conteúdo de água, é o valor do quociente entre fluxo de água neste solo e o respectivo gradiente hidráulico.

Existem vários métodos para o cálculo da condutividade hidráulica, sendo métodos de laboratório e métodos de campo. Os métodos de campo apresentam as seguintes vantagens em relação aos métodos de laboratório:

- volume de solo amostrado é maior;
- estrutura do solo não é alterada, desde que se tomem os devidos cuidados;
- condutividade hidráulica é determinada segundo a direção predominante do escoamento.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1. Caracterização da área de estudo**

#### **5.1.1. Situação geográfica**

A área estudada envolve toda a bacia do Ribeirão Lavapés, onde a principal nascente deste curso d' água está localizada praticamente dentro da zona urbana do município de Botucatu, na área do Parque Municipal Zoobotânico (Figura 4) e recebe vários afluentes como os córregos da Água Fria, Cascata, Tanquinho, Antártica, Boa Vista e Tenente até a foz da bacia no ponto de encontro de suas águas com a Represa de Barra Bonita, Rio Tietê (Figura 5).

A bacia do Ribeirão Lavapés drena uma área de 10.704 ha, sendo que o Ribeirão Lavapés, seu principal curso d' água, percorre um longo trecho de 40 km até a desembocadura na Represa de Barra Bonita, Rio Tietê, sendo seu afluente esquerdo e por sua vez integrando a bacia hidrográfica do Rio Paraná.

O Estado de São Paulo está dividido em 11 grandes Grupos de Bacias Hidrográficas. O município de Botucatu está enquadrado no quinto grupo, ou seja, na Bacia do Sorocaba/Médio Tietê, visto que a sede do município está localizada na área da referida bacia. A divisão dos grupos de bacias hidrográficas do Estado de São Paulo foi feita conforme a divisão hidrográfica aprovada pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CRH em 25/11/1993 e regulamentada no decreto n.º 38.455 de 21/03/1994 (SÃO PAULO, 1994).

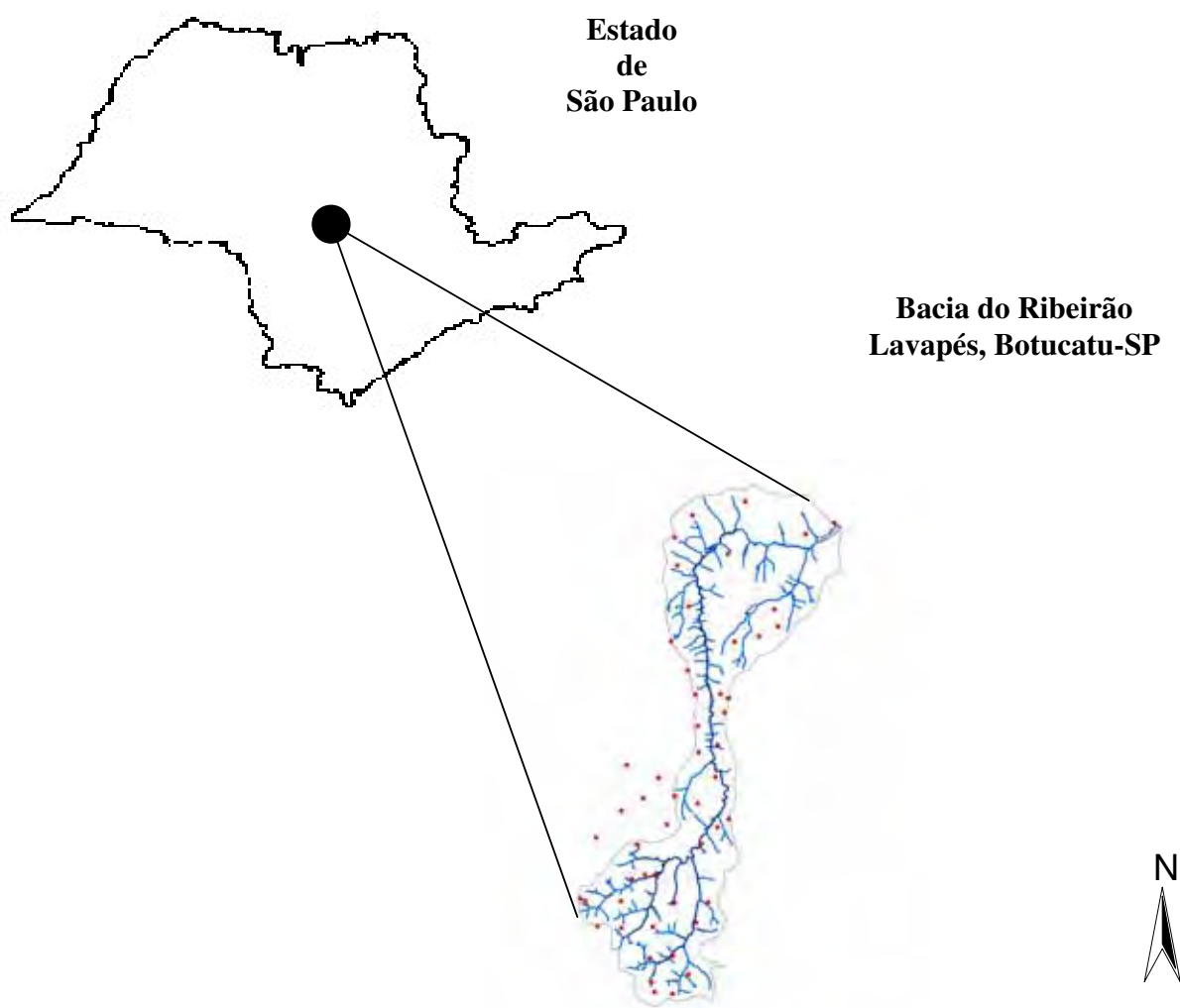


**Figura 4.** Vista da nascente principal do Ribeirão Lavapés.



**Figura 5.** Área da foz do Ribeirão Lavapés na Represa de Barra Bonita, Rio Tietê.

A bacia Ribeirão Lavapés está geograficamente localizada entre as coordenadas 22°43'12" de latitude Sul e 48°29'43" de longitude Oeste de Greenwich, com altitudes variando entre 924 e 455 metros (Figura 6) (IBGE, 1982).



**Figura 6.** Localização da área de estudo indicando os pontos de amostragem (sem escala).

Considerando-se a desembocadura da parte inicial da bacia na altura da Fazenda Experimental Lageado - UNESP, Leopoldo (1989), ao caracterizar a bacia, encontrou uma densidade de drenagem de 1,36 km/km<sup>2</sup>, declividade média de 11% e declividade total do

curso principal de 1,05%. Essas características impõem à bacia um escoamento das águas de chuva bastante rígido, com maior escoamento superficial que infiltração.

A descarga média da bacia junto à saída na Fazenda Lageado é de 0,6 m<sup>3</sup>/s, com produção diária calculada em 51.840 m<sup>3</sup>. Desse total, estima-se que cerca de 30.000 m<sup>3</sup> são oriundos do Rio Pardo, pertencente à bacia do Rio Paranapanema, bombeados para a cidade de Botucatu, para fins de abastecimento (LEOPOLDO, 1989).

Grande parte do município de Botucatu, bem como parte da área da bacia do Ribeirão Lavapés, encontram-se protegidos pela Área de Proteção Ambiental (A.P.A.) perímetro de Botucatu, criada pelo Decreto Estadual n.º 20.960 de 8 de junho de 1983. O objetivo da A.P.A. é proteger os recursos naturais de áreas compreendidas nas três regiões fisiográficas existentes: Depressão Periférica, Frente e Reverso da Cuesta de Botucatu (SOUZA et al., 1985).

### **5.1.2. Clima**

Com relação ao clima, a região pode ser enquadrada como sendo clima mesotérmico, com estação mais seca no inverno e identificada como Cwa, segundo a classificação de Köppen, com temperaturas médias anuais em torno de 20°C e o índice pluviométrico entre 1.100 e 1.700 mm anuais (Carvalho & Jim, 1983), podendo, segundo Leopoldo et al. (1998), atingir valores superiores a 1.800 mm anuais, ocorrendo uma precipitação média no mês mais chuvoso e mais seco, respectivamente, de 223,4 mm e 37,8 mm.

### **5.1.3. Vegetação**

A vegetação do município é definida como Floresta Estacional Semidecidual, ecossistema pertencente ao bioma Mata Atlântica, caracterizado pela dupla estacionalidade climática, apresentando verões quentes e úmidos seguidos de invernos secos e frios, o que acarreta na queda foliar de aproximadamente 50% das árvores do estrato superior (EMBRAPA, 1988).

Segundo Brasil (1960), a vegetação natural local possui interface com o início do Cerrado. Para Embrapa (1988), estas formações florestais são classificadas como Cerrado Tropical Subcaducifólio, sendo que presentemente só existem vestígios ocorrendo na forma de pequenos maciços nas encostas íngremes de morros ou em galerias margeando alguns cursos d'água.

De acordo com Gabriel (1990), a vegetação nativa natural é representada por diversas espécies da Mata Atlântica, como *Cedrella fissilis* (Cedro rosa), *Guarea guidonia* (Marinheiro), *Chorisia speciosa* (Paineira), *Nectandra megapotamica* (Canelinha), *Ocotea odorífera* (Canela-sassafrás) e *Gallesia integrifolia* (Pau-d'alho), sendo as famílias Meliaceae, Bombacaceae, Lauraceae e Phytolacaceae as mais abundantes.

Atualmente, as áreas anteriormente de vegetação nativa estão ocupadas por culturas, como: pastagens, reflorestamento, café, milho, cana-de-açúcar, e citrus.

#### **5.1.4. Geologia**

Do ponto de vista geológico, o município de Botucatu situa-se na borda noroeste da Bacia Sedimentar do Paraná, unidade geotectônica estabelecida sobre a Plataforma Sul-Americana. Dentre as principais unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná, aflorantes no município, destacam-se, segundo sua distribuição: a) Formação Pirambóia; b) Formação Botucatu; c) Formação Serra Geral e d) Formação Marília, além de depósitos neoceno-zóicos (IPT, 1981).

A Formação Pirambóia está exposta ao longo de toda a faixa de ocorrência dos sedimentos mesozóicos da Depressão Periférica. Litologicamente a formação caracteriza-se por uma sucessão de camadas arenosas mais comumente vermelhas, que alcançam, em superfície, maior espessura de 270 metros, medida na região de Anhembi, SP. Em subsuperfície atinge cerca de 350 metros (IPT, 1981).

Os arenitos são geralmente de granulação média a fina, possuindo fração argilosa maior na parte inferior que na superior da formação. Predomina a estratificação plano-paralela, destacada pela alternância de lâminas mais ou menos ricas em argila e silte. Não são raras as marcas de ondas ou corrente, representando por suas características litológicas e estruturais, depósitos de ambientes úmidos, oxidantes, fluviais em canais

meandranes e planícies de inundação, com pequenas lagoas esparsas (PETRI & FÚLFARO, 1983).

A Formação Botucatu, em São Paulo, está exposta numa faixa contínua, às fraldas das serras basálticas e em suas escarpas. Constitui-se quase inteiramente de arenitos de granulação fina a média, uniforme, com boa seleção de grãos foscos com alta esfericidade e de grande homogeneidade, havendo pouco material fino (matriz) entre os mesmos. Isto confere a este arenito alta porosidade e alta permeabilidade. São avermelhados e exibem estratificação cruzada tangencial de médio a grande porte, característica de dunas caminhanes em ambiente desértico de aridez crescente. Os ventos que moviam as dunas do deserto de Botucatu em São Paulo sopravam principalmente de N a NNE (PETRI & FÚLFARO, 1983).

Formado no Triássico Superior a Jurássico Inferior (190 milhões de anos atrás), este arenito apresenta espessura média de cerca de 100 metros, havendo locais onde chega a 200 metros. O arenito Botucatu está exposto à superfície nas regiões marginais da Bacia Sedimentar do Paraná. À medida que caminhamos para as partes centrais desta Bacia, isto é, para o interior dos estados do sul, este arenito vai ficando cada vez mais profundo, sendo recoberto por espessas camadas de rochas vulcânicas basálticas, e outras camadas de arenitos mais recentes (PETRI & FÚLFARO, 1983).

Os arenitos da Formação Botucatu e os basaltos da Formação Serra Geral sustentam a chamada Cuesta de Botucatu. A Formação Serra Geral, Grupo São Bento, é predominantemente composta por rochas vulcânicas sob a forma de derrames basálticos (PETRI & FÚLFARO, 1983).

Os derrames afloram, no Estado de São Paulo, na parte superior das escarpas das cuestas basálticas e em morros testemunhos isolados pela erosão. A formação também pode aflorar nos planaltos que bordeiam as cuestas e em locais onde os cursos d'água desgastaram as formações areníticas superiores (IPT, 1981).

A formação é composta por rochas de cor cinza escura a negra, afaníticas, microcristalinas, aparecendo vesículas e amígdalas preenchidas por calcedônia, quartzo, calcita, zeólitas e nontronita. Petrograficamente os basaltos apresentam composição mineralógica muito simples, essencialmente constituídos de labradorita zonada associada a

augita e às vezes também pigeonita. Acessoriamente apresentam magnetita, apatita, quartzo e raramente olivina (IPT,1981).

As rochas basálticas da Formação Serra Geral, no caso presente, mostram contato direto com o grupo Bauru, Formação Marília. A Formação Marília, segundo IPT (1981) apresenta-se como composta por arenitos de grosseiros a conglomeráticos, com grãos angulosos, teor de matriz variável, seleção pobre, ricos em feldspatos, minerais pesados e minerais instáveis. Ocorrem em bancos maciços de aproximadamente 180 m de espessura, raramente apresentando estratificação cruzada de médio porte, com seixos concentrados nos estratos, algumas camadas de lamitos vermelhos e calcários. São característicos da unidade nódulosa carbonáticos, que aparecem dispersos nos sedimentos e cimento carbonático.

#### **5.1.5. Relevo**

As feições geomorfológicas regionais estão associadas, na maior parte das vezes, com o embasamento rochoso local. O município está inserido nas seguintes províncias geomorfológicas (IPT, 1981): Depressão do Médio Tietê Superior, Cuesta Basáltica e Planalto de Botucatu/Itatinga. A bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés drena as três províncias.

O Planalto Ocidental Paulista é descrito como um planalto extremamente festonado e variado, com relevo uniforme, extensos espigões de perfis convexos e cimos ondulados, com terminações laterais lobadas, constituindo baixas e amplas colinas que avançam em direção aos vales dos principais rios, só raramente interrompidos pelo afloramento de camadas mais resistentes ao intemperismo, como é caso da Formação Marília. Nesse caso, o relevo termina freqüentemente em escarpas abruptas, torna-se acidentado, apresentando vertentes de perfis côncavos e desníveis de até 100 m, embora os cursos dos rios apresentem pequena declividade no seu leito. Nos locais onde os cursos d'água escavam o seu vale, descobrindo a Formação Serra Geral, o relevo é mais acidentado, convexo e os leitos dos rios mais declivosos, tornando-se as águas rápidas, sendo comum o aparecimento de saltos e cachoeiras (ALMEIDA, 1964).

### **5.1.6. Solos**

De acordo com Piroli (2002), e segundo normas da Embrapa (1999), a área é composta pelos solos: Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Vermelho Distroférrico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Neossolo Lítico Distrófico, Gleissolo Distrófico, Neossolo Flúvico Distrófico e Neossolo Quartzarênico.

A porção da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés localizada no Planalto de Botucatu/Itatinga apresenta solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico e Distroférrico, profundo, bem drenado, de coloração vermelho-amarelo e vermelho escuro, formado a partir de arenitos e basaltos (CARVALHO,1981).

Associados aos sedimentos arenosos da Formação Pirambóia na Depressão do Médio Tietê Superior, encontram-se os Neossolos Líticos e Argissolos Vermelho-Amarelo. Estes solos caracterizam-se por serem rasos a moderadamente profundos, arenosos, de baixa fertilidade e suscetibilidade à erosão forte a muito forte. Nesta província geomorfológica, os solos mais argilosos e profundos desenvolvem-se sobre corpos intrusivos (sills e diques), basálticos. Encontram-se ainda, os Neossolos Quartzarênicos, arenosos e de baixa fertilidade, com forte suscetibilidade a erosão.

## **5.2. Material**

### **5.2.1. Material Cartográfico**

Foram utilizadas para a vetorização das curvas de nível, da rede de drenagem e do limite da bacia, partes das cartas planialtimétricas do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo, em escala 1:10.000, com equidistância entre curvas de nível de 5m, editadas em 1978 pelo Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC, 1978). O Quadro 1, a seguir, mostra as cartas que foram utilizadas.

**Quadro 1.** Relação de cartas planialtimétricas na escala de 1:10.000/IGC utilizadas para o estudo da área.

<b>Codificação Internacional</b>	<b>Nome da folha</b>
• SF-22-Z-B-VI-3-SO-D	Fazenda Segrede
• SF-22-Z-B-VI-3-SO-C	Aeroporto de Botucatu
• SF-22-Z-B-VI-3-SO-B	Botucatu IV
• SF-22-Z-B-VI-3-SO-A	Botucatu III
• SF-22-Z-B-VI-3-NO-E	Botucatu I
• SF-22-Z-B-VI-3-NO-F	Botucatu II
• SF-22-Z-B-VI-3-NO-C	Fazenda Agulha
• SF-22-Z-B-VI-3-NO-D	Fazenda Lageado
• SF-22-Z-B-VI-3-NO-A	Fazenda Araguá
• SF-22-Z-B-VI-3-NO-B	Vitoriana
• SF-22-Z-B-VI-1-SO-E	Fazenda Morro Azul
• SF-22-Z-B-VI-1-SO-F	Fazenda Aurora

### **5.2.3. Fotografias aéreas**

Foram utilizadas fotografias aéreas na escala nominal aproximada de 1:30.000 do vôo realizado pela Base Aerofotogrametria S/A em 2000.

### **5.2.4. Equipamentos**

Neste trabalho todos os procedimentos envolvidos para a entrada, manipulação e armazenamento dos dados foram realizados através dos seguintes equipamentos: Computador Pentium 4, 1,6 Ghz, 512 MB de memória RAM, disco rígido de 20.0 GB, monitor SVGA 17”, impressora HP Deskjet 5650, scanner HP Scanjet 2300 c e um GPS de navegação Garmin Emap.

### **5.2.5. Programas utilizados**

Foram utilizados os seguintes programas computacionais: Autodesk Map 5 (Autodesk, 2002), MapSource com interface com o GPS, ArcGIS 8.2 (Environmental Systems Research Institute, 1996), GS+ (GS+ 2000) e ONEHEAD (Vieira, 1998).

## **5.3. Métodos**

### **5.3.1. Método de coleta dos solos**

A retirada de amostras foi realizada com um trado do tipo Holandês, individualmente em cada ponto, em duas profundidades: de 0-20cm e 20-40cm. Também foram retiradas amostras indeformadas com a utilização de anéis volumétricos de 3cm de altura para as análises físicas de densidade do solo.

No total foram coletados 56 pontos, somando 112 amostras de solo, identificadas com suas respectivas posições geográficas pelo sistema GPS. Os pontos de coleta foram determinados de acordo com a topossequência, a fim de se ter amostras representativas de toda área da bacia.

### **5.3.2. Análises químicas dos solos**

As análises químicas dos solos foram realizadas de acordos com os métodos descritos por Raij et al. (1987), sendo determinado os valores de pH e os teores de Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Potássio (K), Alumínio (Al), Hidrogênio (H), Matéria Orgânica (MO) e Fósforo (P) presentes no solo.

Os valores de Capacidade de troca de cátions (CTC), Soma de bases (SB) e Índice de saturação por bases (V%) foram calculados, como se segue:

$$CTC = Ca + Mg + K + H + Al$$

$$SB = Ca + Mg + K$$

$$V\% = (SB / CTC \times 100).$$

### **5.3.2. Análises físico-hídricas dos solos**

#### **5.3.2.1. Análise granulométrica (%)**

A análise granulométrica baseia-se no cálculo das porcentagens de areia total, silte e argila presentes no solo. O método utilizado foi o do Densímetro de Bouyoucos, onde a argila é determinada pela leitura no densímetro, a areia por tamizamento e o silte pela diferença, complementando-se o percentual para 100% (EMBRAPA, 1997).

#### **5.3.2.2. Densidade do solo (g/cm<sup>3</sup>)**

Foi determinada através do método do Anel Volumétrico (EMBRAPA, 1997). As amostras foram coletadas com estrutura indeformadas através de um anel de aço de bordas cortantes e volume interno de 50 cm<sup>3</sup> e transferidas para latas de alumínio de peso conhecido. As amostras permaneceram em estufa a 105°C até peso constante. A densidade do solo foi determinada pela seguinte relação:

$$Densidade = \frac{Peso\ da\ Amostra\ Seca\ a\ 105^\circ\ C}{Volume}$$

### 5.3.2.3. Densidade de partículas (g/cm<sup>3</sup>)

Foi determinada através do método do volume de álcool etílico para completar a capacidade de um balão volumétrico (EMBRAPA, 1997). As amostras (20g de solos), foram colocadas em latas de alumínio de peso conhecido e permaneceram em estufa a 105°C. As amostras foram transferidas para balões volumétricos aferidos de 50ml, onde adicionou-se o álcool etílico, agitando-se bem para eliminar as bolhas de ar. A densidade de partícula foi determinada pela seguinte relação:

$$\text{Densidade} = \frac{\text{Peso da Amostra Seca a } 105^{\circ} \text{ C}}{50 - \text{Volume de Álcool Gasto}}$$

### 5.3.2.4. Porosidade total do solo (%)

Foi determinada através do método indireto (EMBRAPA, 1997), como a seguir:

$$P = \frac{D_p - D_s}{D_p} \times 100$$

onde

P = porosidade, em %;

D<sub>p</sub> = densidade de partículas, em g/cm<sup>3</sup>;

D<sub>s</sub> = densidade do solo, em g/cm<sup>3</sup>.

### 5.3.2.5. Condutividade hidráulica (mm/h)

A determinação da condutividade hidráulica no campo (K<sub>f</sub>s) foi efetuada com o uso do permeâmetro de Guelph, que é um método baseado na hipótese do estado fixo com infiltração constante tridimensional, em buraco cilíndrico, num solo insaturado (REYNOLDS & ELRICK, 1985).

O permeâmetro de Guelph funciona pelo princípio de Mariotte, fornecendo água sob carga constante a orifício feito no solo e mede a condutividade hidráulica saturada no campo e a infiltração tridimensional (permeabilidade do perfil).

Segundo Elrick et al. (1989) a condutividade hidráulica é calculada no método do permeâmetro de Guelph pela equação:

$$Q = \left( \frac{2\pi\alpha H^2}{C} + \pi\alpha a^2 \right) K_{fs} + \left( \frac{2\pi\alpha H}{C} \right) \phi_m$$

onde: **Q** é o fluxo constante, **H** é a carga hidráulica, **C** é um fator que considera a geometria das medições, determinado graficamente, de acordo com a textura do solo, e **a** é o raio do orifício.

Acima ocorre a situação conhecida como uma equação e duas incógnitas. Existem duas possibilidades de solução do sistema acima. A primeira envolve medições independentes da condutividade hidráulica (**K<sub>fs</sub>**) e potencial matricial (**φ<sub>m</sub>**) e, portanto a utilização de outros métodos. A segunda alternativa, segundo proposta por Elrick et al. (1989), envolve a escolha de valores fixos para a relação:

$$\alpha^* = \frac{K_{fs}}{\phi_m}$$

As categorias de meios porosos estão expostas no Quadro 2.

Esta alternativa seria constante dentro de alguns limites, e classificada para diferentes texturas. Apesar de ser bastante prática esta opção representa uma aproximação, uma vez que se estará fixando um valor que, na realidade pode variar de um local para outro, segundo relatado em Vieira et al. (1988).

**Quadro 2.** Categorias de meios porosos para estimativa de  $\alpha^*$  (Elrick et al. 1989)

<b>Categoria de meios porosos</b>	<b>Valor de <math>\alpha^*</math> (m<sup>-1</sup>)</b>
Materiais argilosos sem estrutura (cobertura de mineração, depósitos marinhos ou lacustres).	1
Solos de textura fina e sem estrutura.	4
Solos estruturados de argila a franco. Também inclui areias finas e outros meios sem estrutura.	12
Areia grossa e muito grossa. Também inclui solos altamente estruturados com rachaduras e macroporos.	36

O valor de **C** pode ser calculado usando equações ajustadas aos gráficos originais, na forma:

$$C=A\left(\frac{H}{a}\right)^B$$

onde: A e B são os parâmetros de ajuste segundo o Quadro 3.

**Quadro 3.** Parâmetros de ajuste A e B, para o cálculo do fator C.

<b>Textura do Solo</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
1	0.59822327899	0.647467571
2	0.5939456566	0.6365011232
3	0.5697527087	0.6237229652

Com os dados das medições com o permeâmetro, pode-se também calcular a infiltração saturada tridimensional, usando-se a taxa constante e a geometria do orifício pela relação entre o volume de água infiltrada (litros) e a área molhada do orifício (m<sup>2</sup>). O volume de água infiltrada (litros) é calculado por:

$$V = \frac{\pi D_p^2}{4} Q 10^{-3}$$

onde:  $D_p^2$  é o diâmetro do reservatório do permeâmetro (cm), e Q é a taxa constante (cm/min) encontrada.

A área ( $m^2$ ) molhada no orifício é calculada por:

$$A = \left( \frac{\pi D_o^2}{4} + \pi D_o H_2 \right) 10^{-4}$$

onde:  $D_o$  é o diâmetro do orifício (cm) e  $H_2$  é a carga hidráulica (cm) usada.

Dividindo V por A e efetuando todos os cancelamentos possíveis fica:

$$I = 60 \left( \frac{D_p^2}{D_o^2 + 4D_o H_2} \right) Q$$

onde: I é a infiltração (mm/h), e Q é a taxa constante (mm/min).

### 5.3.3. Análises Estatísticas

Com os resultados das análises, os dados foram organizados numericamente a fim de serem facilmente manuseados. Desta forma foram distribuídos em classes, de modo agrupado, com distribuições de frequência (LANDIM, 1998).

A distribuição de frequência foi efetuada utilizando-se o programa geoestatístico GS+ (GS+, 2000), onde, a partir dos dados foram obtidas as medidas de posição e de dispersão, segundo o descrito por Gomes (1976) e Guerra (1988).

Na verificação do tipo de distribuição que os dados seguem, foi utilizado para testar a normalidade da distribuição dos dados, o teste Y, proposto por D'Agostinho, 1971, e descrito por Parkin & Robinson (1992). Os cálculos foram efetuados na planilha Excel.

### 5.3.4. Análises Geoestatísticas

A análise espacial dos dados foi executada por intermédio do programa GS+ (GS+, 2000), que utilizou os valores das variáveis estudadas associadas as suas respectivas coordenadas de campo.

Os dados foram pareados em todas as combinações possíveis e agrupados dentro de classes (Lags) de distâncias e direções aproximadamente iguais. Esse processo foi efetuado dentro do módulo “Análise do semivariograma”, onde foram construídos os semivariogramas experimentais (DEUTSCH & JOURNAL, 1998), sendo verificados as possibilidades das variáveis estudadas possuírem a propriedade de anisotropia que é a não homogeneidade das distribuições das variâncias em ângulos diferentes no espaço (ENGLUND & SPARKS, 1988).

Automaticamente, modelos teóricos de semivariogramas foram superpostos à seqüência de pontos obtidos no variograma experimental, de modo que a curva que melhor se ajustou aos pontos obtidos representa a magnitude, alcance e intensidade da variabilidade espacial da variável estudada. A confirmação do modelo que forneceu o melhor ajuste foi efetuada pelo modelo que apresentou o menor erro.

Na análise estrutural do semivariograma, além do efeito pepita ( $C_0$ ), do patamar ( $C + C_0$ ) e do alcance ( $A$ ), outros parâmetros foram fornecidos para posterior análise:

- Alcance – representa a distância até onde o parâmetro possui dependência espacial. (GUERRA, 1988);
- Estrutura ou Proporção Espacial  $C/(C+C_0)$  – que determina quanto da variância espacial esta presente na variância total da amostra;
- Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) – que determina o ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental. Quanto menor o valor de SQR, melhor o ajuste (ZIMMERMAN & ZIMMERMAN, 1991);
- Coeficiente de Determinação ( $r^2$ ) – que indica quantos dos pontos do semivariograma experimental encontram-se na curva do modelo teórico, embora não seja considerado um bom indicativo de ajuste (GS+, 2000).

A análise da variabilidade espacial pode ser estudada pela detecção do índice de dependência espacial proposto por Cambardella et al. (1994), ou pelo proposto por GS+ (2000). Zimback (2001) propõem um índice de <25% para fraca dependência espacial; de 25 a 75% para moderada e >75% para forte dependência espacial os quais foram empregados para a classificação da dependência espacial.

#### **5.3.4.1. Interpolação dos dados – Krigagem**

A interpolação dos dados foi efetuada pelo módulo Interpolação – Krigagem do programa GS+ (GS+, 2000).

A maneira como foram realizadas as coletas de amostras e a sua representatividade determinam como deve ser calculada a Krigagem Ordinária. A Krigagem Pontual é indicada quando a coleta é de amostras simples. No presente estudo as amostras coletadas foram simples, e, portanto, a Krigagem indicada foi a pontual. Os cálculos para a confecção dos mapas com os parâmetros da krigagem seguiram o protocolo descrito por Burgess & Webster (1980).

#### **5.3.5. Sistema de Informação Geográfica**

Para a visualização da bacia do Ribeirão Lavapés de forma digital, as cartas planialtimétricas do IGC (1978) na escala de 1:10.000 foram digitalizadas, no Autodesk Map 5 (Autodesk 2002), sendo criados os arquivos vetorizados das curvas topográficas, redes de drenagem e limite da bacia. Ainda neste programa a imagem digital recebeu um tratamento prévio de georreferenciamento que permitiu alinhar e juntar todas as partes das cartas digitalizadas gerando-se um único arquivo de toda a bacia já em escala.

As cartas planialtimétricas do IGC (1978) utilizadas no estudo, possuem uma equidistância vertical das curvas de nível de 5 metros, não permitindo uma visualização contínua das altitudes da área de estudo. Devido a este fator, é necessário a geração de uma superfície com valores que variam continuamente no espaço, cujo valor em um determinado ponto depende dos valores vizinhos (EASTMAN, 1999). Esta superfície é

conhecida como Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDT). O MDT é utilizado para modelagem de informações de altimetria ou propriedades do solo.

A determinação dos valores entre as curvas de nível é possível através da interpolação dos dados. A modelagem Triangulated Irregular Network (TIN) é a estrutura mais comum utilizada para modelagem de superfícies contínuas usando dados vetoriais. Através da triangulação, os valores das altitudes foram utilizados como vértices na geração de triângulos, resultando na triangulação da área da bacia hidrográfica. Finalmente, foi gerado um modelo raster da superfície onde os topos de morros e depressões foram modeladas de acordo com as tendências dos dados mais próximos.

Na geração e aplicação do MDT, a resolução espacial do arquivo raster gerado é um aspecto muito importante. Resoluções espaciais entre 5 e 50 metros são as mais indicadas para a modelagem geomorfológica da bacia. Na geração do MDT da bacia do Ribeirão Lavapés utilizou-se uma resolução espacial de 10 metros. No programa Arc GIS 8.2, através da extensão 3D Analyst, foi gerado o MDT referente a altimetria utilizando-se o comando Create Tin From Features. Com o MDT criado o SIG permite a visualização e classificação com o uso de palhetas de cores de toda a situação altimétrica da bacia que após ser transformado em raster recebeu a rede de drenagem compondo um mapa geomorfológico da bacia.

A definição do uso do solo da bacia foi realizada através da digitalização das diferentes áreas encontradas, utilizando-se das fotografias aéreas na escala aproximada de 1:30.000 que após serem ortorretificadas foram inseridas no SIG recobrimdo o modelo. Esta digitalização gerou os polígonos dos diferentes usos encontrados, onde através da extensão X Tool Pro, no Arc GIS 8.2, foram calculadas as áreas desses usos. Com a digitalização do uso de maciços florestais, foi possível confrontar a atual situação em que se encontram as áreas de preservação permanente na bacia referentes ao em torno das nascentes, matas ciliares e áreas com declividade superior a 45° e gerar o mapa de conflito entre o uso atual da bacia e a determinação do Código Florestal, (Lei nº 4771, de 15 de setembro de 1965).

Após todo levantamento de campo e de posse dos resultados das análises dos parâmetros, utilizando-se da interpolação geoestatística krigagem, foram gerados

os mapas temáticos. As análises geoestatísticas foram realizadas no GS+ (GS+, 2000), e com os resultados das características dos solos, então, transportadas para planilhas do Excel, contendo as coordenadas de cada perfil (ponto amostrado) e o respectivo valor do atributo em estudo através da extensão Geoestatistic, no ArcGIS 8.2, com o comando Geoestatistic Wizard, aplicou-se os resultados gerando os mapas temáticos da krigagem dos parâmetros químicos e físico-hídricos dos solos da bacia.

Os mapas de fertilidade aparente para as duas profundidades estudadas foram gerados segundo a metodologia proposta por Zimback & Rodrigues (1993), onde se consideram os seguintes critérios apresentados nos quadros a seguir:

**Quadro 4.** Classificação e atribuição de notas para valores de pH e V%.

<b>Classificação</b>	<b>pH</b>	<b>V%</b>	<b>NOTA</b>
muito alta	> 6.0	> 90	5
alta	5.6 – 6.0	71 – 90	4
média	5.1 – 5.5	51 – 70	3
baixa	4.4 – 5.0	26 – 50	2
muito baixa	< 4.3	< 25	1

**Quadro 5.** Classificação e atribuição de notas para valores de CTC e M.O.

<b>Classificação</b>	<b>CTC</b>	<b>MO</b>	<b>NOTA</b>
alta	>100	>25	5
média	50 – 100	15 – 25	3
baixa	<50	<15	1

Somando-se estes quatro fatores, verifica-se o intervalo que classifica a fertilidade aparente para cada solo, conforme o Quadro 6 abaixo:

**Quadro 6.** Classificação, intervalo de enquadramento para os valores encontrados e classes de fertilidade aparente.

<b>Classificação</b>	<b>Intervalo de enquadramento</b>	<b>Classe</b>
muito alta	16.8 – 20.0	I
alta	13.6 – 16.8	I
média	10.4 – 13.6	II
baixa	7.2 – 10.4	III
muito baixa	4.0 – 7.2	IV

As cinco classes de fertilidade aparente são definidas como:

- 1- muito alta:** solos com ampla reserva de nutrientes, com potencial natural de produção;
- 2- alta:** solos com boa reserva de nutrientes, produzindo colheitas satisfatórias ainda que não se empreguem fertilizantes e corretivos, ou seja, solos sem necessidade de fertilizantes e corretivos;
- 3- média:** solos com limitadas reservas de nutrientes, permitindo boas colheitas por alguns anos, mas apresentando decréscimos progressivos das safras pelo uso contínuo;
- 4- baixa:** solos com limitadas reservas de nutrientes, permitindo colheitas baixas ou pastagens de regulares a más;
- 5- muito baixa:** solos com riqueza de nutrientes muito baixa, que praticamente não permitem o uso nem para pastagem e nem para reflorestamento, a não ser mediante a aplicação de doses adequadas de corretivos e fertilizantes.

No Arc GIS 8.2, os mapas dos atributos de pH, CTC, V% e M.O., foram reclassificados seguindo a metodologia apresentada acima e através do comando Raster Calculation, chegou-se aos resultados finais na geração dos mapas de fertilidade aparente para as duas profundidades estudadas.

Ainda segundo metodologia de Zimback & Rodrigues (1993), utilizando-se os mapas de fertilidade aparente, condutividade hidráulica, na profundidade 0-20cm, juntamente com o mapa de classes de declive, no Arc GIS 8.2, através do comando Raster Calculation, gerou-se o mapa de classes de capacidade de uso para a bacia do Ribeirão Lavapés. De posse deste mapa, ainda no Arc GIS 8.2, identificou-se os conflitos referentes ao

uso atual que estão alocados em áreas fora da recomendação das classes de capacidade de uso, utilizando-se para isto, o mapa de uso atual da bacia.

Este banco de dados georreferenciado formado com os mapas dos parâmetros pedológicos e ambientais encontrados na bacia, permitiram conclusões quanto à situação atual do uso e ocupação da bacia, criando argumentos para um melhor entendimento e racionalização do planejamento das áreas do município de Botucatu.

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1. Análise Descritiva**

A análise estatística descritiva dos dados foi realizada para cada um dos parâmetros estudados, obtendo-se os valores mínimos, máximos, médias, desvios padrão e variâncias, como mostra o Quadro 7, para os parâmetros químicos, e o Quadro 8 para os parâmetros físico-hídricos dos solos.

Com o valor mínimo e máximo dos parâmetros analisados, pode-se observar os intervalos demonstrados pelas variáveis.

No presente estudo, assim como na maioria dos dados da natureza, tanto o desvio padrão como a variância mostram que os dados possuem alta amplitude de variação. A relação existente entre o desvio padrão e a variância fornecem uma medida relativa da precisão do experimento, muito útil na avaliação da dispersão dos dados, como o descrito por LANDIM (1998).

**Quadro 7.** Análise estatística descritiva dos parâmetros químicos dos solos da bacia do Ribeirão Lavapés.

Variável	Prof. (cm)	Média	Valor		Desvio Padrão	Variância	Distribuição
			Mínimo	Máximo			de Frequencia
pH	0 - 20	5,00	3,90	6,10	0,5273	0,2780	N
	20 - 40	4,70	3,90	5,50	0,4846	0,2349	N
M O.	0 - 20	27,50	1,00	54,00	0,8740	0,7631	LN
	20 - 40	33,00	0,00	66,00	0,7380	0,5442	LN
P	0 - 20	29,00	8,00	50,00	0,4360	0,1905	LN
	20 - 40	20,00	6,00	34,00	0,4700	0,2212	LN
H + Al	0 - 20	37,00	13,00	61,00	0,3250	0,1053	LN
	20 - 40	44,00	16,00	72,00	0,3420	0,1170	LN
K	0 - 20	4,45	0,20	8,70	0,9710	0,9434	LN
	20 - 40	3,35	0,10	6,60	1,0520	1,1070	LN
Ca	0 - 20	49,00	2,00	96,00	1,0860	1,1790	LN
	20 - 40	40,50	2,00	79,00	1,1260	1,2680	LN
Mg	0 - 20	15,00	0,00	30,00	1,9240	0,8010	LN
	20 - 40	15,50	0,00	31,00	0,8750	0,7649	LN
SB	0 - 20	62,50	2,00	123,00	1,0480	1,0990	LN
	20 - 40	59,50	2,00	117,00	1,1470	1,3160	LN
CTC	0 - 20	99,00	28,00	170,00	0,4360	0,1901	LN
	20 - 40	84,50	24,00	145,00	0,4630	0,2140	LN
V%	0 - 20	46,50	7,00	86,00	0,7110	0,5057	LN
	20 - 40	44,50	5,00	84,00	0,8100	0,6564	LN

M O. – Matéria Orgânica (g/dm<sup>3</sup>), P – Fósforo (mg/dm<sup>3</sup>), H + Al – Acidez de reserva (mmol/dm<sup>3</sup>), K – Potássio (mmol/dm<sup>3</sup>), Ca – Cálcio (mmol/dm<sup>3</sup>), Mg – Magnésio (mmol/dm<sup>3</sup>), SB – Soma de bases (mmol/dm<sup>3</sup>), CTC – Capacidade de troca catiônica (mmol/dm<sup>3</sup>), V% - Saturação por bases, LN – lognormal, N – Normal.

**Quadro 8.** Análise estatística descritiva dos parâmetros físico-hídricos dos solos da bacia do Ribeirão Lavapés.

Variável	Prof. (cm)	Média	Valor		Desvio Padrão	Variância	Distribuição
			Mínimo	Máximo			de
							Frequência
Areia Total	0 - 20	502	82	922	0,691	0,4781	LN
	20 - 40	442	76	808	0,729	0,5321	LN
Argila	0 - 20	356,5	59	654	0,698	0,4873	LN
	20 - 40	374	63	685	0,715	0,5114	LN
Silte	0 - 20	198	19	377	0,745	0,5545	LN
	20 - 40	264	20	508	0,787	0,6193	LN
Densidade do Solo	0 - 20	1,295	0,98	1,61	0,1197	0,0143	N
	20 - 40	1,225	0,85	1,6	0,1534	0,0235	N
Porosidade Total	0 - 20	50,2	38,78	61,62	0,098	0,9932	LN
	20 - 40	54,63	40,74	68,52	0,123	0,01515	LN
Infiltração Básica	0 - 20	5,1	0,22	9,98	1,06712	1,139	LN
	20 - 40	5,09	0,22	9,96	1,02032	1,041	LN
Condutividade Hidráulica	0 - 20	3,395	0,11	6,68	1,0761	1,158	LN
	20 - 40	1,74	0,11	3,37	0,05787	0,9963	LN

Areia total (g/kg), Argila (g/kg), Silte (g/kg), Densidade do solo ( $\text{g/cm}^3$ ), Porosidade total (%), Infiltração básica (mm/h), Condutividade hidráulica (mm/h), LN – lognormal, N – Normal.

A maior parte dos atributos dos solos tanto com relação aos parâmetros químicos ou físico-hídricos apresentaram distribuição de frequência lognormal e somente o pH e a densidade do solo nas duas profundidades estudadas apresentaram distribuição normal. Cambardella et al. (1994), Takeda (2000), Zimback (2001) e Vettorato (2002), entre outros autores, verificaram melhor ajuste da distribuição lognormal para a maioria dos atributos dos solos.

## **6.2. Análise Espacial**

As análises espaciais foram efetuadas por meio da análise dos semivariogramas, conforme descrito por Journel & Huijbregts (1978) e Isaaks & Srivastava (1989), no programa GS+ (GS+, 2000).

Pela análise da superfície de tendência fornecida pelo próprio programa, não foi observada evidência de anisotropia para os atributos dos solos estudados, segundo os parâmetros estabelecidos por Zimmerman (1993).

Para o ajuste do semivariograma teórico ao semivariograma experimental, primeiramente, foi selecionada a soma dos quadrados dos resíduos (SQR), como índice de avaliação do erro de ajuste, descrito por Zimmerman & Zimmerman (1991), como a melhor medida de avaliação.

Ao invés da utilização apenas do método automático de ajuste, feito pelo programa, foi utilizado o ajuste através do método manual, descrito por Guerra (1988). O ajuste ocorreu apenas para as distâncias menores onde há uma tendência de elevação da curva do semivariograma, isto é, onde ocorre a influência do espaço na variabilidade dos dados, descrito por Ribeiro Júnior (1995), como ajuste “a sentimento”.

### **6.2.1. Parâmetros químicos**

Os resultados obtidos pela análise variográfica encontram-se dispostos no Quadro 9 para os parâmetros químicos dos solos.

**Quadro 9.** Resultados da análise variográfica dos parâmetros químicos dos solos da bacia do Ribeirão Lavapés.

Variável	Prof. (cm)	Modelo	Efeito			r <sup>2</sup>	SQR	[C/(C + Co)] x 100	Classe de Dependência Espacial
			Pepita Co	Patamar Co + C	Alcance (m)				
pH	0 - 20	exponencial	0,1261	0,3042	3010,00	0,641	0,005917	59	moderada
	20 - 40	exponencial	0,0445	0,2630	2150,00	0,362	0,016300	83	forte
M O.	0 - 20	esférico	0,4360	0,8730	11850,00	0,669	0,061400	50	moderada
	20 - 40	esférico	0,3060	0,7390	22650,00	0,953	0,007809	59	moderada
P	0 - 20	esférico	0,0663	0,2266	10330,00	0,677	0,008377	71	moderada
	20 - 40	esférico	0,0250	0,3050	12710,00	0,901	0,007542	92	forte
H + Al	0 - 20	exponencial	0,0753	0,2456	38980,00	0,712	0,001651	69	moderada
	20 - 40	esférico	0,0874	0,1758	35210,00	0,789	0,001020	50	moderada
K	0 - 20	esférico	0,1600	1,0490	7490,00	0,737	0,143000	85	forte
	20 - 40	exponencial	0,0010	1,1710	2310,00	0,478	0,491000	100	forte
Ca	0 - 20	exponencial	0,1260	1,2530	1720,00	0,291	0,561000	90	forte
	20 - 40	exponencial	0,1120	1,4590	2520,00	0,358	0,982000	92	forte
Mg	0 - 20	exponencial	0,0940	0,6880	1730,00	0,213	0,190000	86	forte
	20 - 40	esférico	0,3420	0,8940	10410,00	0,576	0,152000	62	moderada
SB	0 - 20	exponencial	0,1230	1,1660	1670,00	0,262	0,478000	89	forte
	20 - 40	exponencial	0,1520	1,5130	2600,00	0,402	0,818000	90	forte
CTC	0 - 20	esférico	0,0302	0,2254	9180,00	0,338	0,042600	87	forte
	20 - 40	esférico	0,0274	0,2698	10300,00	0,597	0,026900	90	forte
V%	0 - 20	exponencial	0,1250	0,5130	750,00	0,192	0,012700	76	forte
	20 - 40	exponencial	0,1680	0,7060	1520,00	0,307	0,063300	76	forte

M O. – Matéria Orgânica (g/dm<sup>3</sup>), P – Fósforo (mg/dm<sup>3</sup>), H + Al – Acidez de reserva (mmol/dm<sup>3</sup>), K – Potássio (mmol/dm<sup>3</sup>), Ca – Cálcio (mmol/dm<sup>3</sup>), Mg – Magnésio (mmol/dm<sup>3</sup>), SB – Soma de bases (mmol/dm<sup>3</sup>), CTC – Capacidade de troca catiônica (mmol/dm<sup>3</sup>), V% - Saturação por bases, SQR – Soma dos Quadrados dos Resíduos.

Nos ajustes dos semivariogramas, os modelos esférico e exponencial foram os que melhores se adequaram à metodologia utilizada. Através da análise das Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR), foi verificado que os valores dos erros encontrados experimentalmente neste trabalho são baixos e mostram um bom ajuste do modelo.

O grau de casualidade dos dados, segundo LANDIM (1998), é

mensurado pelo efeito pepita, obtido pelo semivariograma teórico. Avaliando os valores obtidos, observou-se que a maioria dos dados apresentou dependência espacial forte, sendo que o restante apresentou dependência espacial moderada (pH 0-20; M O. 0-20 e 20-40; P 0-20; H + Al 0-20 e 20-40; Mg 20-40cm), isto determinou que a escala de trabalho empregada neste estudo, isto é, a distância entre as amostras mostrou-se eficiente para detectar a dependência espacial, concordando com Chien et al. (1997) e Salviano et al. (1998).

Nas análises espaciais pode-se notar que o alcance variou de 750m até 38.980m nas amostragens de 0-20cm e de 1.520m até 35.210m para as amostragens de 20-40cm. A distância entre as amostras (escala) utilizada no estudo foi adequada porque em todos os parâmetros analisados foi determinada a dependência espacial.

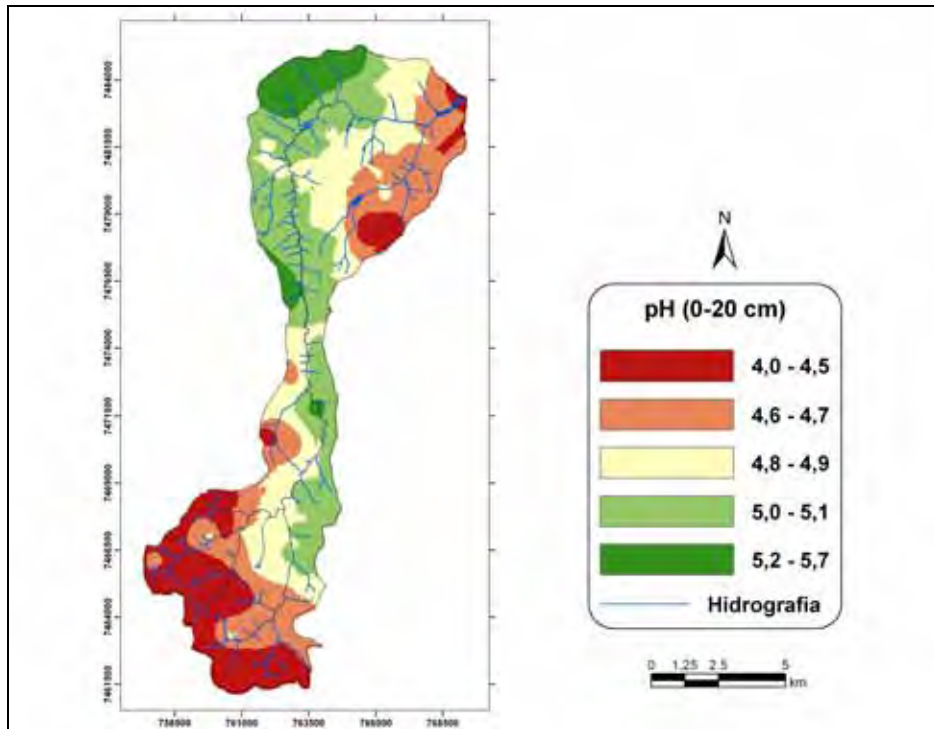
Os valores obtidos através do semivariograma revelaram que o alcance, ou seja, a distância de dependência espacial é maior para a profundidade de 20-40cm na maioria dos atributos analisados exceto para pH, acidez de reserva e potássio, mostrando mais uma vez que o manejo nas áreas influenciou na variabilidade espacial principalmente para a profundidade 0-20cm, corroborando com os resultados de Zimback (2001).

O patamar (C + Co) representa a grandeza da variabilidade total da amostragem, sendo que as maiores variações ocorreram potássio, cálcio e soma de bases, demonstrada no Quadro 9.

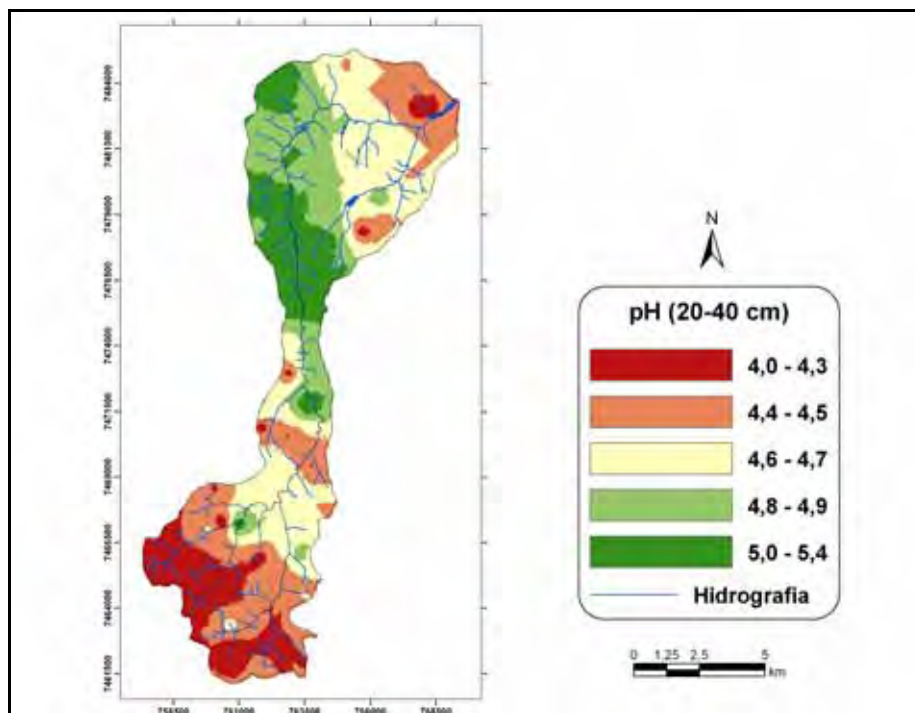
Partindo do exposto por Russo (1984), Zimmerman & Zimmerman (1991), McBratney et al. (1991), Hosseini et al. (1993), Hosseini et al. (1994) e Chien et al. (1997), de que a Krigagem é o melhor método de interpolação para dados de atributos dos solos, foram efetuados os mapas interpolados por Krigagem, da área estudada.

Para o cálculo da Krigagem, os resultados obtidos pela análise espacial foram utilizados, sendo que este método de interpolação é essencialmente geoestatístico e, para tal, é necessário que seja detectada a área ou distância da dependência espacial entre as amostras, para cada atributo do solo (YOST et al., 1982), bem como o alcance, efeito pepita e patamar.

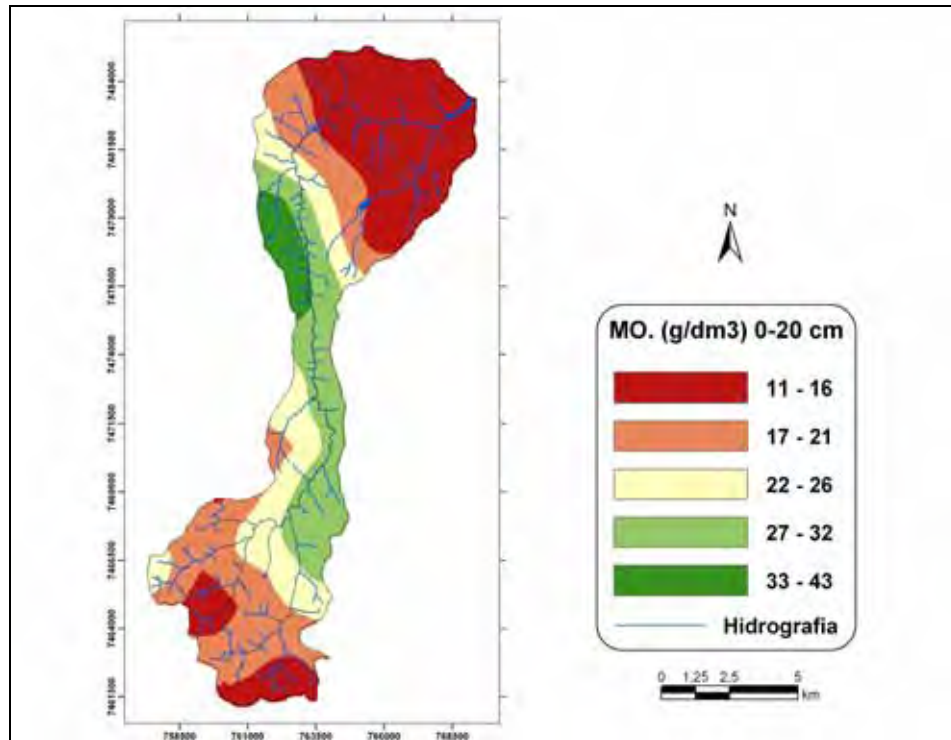
Nas Figuras 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, e 26 estão expostos os mapas interpolados para os parâmetros químicos dos solos, nas duas profundidades estudadas.



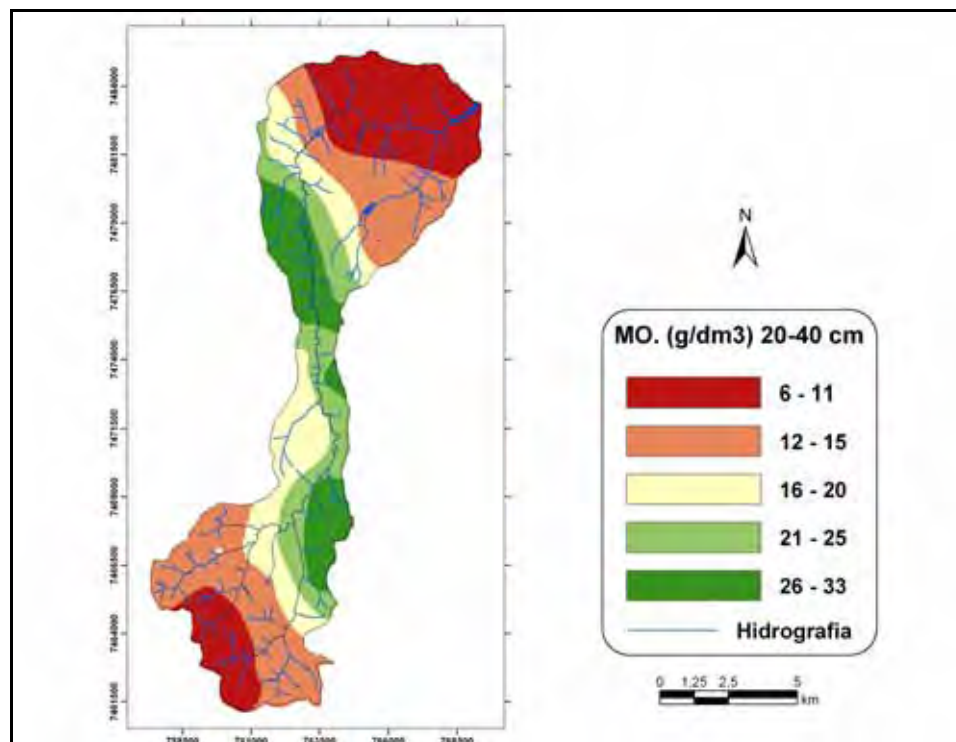
**Figura 7.** Mapa interpolado do pH do solo, profundidade 0-20cm.



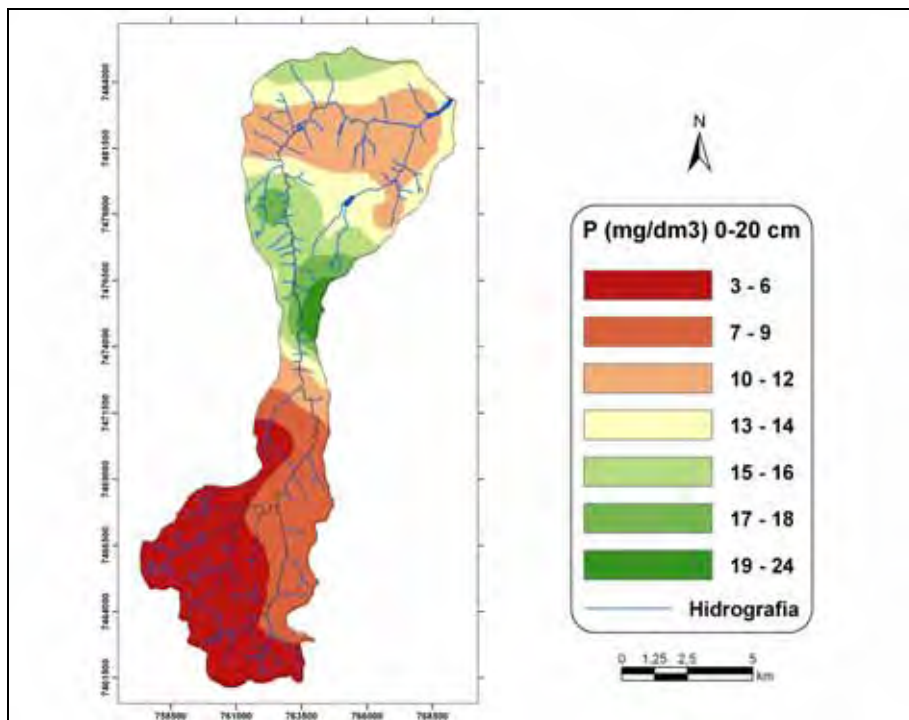
**Figura 8.** Mapa interpolado do pH do solo, profundidade 20-40cm.



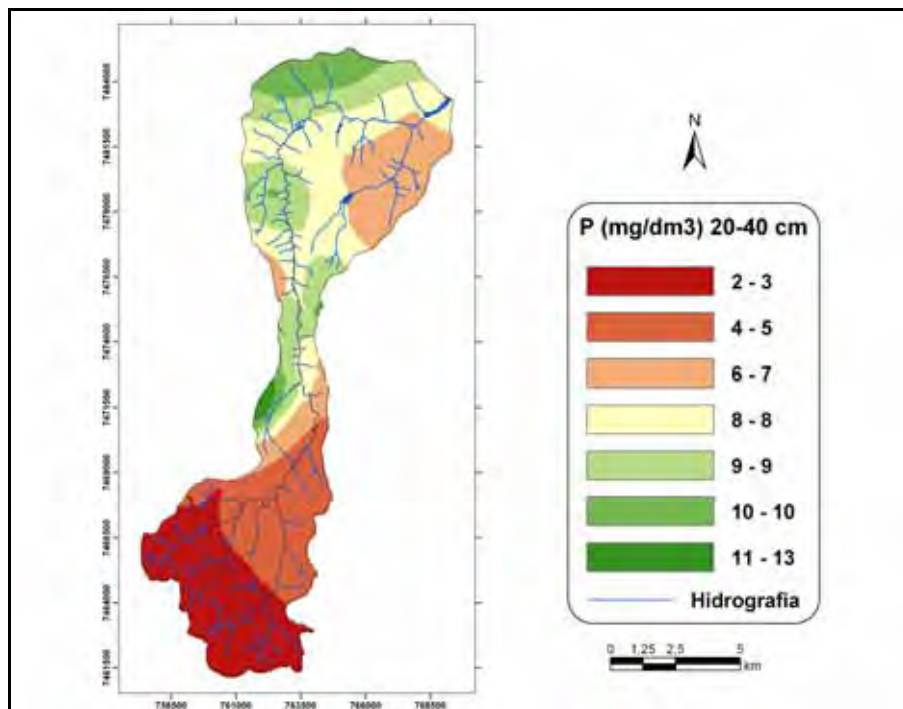
**Figura 9.** Mapa interpolado dos teores de Matéria Orgânica do solo (g/dm<sup>3</sup>), profundidade 0-20cm.



**Figura 10.** Mapa interpolado dos teores de Matéria Orgânica do solo (g/dm<sup>3</sup>), profundidade 20-40cm.



**Figura 11.** Mapa interpolado dos teores de Fósforo do solo (mg/dm<sup>3</sup>), profundidade 0-20cm.



**Figura 12.** Mapa interpolado dos teores de Fósforo do solo (mg/dm<sup>3</sup>), profundidade 20-40cm.

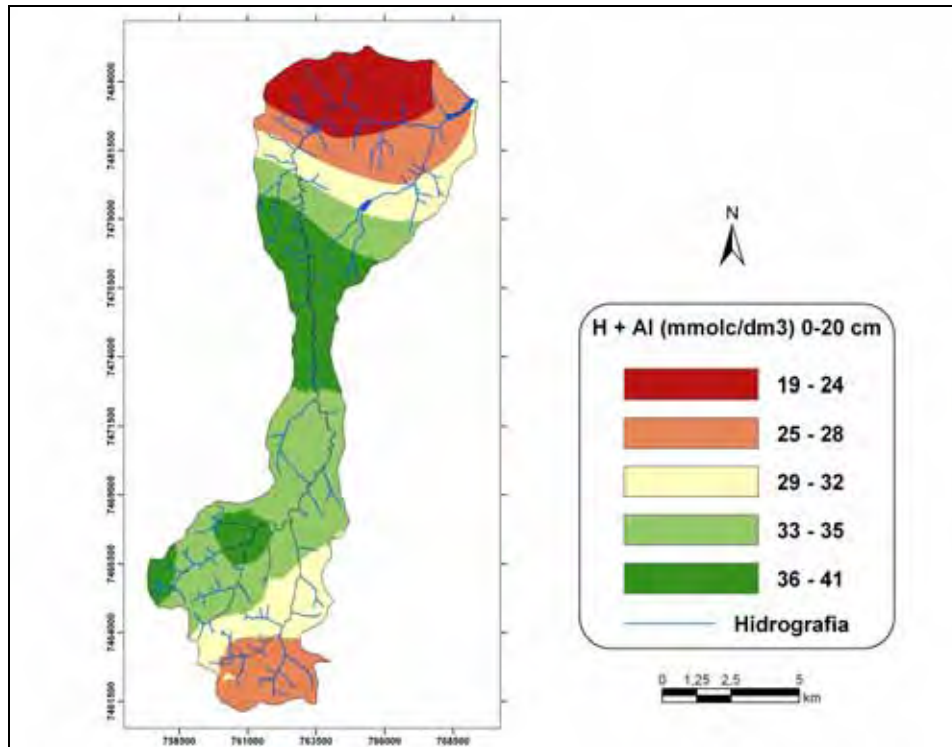


Figura 13. Mapa interpolado da acidez de reserva (mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), profundidade 0-20cm.

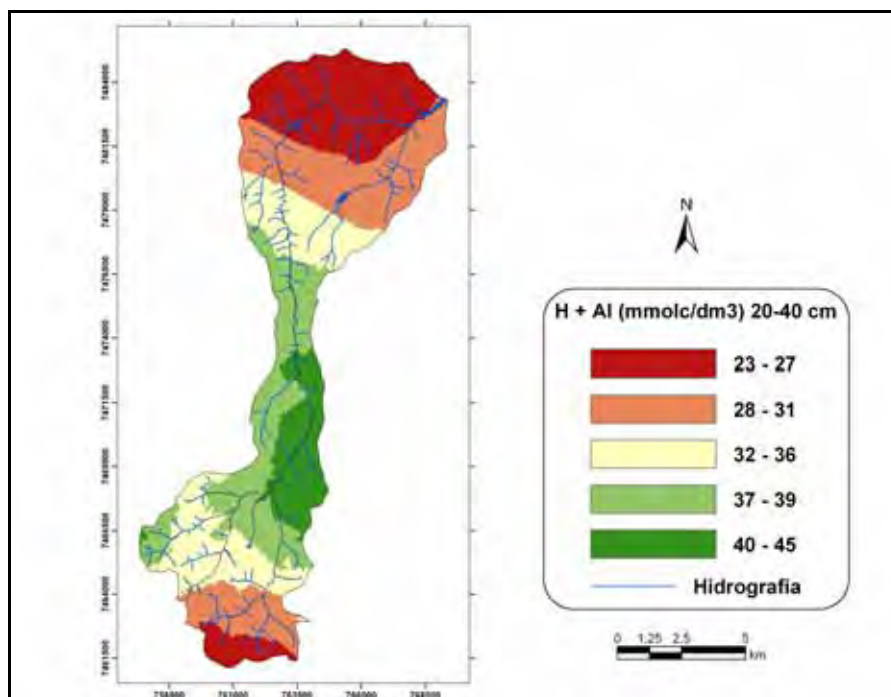


Figura 14. Mapa interpolado da acidez de reserva (mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), profundidade 20-40cm.

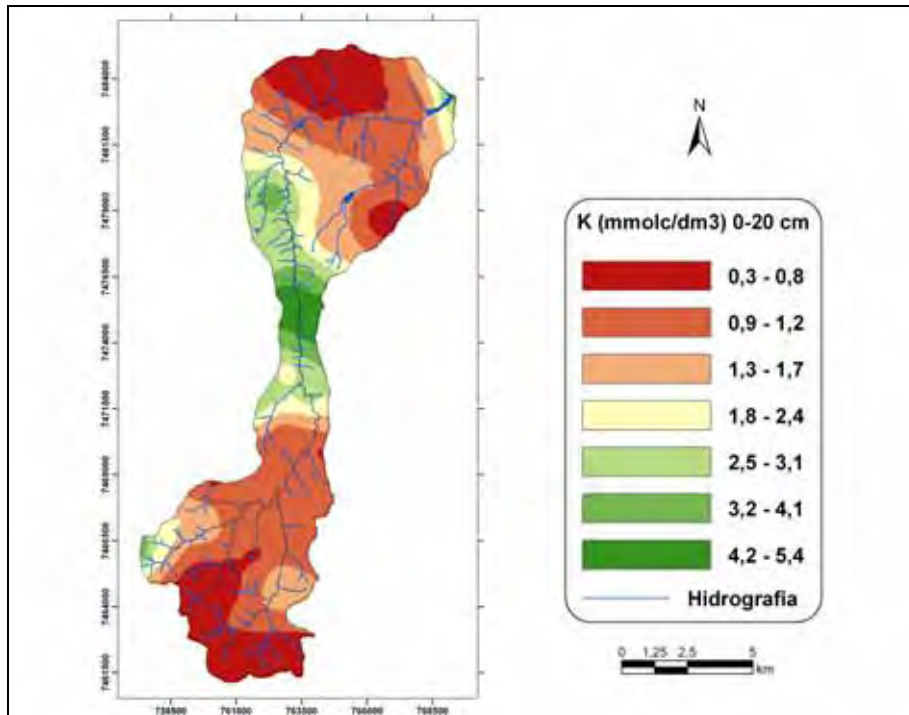


Figura 15. Mapa interpolado dos teores de Potássio do solo ( $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$ ), profundidade 0-20cm.

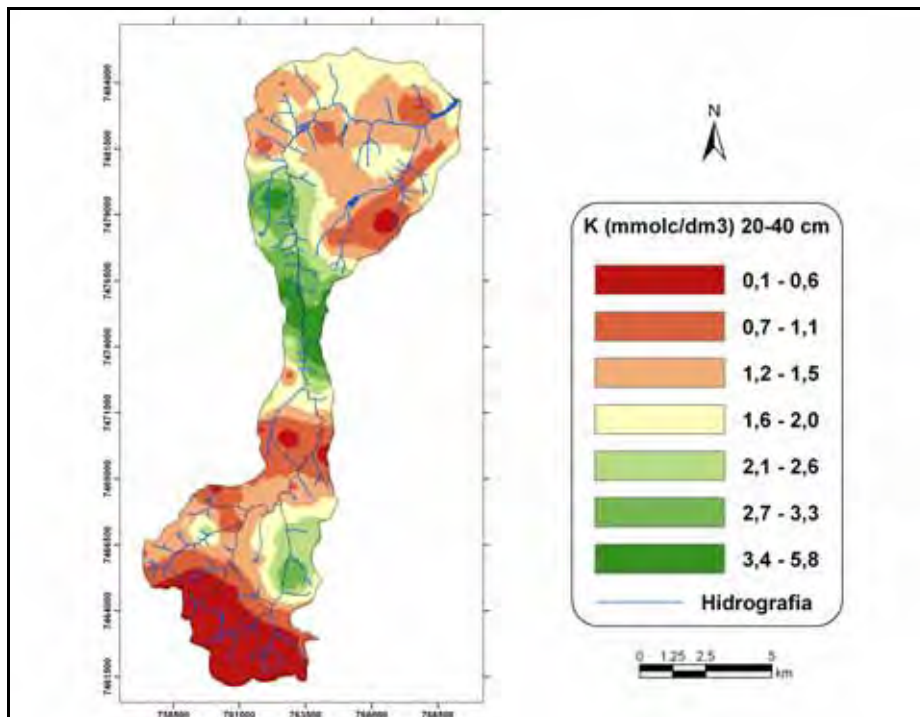
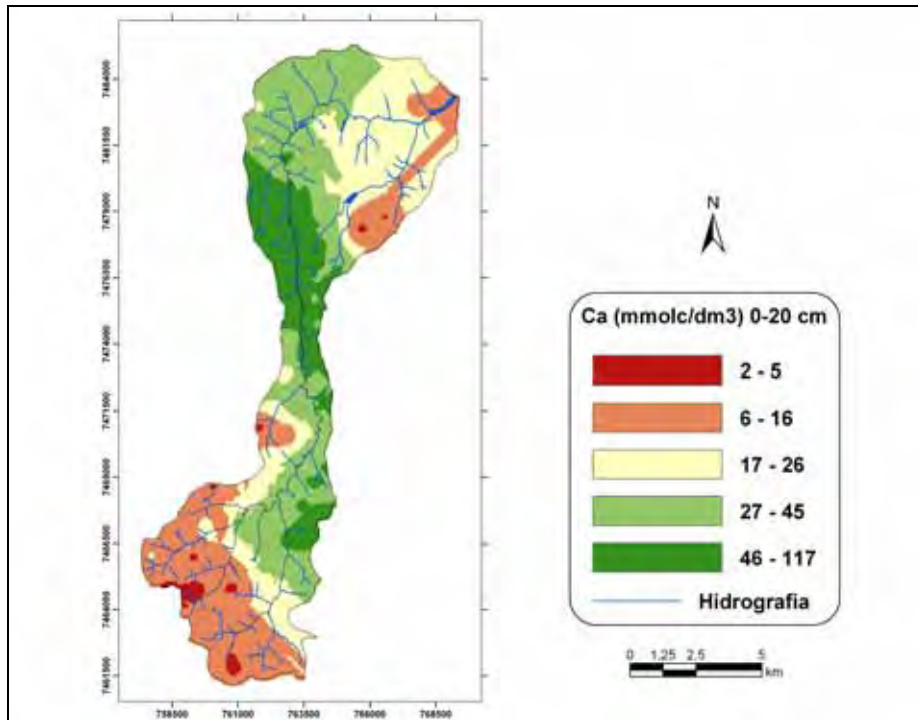
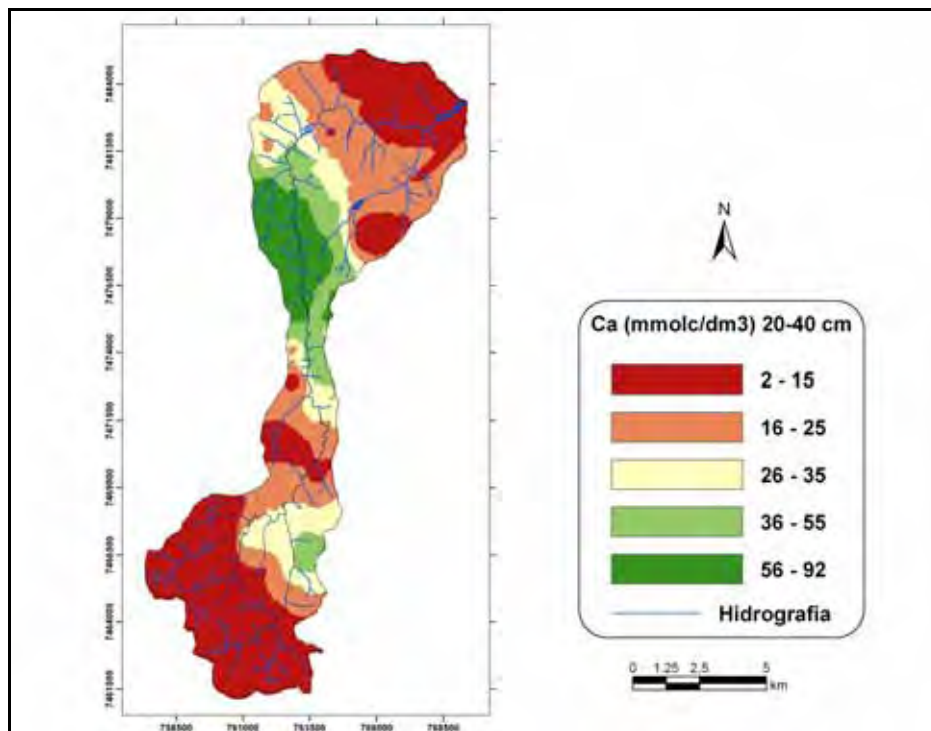


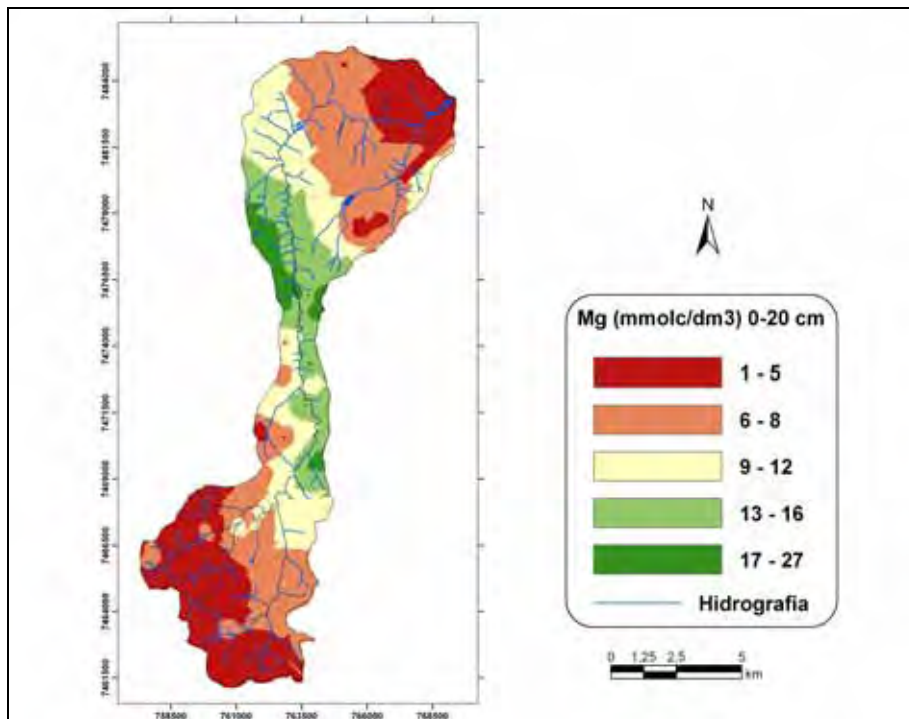
Figura 16. Mapa interpolado dos teores de Potássio do solo ( $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$ ), profundidade 20-40cm.



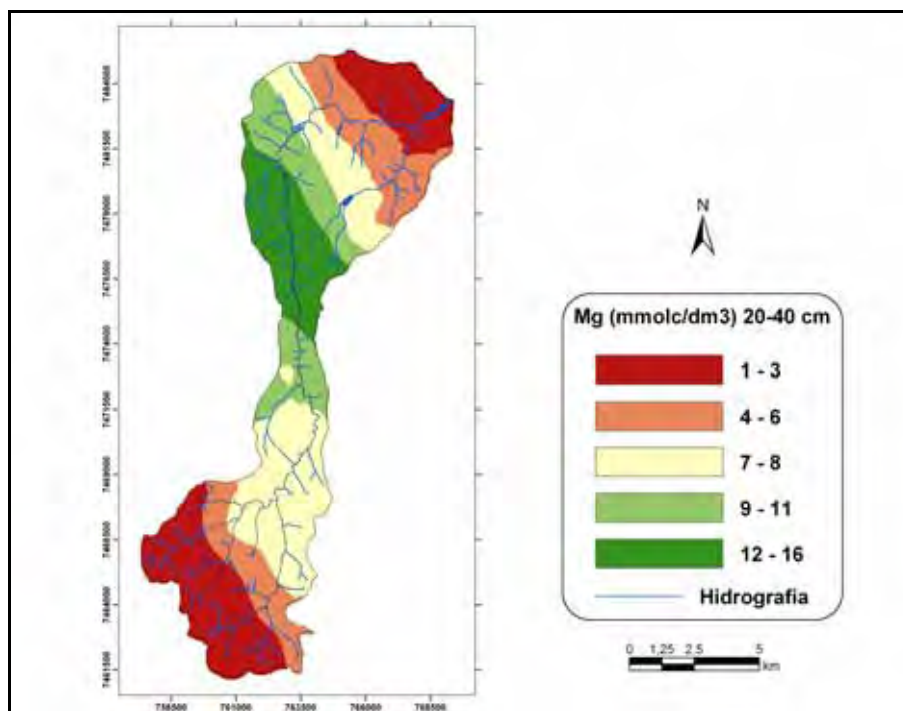
**Figura 17.** Mapa interpolado dos teores de Cálcio do solo (mmol/dm<sup>3</sup>), profundidade 0-20cm.



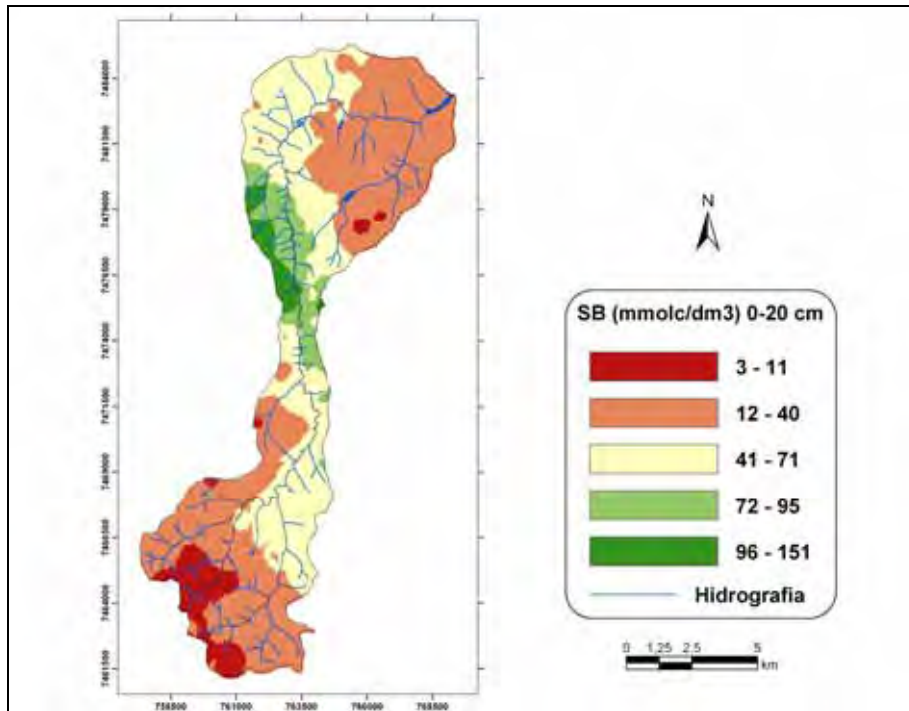
**Figura 18.** Mapa interpolado dos teores de Cálcio do solo (mmol/dm<sup>3</sup>), profundidade 20-40cm.



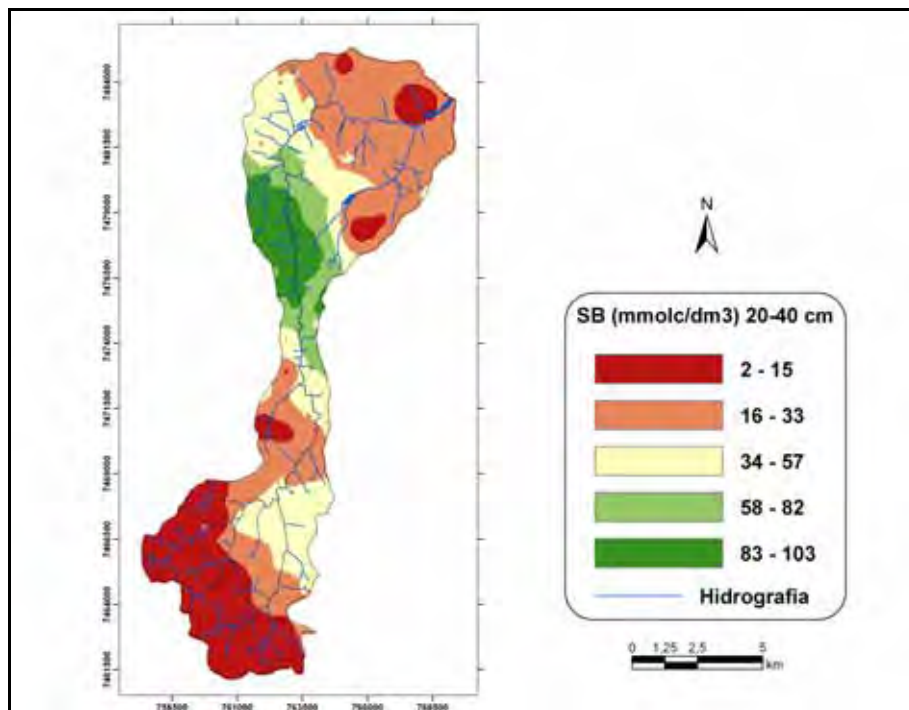
**Figura 19.** Mapa interpolado dos teores de Magnésio do solo (mmol./dm<sup>3</sup>), profundidade 0-20cm.



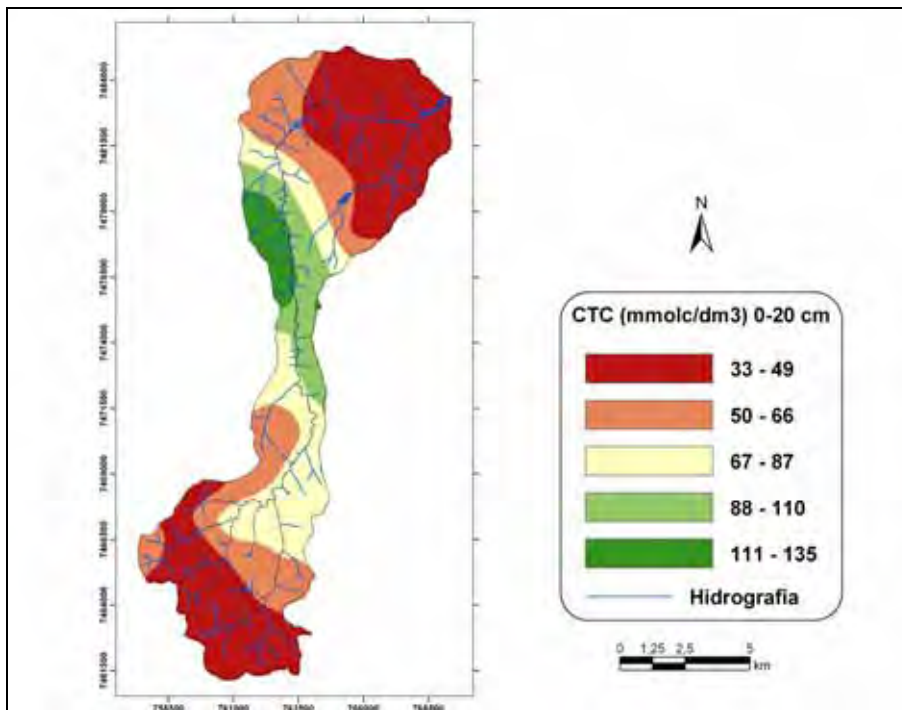
**Figura 20.** Mapa interpolado dos teores de Magnésio do solo (mmol./dm<sup>3</sup>), profundidade 20-40cm.



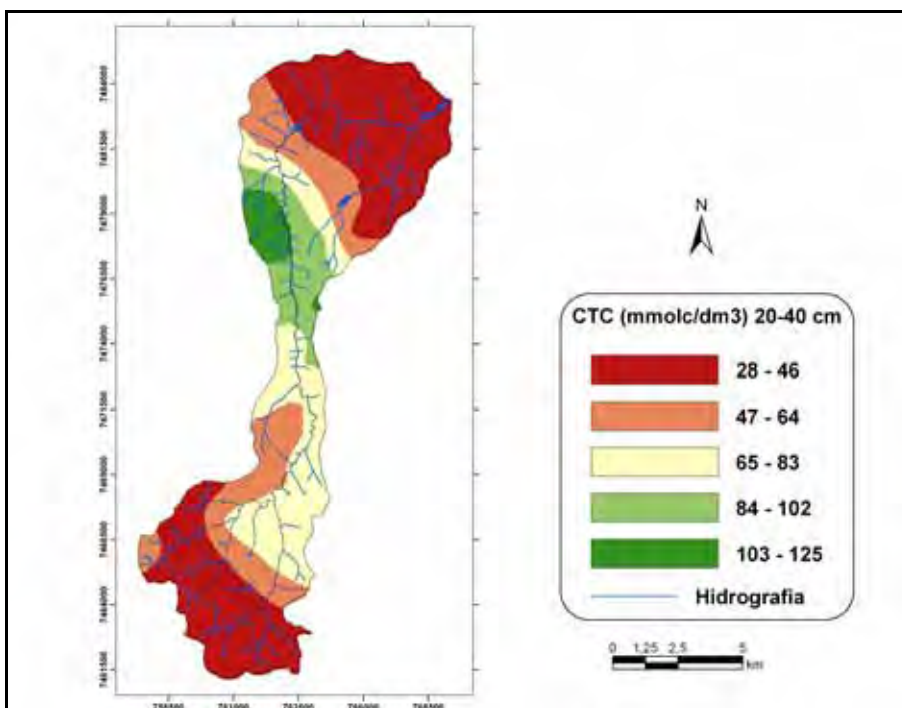
**Figura 21.** Mapa interpolado da Soma de Bases (mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), profundidade 0-20cm.



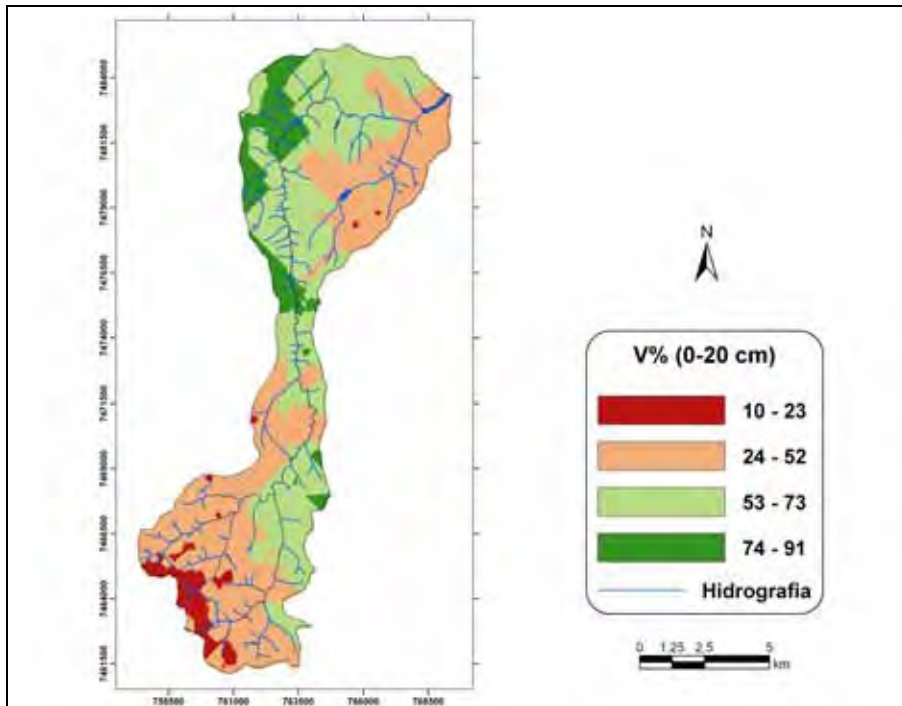
**Figura 22.** Mapa interpolado da Soma de Bases (mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), profundidade 20-40cm.



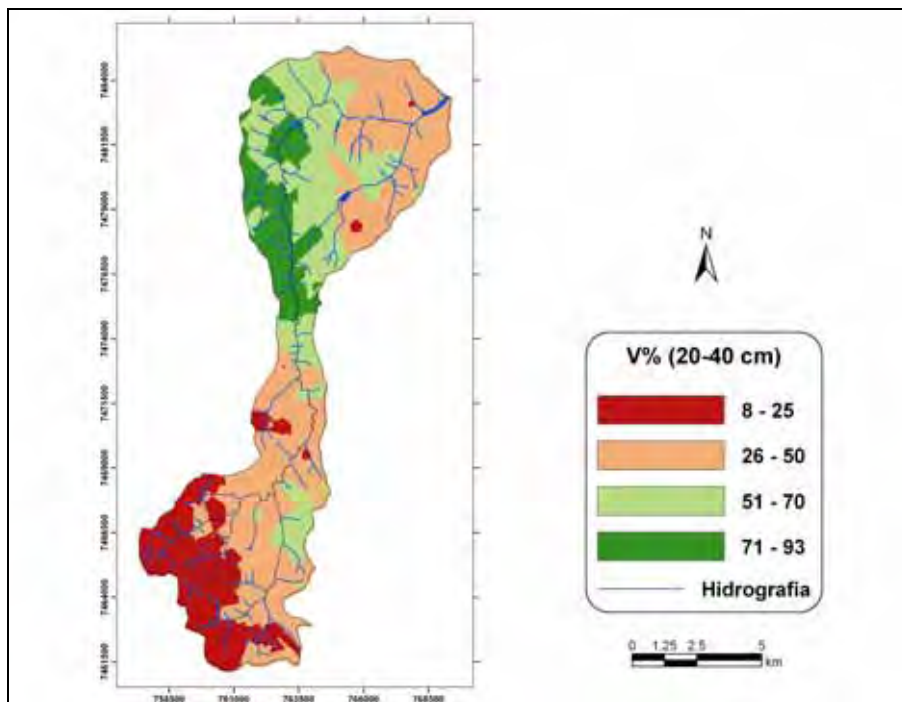
**Figura 23.** Mapa interpolado da Capacidade de Troca Catiônica (mmol/dm<sup>3</sup>), profundidade 0-20cm.



**Figura 24.** Mapa interpolado da Capacidade de Troca Catiônica (mmol/dm<sup>3</sup>), profundidade 20-40cm.



**Figura 25.** Mapa interpolado do V% do solo, profundidade 0-20 cm.



**Figura 26.** Mapa interpolado do V% do solo, profundidade 20-40 cm.

Nas Figuras 7 e 8, os dados de acidez potencial, pH do solo, foram interpolados, para as duas profundidades estudadas e verifica-se que os baixos teores de pH estão relacionados com os solos de textura arenosa e também presente nas áreas de pastagens degradada. As áreas com teores de pH mais elevados estão relacionadas com os solos de textura mais argilosa e com aquelas que manejadas com culturas agrícolas condicionam a melhoria da fertilidade do solo.

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os mapas dos teores de M O., nas duas profundidades e verifica-se que a variação dos teores de M O. estão relacionados com a textura dos solos encontrados na bacia. Os baixos teores de M O. estão nos solos de textura arenosa sendo que na porção de solos de textura argilosa os teores se apresentam de médios a elevados, evidenciando a condição dos solos argilosos em fixar mais M O.

A interpolação dos teores de P para as duas profundidades estão dispostos nas Figuras 11 e 12, respectivamente. O manejo e o uso atual das áreas da bacia interferem nos valores de P no solo. As áreas agrícolas apresentam maiores valores de P no solo enquanto as áreas com pastagens degradadas e mesmo na mancha urbana do município encontram-se os menores teores de P, concordando com o encontrado por Knighton & James (1985), ao estudarem teores de P em áreas naturais e sistematizadas.

Nas Figuras 13 e 14, os dados de acidez de reserva potencial, H + Al no solo, foram interpolados, para as duas profundidades estudadas e verifica-se que os teores de acidez de reserva também estão relacionados com a textura dos solos das áreas da bacia, onde a presença dos Neossolos evidencia as áreas de maiores teores de acidez de reserva.

As Figuras 15 e 16 mostram a interpolação para os teores de K no solo representando que no caso da profundidade 0-20cm o manejo da área mostra uma diferenciação dos valores como na porção mais a oeste da bacia onde um ponto amostrado em uma pastagem que tinha sido recentemente queimada elevou a tendência da interpolação pela disponibilidade do elemento naquele momento no ponto amostrado. Verifica-se ainda que os teores mais elevados também estão relacionados com os solos de textura mais argilosa.

Esta observação é verdadeira quando se analisa o mapa na profundidade 20-40cm, que esclarece que a origem dos solos e o manejo interferem na representação da continuidade do elemento.

O elemento Ca está mapeado nas Figuras 17 e 18 para as duas profundidades respectivamente e verifica-se que as variações dos teores de Ca estão relacionados com o manejo das áreas no caso da profundidade 0-20cm e com a textura dos solos encontrados na bacia no caso da profundidade 20-40cm. Os baixos teores de Ca estão relacionados com os solos de textura arenosa.

O mapeamento do elemento Mg ficou muito semelhante ao observado com o elemento Ca, com relação à distribuição do elemento devido ao manejo das áreas na profundidade 0-20cm e com relação às classes texturais dos solos encontrados na bacia para a profundidade 20-40cm, como se observa nas Figuras 19 e 20.

As Figuras 21 e 22 apresentam o mapeamento da Soma de Bases dos solos da bacia.

Nas Figuras 23 e 24, estão mapeados os valores de CTC, que para as duas profundidades demonstram grande relação com a classe textural dos solos encontrados. Os solos com menores valores de CTC são os arenosos, apesar do manejo encontrado.

As Figuras 25 e 26 mostram a krigagem do V% demonstrando que, da mesma maneira que as variáveis anteriores, a amostragem para a análise espacial do V% foi suficiente, mas uma maior seqüência de pontos amostrados talvez melhoraria o resultado final da interpolação, concordando com os resultados obtidos por Oliver, 1999.

Os resultados encontrados no estudo dos parâmetros químicos dos solos da bacia, mostraram que a krigagem foi um ótimo interpolador, como o encontrado por Laslett et al. (1987), Voltz & Webster (1990) e Zimback et al. (1998).

A fertilidade do solo é a característica mais importante na avaliação pedológica da capacidade produtividade da bacia, determinando a riqueza dos solos quanto as reservas de minerais disponíveis para a nutrição das plantas. A importância de se mapear a fertilidade do solo para obter um suporte quantitativo no balanço nutricional do solo é reportada por White & Zasoski (1999).

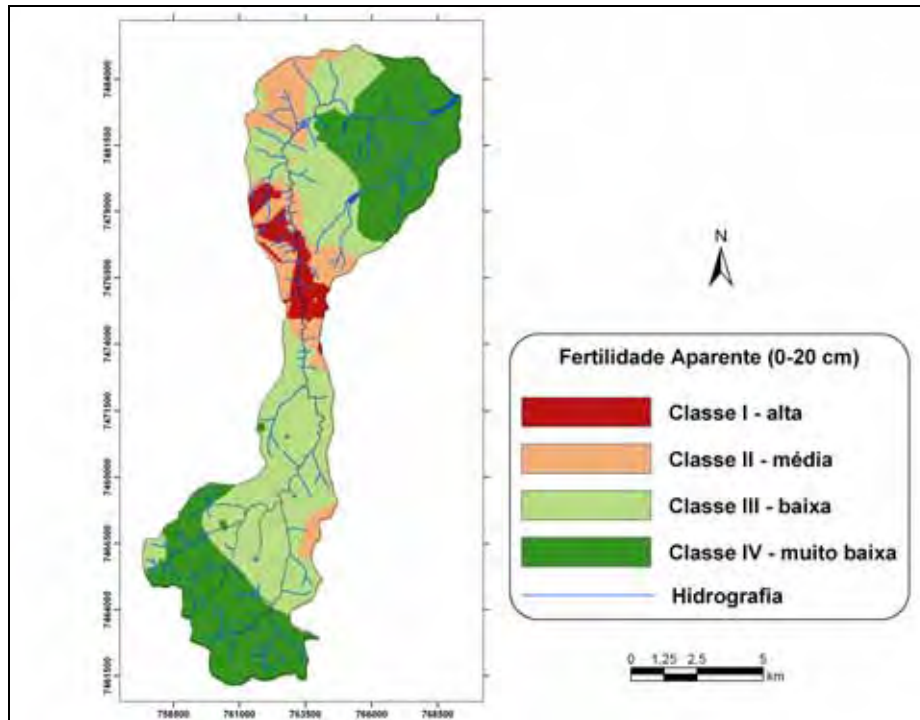
Desta forma, para a caracterização das bacias hidrográficas, a fertilidade aparente é uma determinação que merece ser analisada para se avaliar as condições produtivas dos solos em uma bacia. A fertilidade aparente é um parâmetro complexo e, portanto, difícil de ser avaliado servindo como um bom termo de correlação entre unidades de solo de uma mesma região que sejam semelhantes em outras características.

Para a criação dos mapas de fertilidade aparente utilizou-se da metodologia segundo Zimback (1993), onde os mapas interpolados dos atributos pH, M.O., CTC e V% recebem notas segundo seus teores e são agrupados para gerar o mapa final de fertilidade aparente.

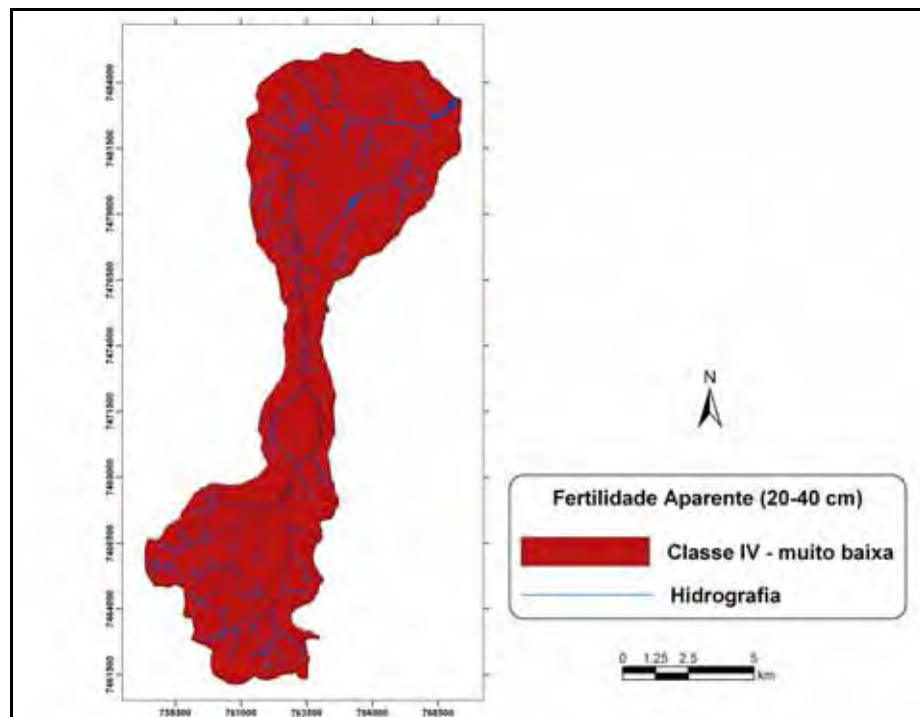
As Figuras 27 e 28 apresentam as classes de fertilidade aparente encontradas na bacia. Na profundidade 0-20cm (Figura 27), ocorreram 4 classes de fertilidade aparente, muito relacionadas com o manejo e textura dos solos encontrados.

- **Classe I - alta:** solos com boa reserva de nutrientes, permitindo colheitas satisfatórias ainda que não se empreguem fertilizantes e corretivos, solos que não necessitam de fertilizantes e corretivos;
- **Classe II - média:** solos com limitadas reservas de nutrientes, permitindo boas colheitas por alguns anos, mas apresentando decréscimos progressivos das safras pelo uso intensivo;
- **Classe III - baixa:** solos com limitadas reservas de nutrientes, permitindo colheitas baixas ou pastagens de regulares a más;
- **Classe IV - muito baixa:** solos com riqueza de nutrientes muito baixa, que praticamente não permitem o uso nem para pastagem e nem para reflorestamento, a não ser mediante a aplicação de doses adequadas de corretivos e fertilizantes.

Já na profundidade 20-40cm, (Figura 28), somente ocorreu a Classe IV, muito baixa, mostrando, provavelmente, a real condição de fertilidade dos solos, onde é mínimo o efeito de fertilizações e correções das camadas superficiais.



**Figura 27.** Mapa das Classes de Fertilidade Aparente do solo, profundidade 0-20 cm.



**Figura 28.** Mapa das Classes de Fertilidade Aparente do solo, profundidade 20-40 cm.

## 6.2.2. Parâmetros físico-hídricos

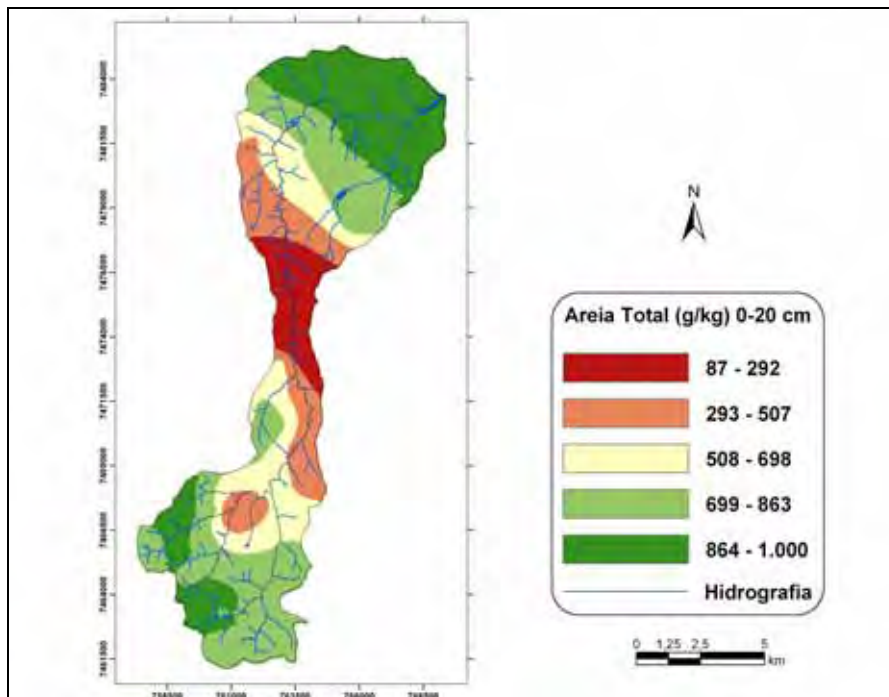
Os resultados obtidos pela análise variográfica encontram-se dispostos no Quadro 10, para os parâmetros físico-hídricos dos solos.

**Quadro10.** Resultados da análise variográfica dos parâmetros físico-hídricos dos solos da bacia do Ribeirão Lavapés.

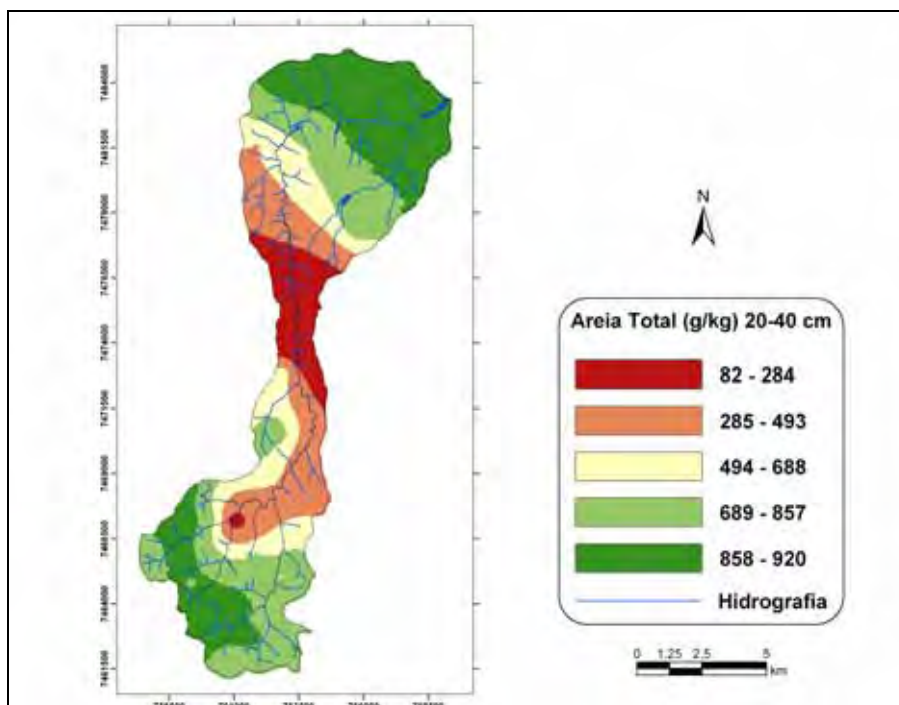
Variável	Prof. (cm)	Modelo	Efeito			r2	SQR	[C/(C + Co)] x 100	Classe de Dependência Espacial
			Pepita Co	Patamar Co + C	Alcance (m)				
Areia Total	0 - 20	esférico	0,016	0,541	8430	0,152	1,04	97	forte
	20 - 40	esférico	0,021	0,605	8480	0,154	1,16	97	forte
Argila	0 - 20	esférico	0,036	0,63	10750	0,442	0,389	94	forte
	20 - 40	esférico	0,008	0,675	10840	0,478	0,42	99	forte
Silte	0 - 20	esférico	0,117	0,659	9750	0,479	0,2	82	forte
	20 - 40	esférico	0,233	0,731	10480	0,512	0,16	68	moderada
Densidade do Solo	0 - 20	exponencial	0	0,0151	1780	0,235	0,0001467	100	forte
	20 - 40	esférico	0,0024	0,0228	2240	0,055	0,0002356	89	forte
Porosidade Total	0 - 20	exponencial	0,00012	0,01034	2110	0,234	0,00009406	99	forte
	20 - 40	esférico	0,00006	0,01462	2480	0,066	0,000167	100	forte
Infiltração Básica	0 - 20	esférico	0,662	1,924	32630	0,875	0,128	66	moderada
	20 - 40	esférico	0,661	1,323	18930	0,802	0,0925	50	moderada
Condutividade Hidráulica	0 - 20	esférico	0,592	1,558	18490	0,891	0,104	62	moderada
	20 - 40	exponencial	0,0006860	0,003522	30	0	0,000004458	81	forte

Areia total (g/kg), Argila (g/kg), Silte (g/kg), Densidade do solo (g/cm<sup>3</sup>), Porosidade total (%), Infiltração básica (mm/h), Condutividade hidráulica (mm/h), SQR – Soma dos Quadrados dos Resíduos.

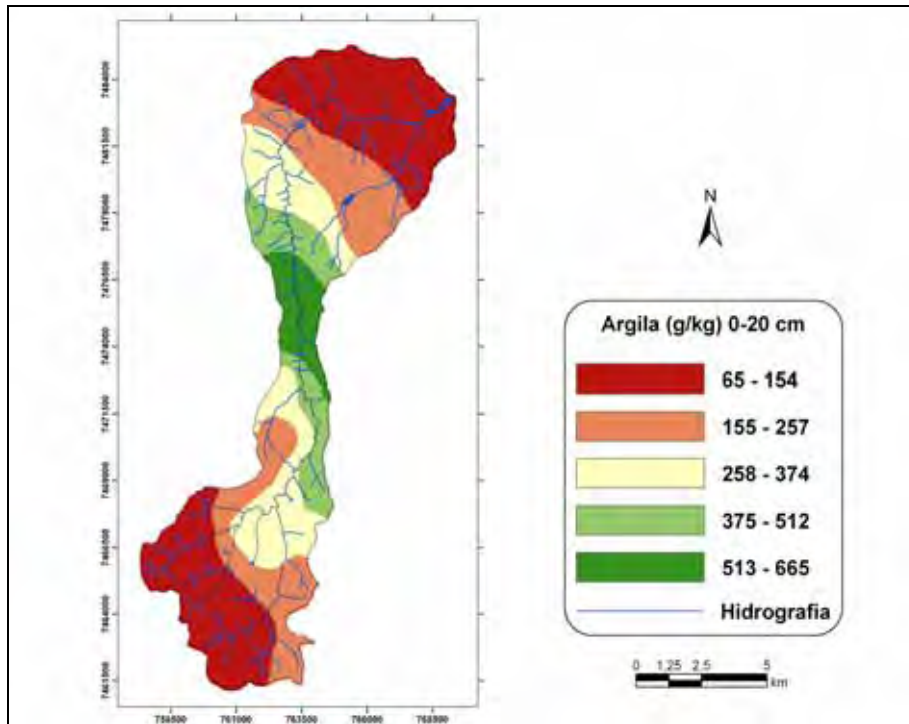
Todos os atributos foram ajustados no modelo esférico e apresentando dependência espacial de 8.430m até 10.840m. Os parâmetros físico-hídricos foram interpolados por Krigagem, sendo os mapas apresentados nas Figuras 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41 e 42.



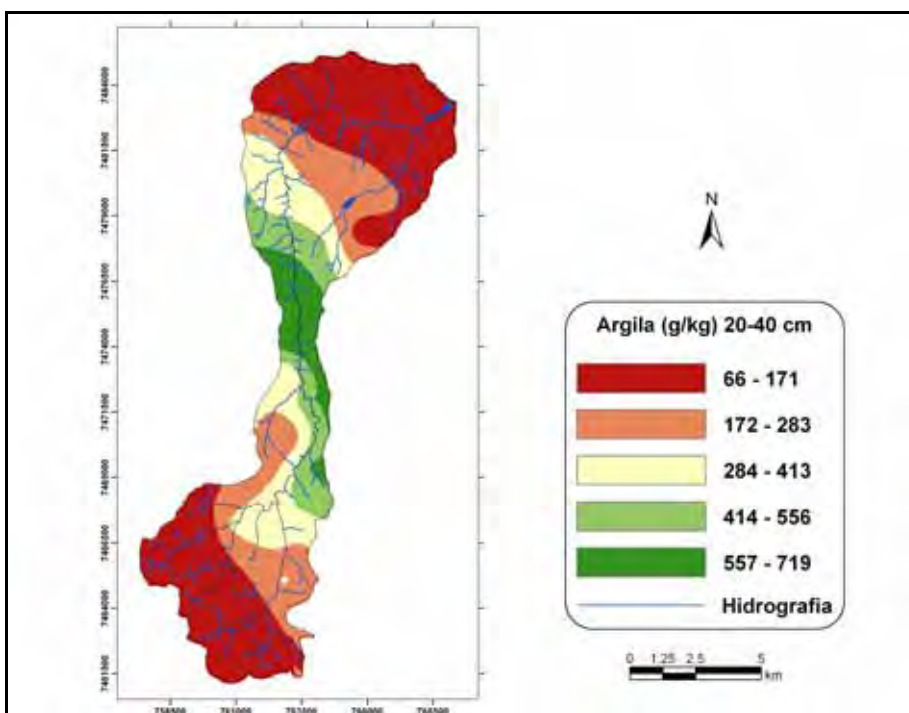
**Figura 29.** Mapa interpolado do atributo Areia Total (g/kg), profundidade 0-20cm.



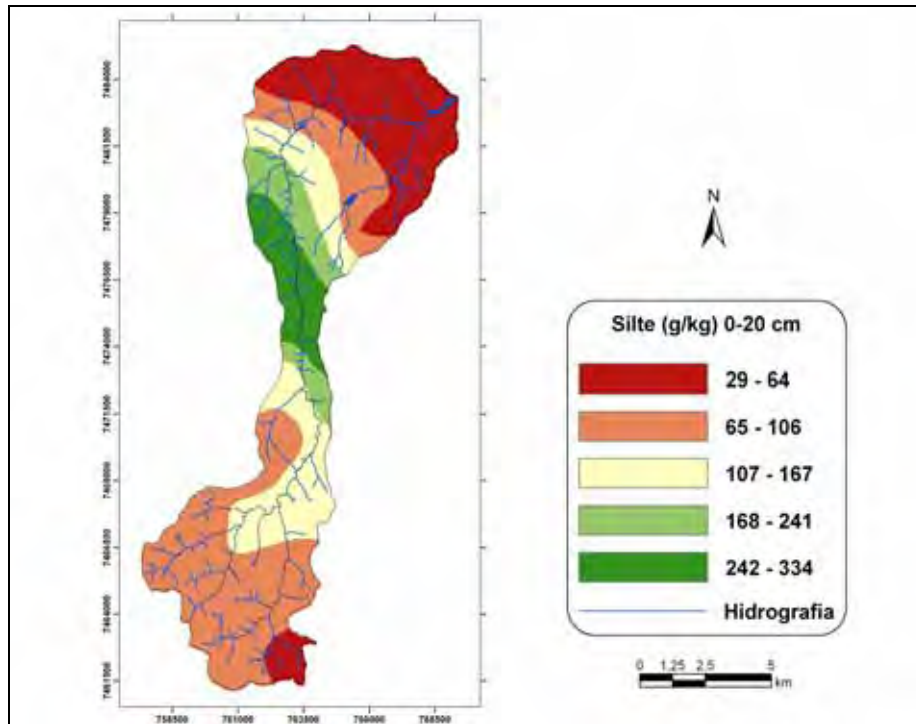
**Figura 30.** Mapa interpolado do atributo Areia Total (g/kg), profundidade 20-40cm.



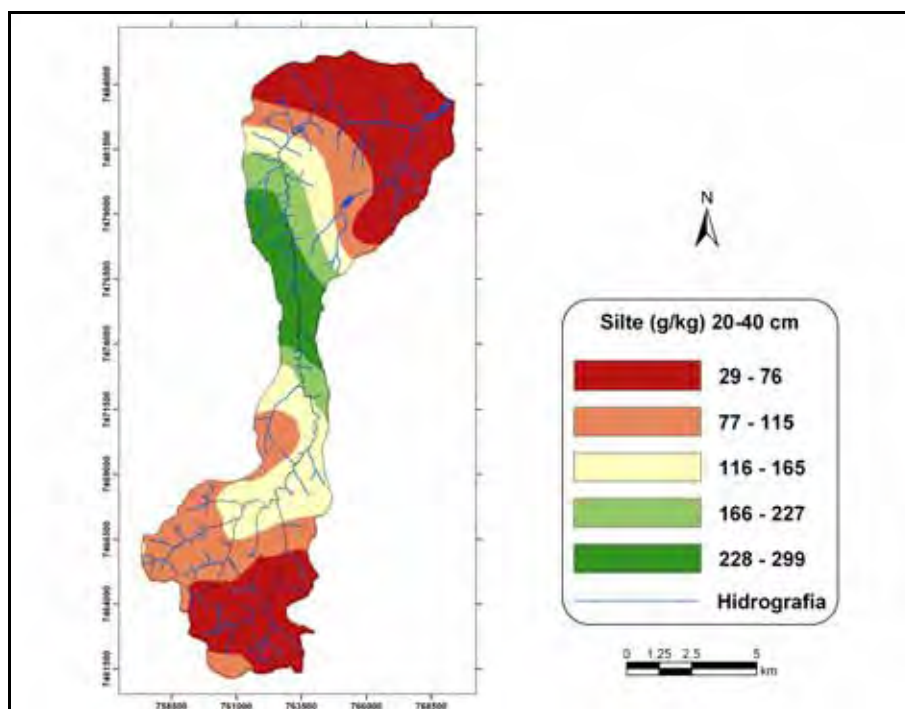
**Figura 31.** Mapa interpolado do atributo Argila (g/kg), profundidade 0-20cm.



**Figura 32.** Mapa interpolado do atributo Argila (g/kg), profundidade 20-40cm.



**Figura 33.** Mapa interpolado do atributo Silte (g/kg), profundidade 0-20cm.



**Figura 34.** Mapa interpolado do atributo Silte (g/kg), profundidade 20-40cm.

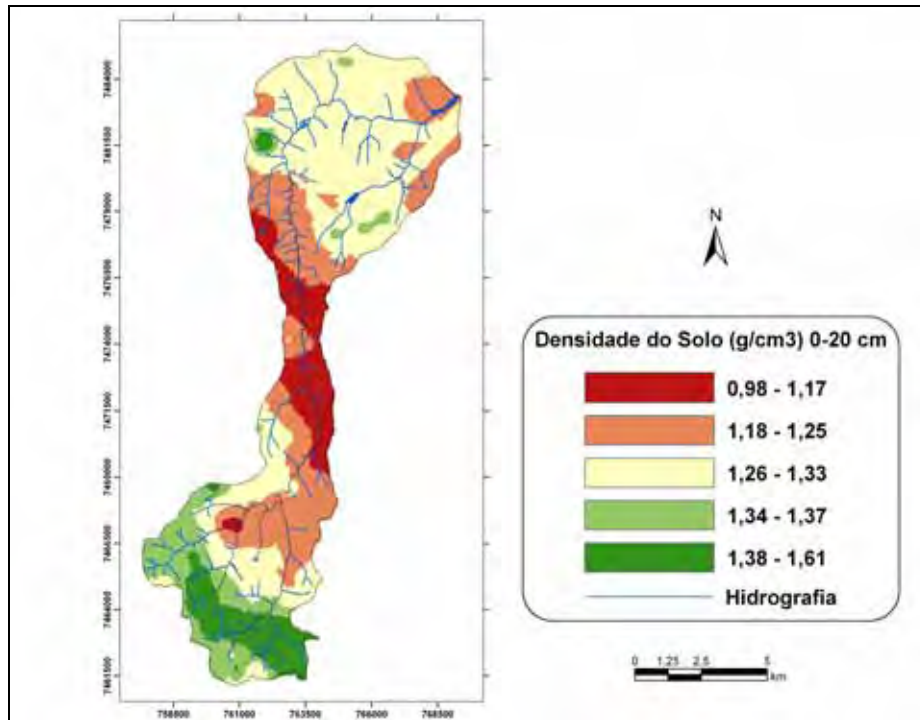


Figura 35. Mapa interpolado do atributo Densidade do Solo (g/cm<sup>3</sup>), profundidade 0-20cm.

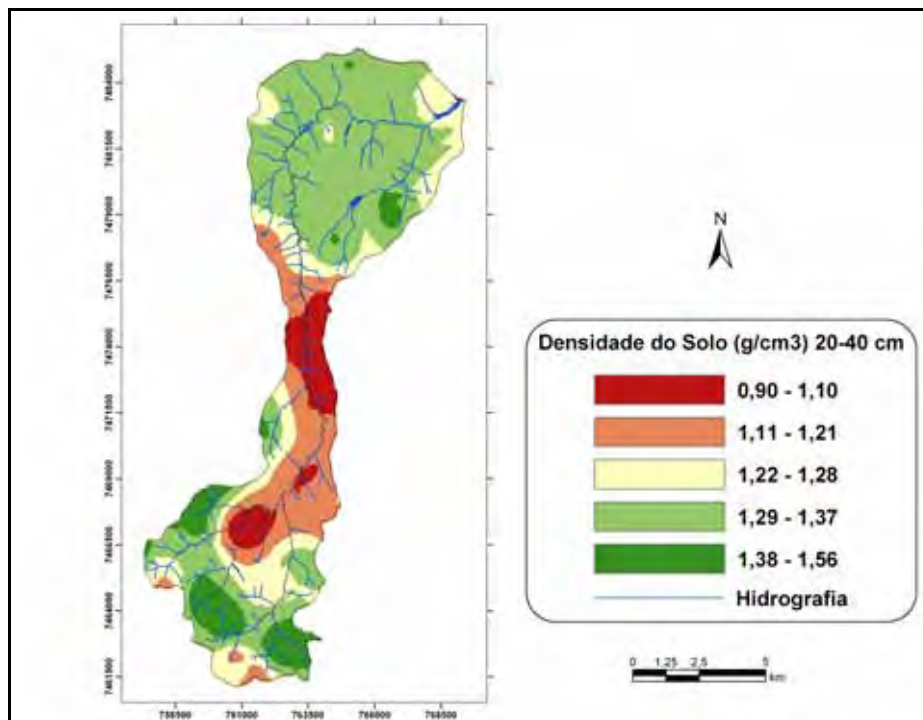
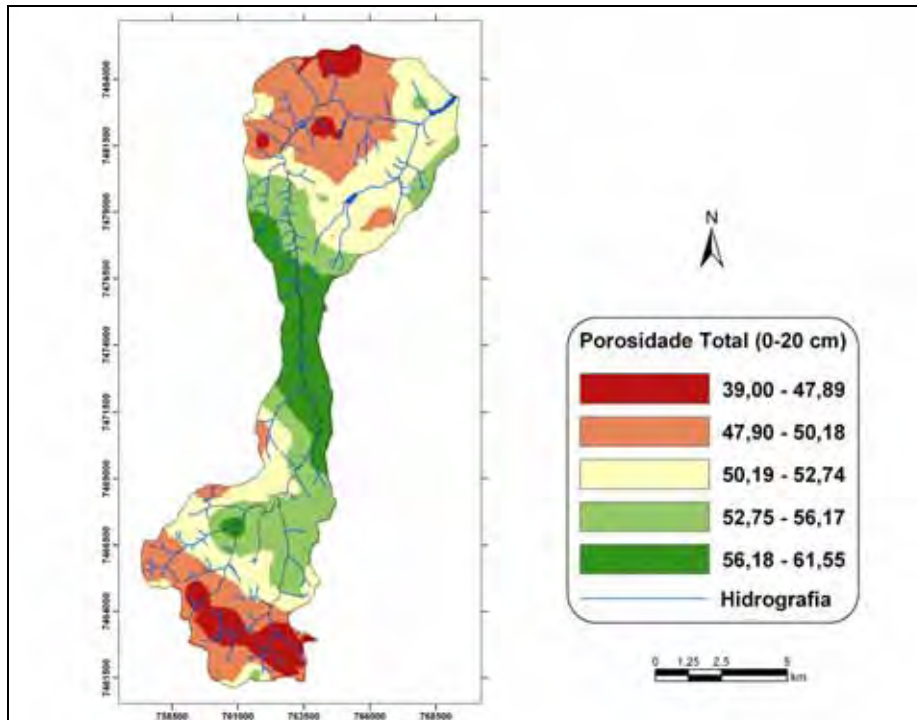
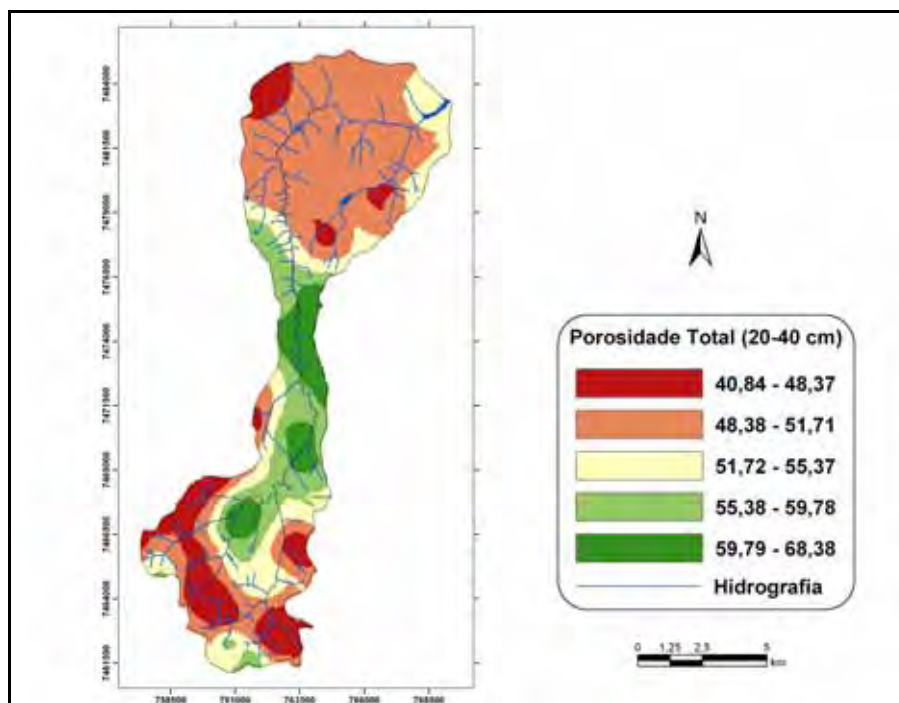


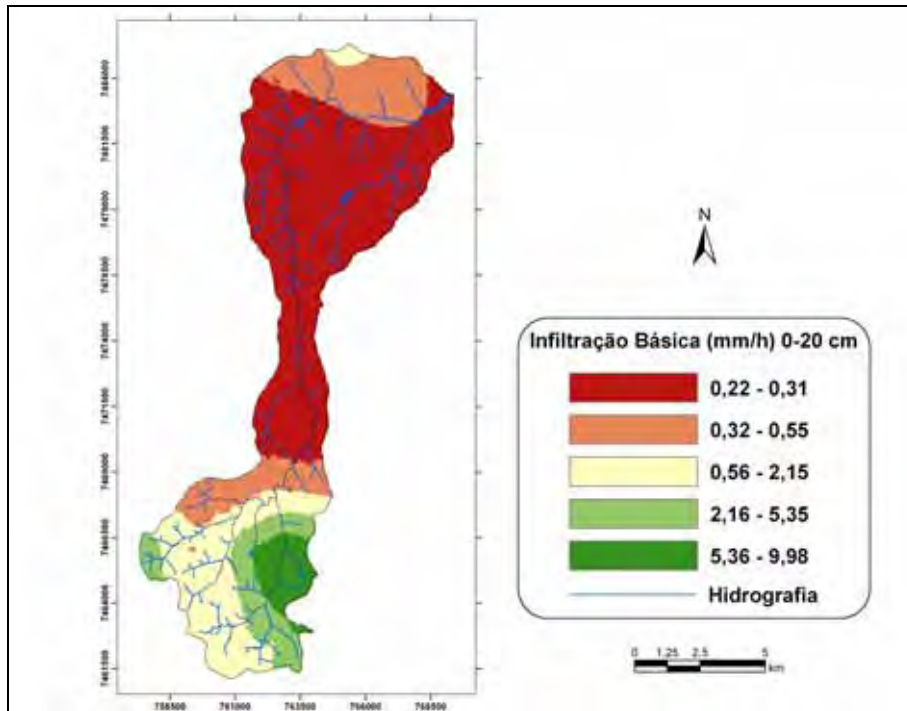
Figura 36. Mapa interpolado do atributo Densidade do Solo (g/cm<sup>3</sup>), profundidade 20-40cm.



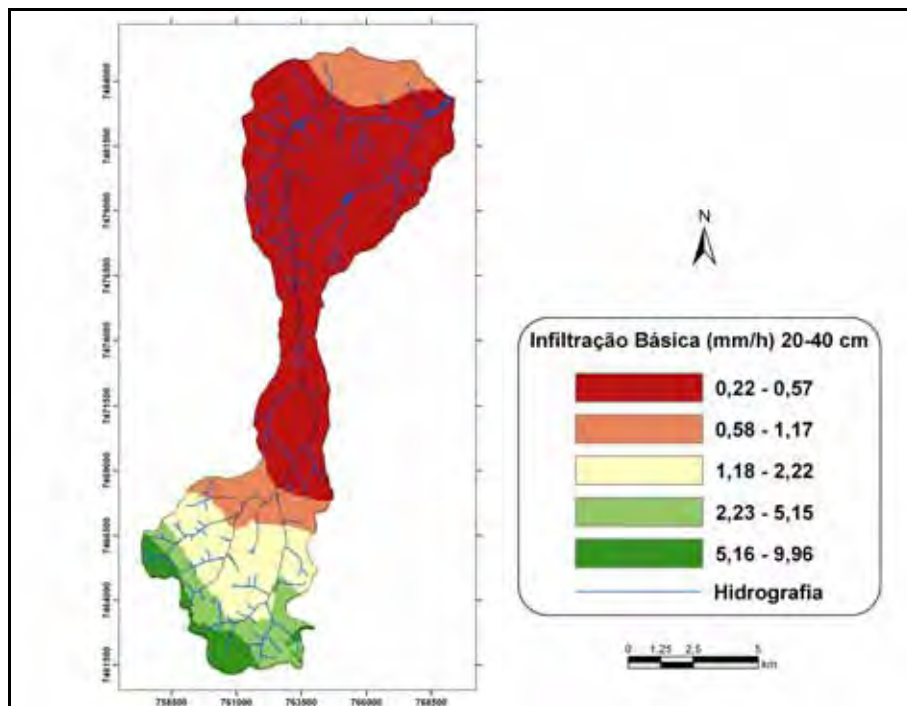
**Figura 37.** Mapa interpolado do atributo Porosidade Total, profundidade 0-20cm.



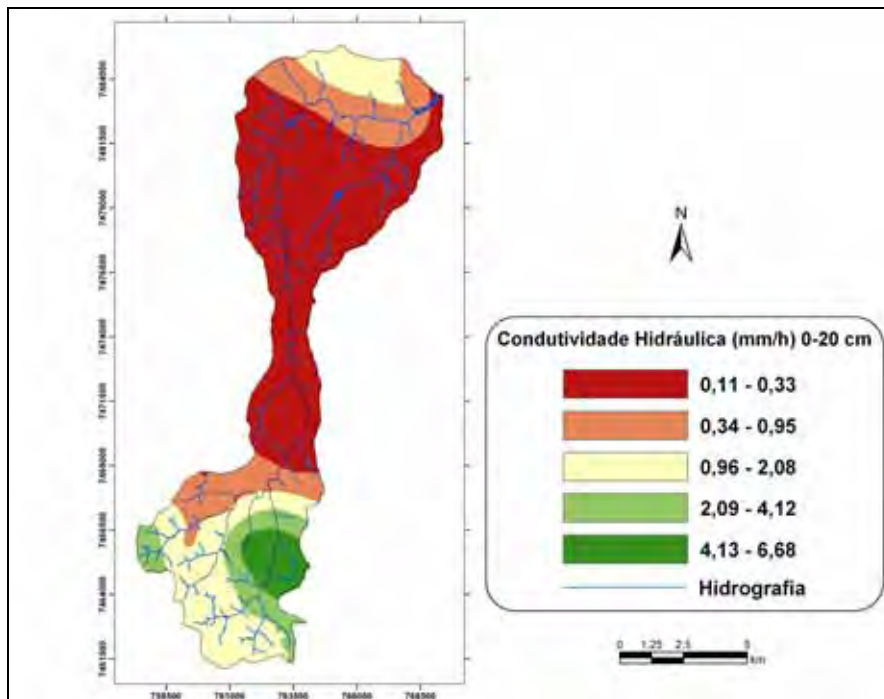
**Figura 38.** Mapa interpolado do atributo Porosidade Total, profundidade 20-40cm.



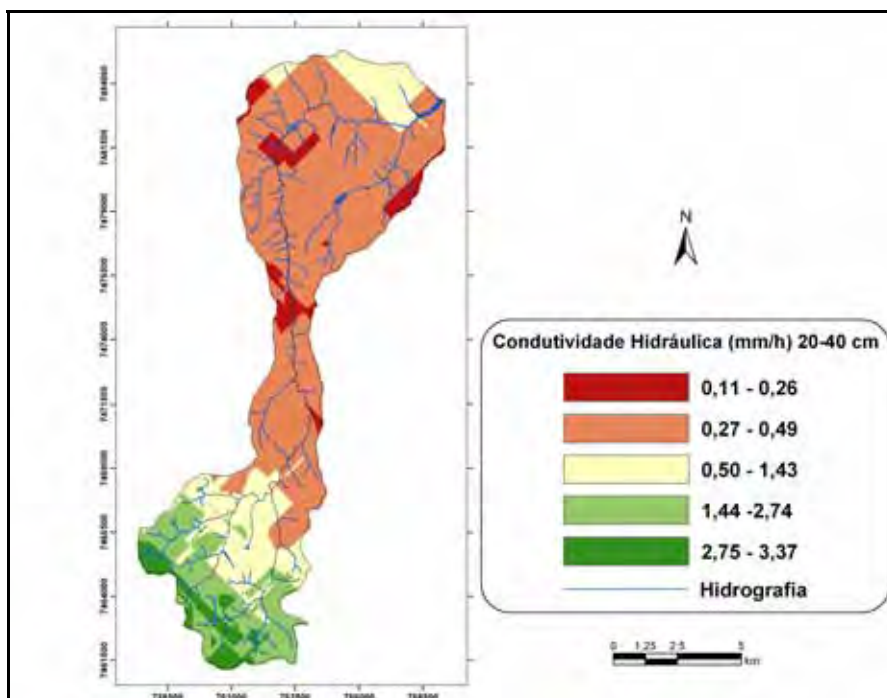
**Figura 39.** Mapa interpolado do atributo Infiltração Básica do solo (mm/h), profundidade 0-20cm.



**Figura 40.** Mapa interpolado do atributo Infiltração Básica do solo (mm/h), profundidade 20-40cm.



**Figura 41.** Mapa interpolado do atributo Condutividade Hidráulica (mm/h), profundidade 0-20cm.



**Figura 42.** Mapa interpolado do atributo Condutividade Hidráulica (mm/h), profundidade 20-40cm.

A krigagem foi um ótimo interpolador representando muito bem a situação textural dos solos da bacia Figuras 29, 30, 31, 32, 33 e 34.

Os mapas gerados para o atributo densidade do solo (Figuras 35 e 36), representam perfeitamente a realidade, onde na profundidade 0-20cm, os solos com maiores valores de densidade estão nas áreas de pastagens degradadas da cabeceira da bacia, as menores densidades representam os solos argilosos que estão manejados com agricultura, e os valores médios também estão em áreas agrícolas mecanizadas, como é o caso dos plantios de cana-de-açúcar ao norte da bacia.

Já na profundidade 20-40cm, vemos que os menores valores de densidade ainda estão relacionados com os solos argilosos manejados, porém nas áreas da porção norte da bacia verifica-se um aumento da densidade do solo já evidenciando a compactação pela excessiva utilização de máquinas no plantio da cana-de-açúcar.

As Figuras 37 e 38 mostram o mapeamento para o atributo porosidade total do solo.

Os parâmetros hídricos de infiltração básica e condutividade hidráulica do solo estão representados nas Figuras 39, 40, 41 e 42, e a interpolação por krigagem representou muito bem a situação obtida na leitura de campo com o permeâmetro de Guelph. A condutividade hidráulica também representou a realidade da situação obtida com leitura de campo do permeâmetro, sendo que no caso dos valores de condutividade da profundidade 20-40cm, fica evidente a problemática da obtenção de dados de condutividade com leituras em apenas uma época do ano, onde os fatores de umidade do solo e também de pressão atmosférica influem em muito os dados obtidos.

### **6.3 Modelagem espacial**

Com a digitalização das cartas planialtimétricas e a vetorização da área de estudo foram obtidas informações importantes para a análise espacial da bacia. A vetorização das curvas de nível e da rede de drenagem permitiu a criação do Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDT) (Figura 43), importante ferramenta na análise da superfície do terreno. O MDT possibilitou que fossem levantadas as altitudes em todos os pontos da bacia.

Na vetorização da rede de drenagem foram considerados todos os cursos d' água (perenes e intermitentes) e barramentos, totalizando uma extensão de aproximadamente 110 km em toda a rede de drenagem e uma superfície de 71 ha. O Ribeirão Lavapés, principal curso d' água da bacia percorre um trecho de 40 km, da sua nascente principal na área do Parque Municipal Zoobotânico até a foz na Represa de Barra Bonita, Rio Tietê.

A Figura 43 mostra o Modelo Digital de Elevação do Terreno da bacia do Ribeirão Lavapés com a rede drenagem.

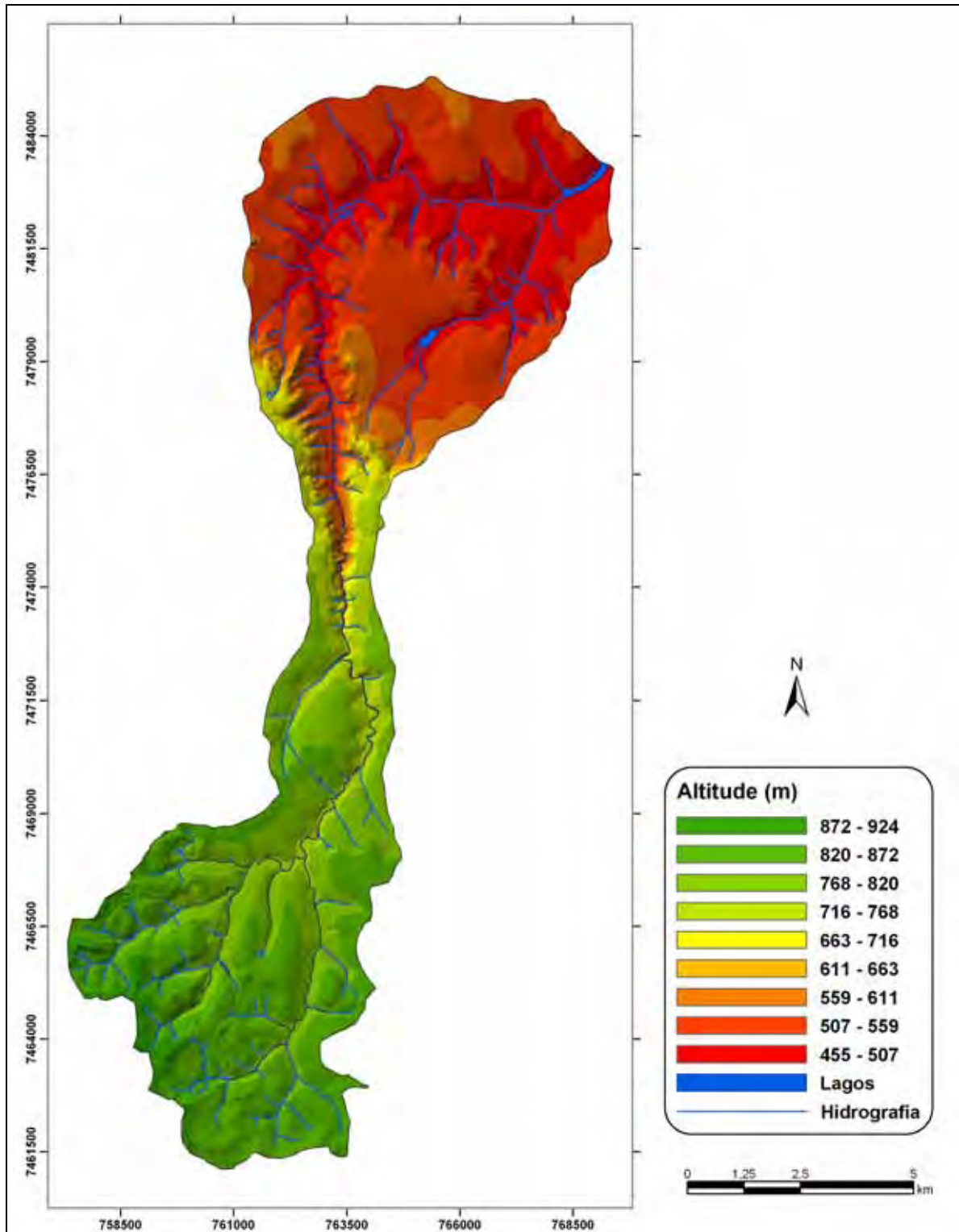


Figura 43. Modelo Digital de Elevação do Terreno da bacia do Ribeirão Lavapés.

O MDT foi obtido a partir da interpolação dos dados de altimetria, em metros. Como as curvas de nível apresentam uma equidistância vertical de 5 metros, faz-se necessário levantar a altitude em todos os pontos da bacia. O método de interpolação utilizado foi o TIN, Triangulated Irregular Network, estrutura mais indicada para a modelagem de superfícies contínuas utilizando dados vetoriais, no programa Arc GIS 8.2.

O MDT, além de ser um valioso instrumento na análise da superfície do terreno da bacia, também foi utilizado como base para a geração de diversos mapas temáticos, como o mapa de declividade, que foi reclassificado gerando o mapa de classes de declive segundo metodologia de conservação do solo (Figura 44).

Na Figura 44, a partir do mapa de declividade, foi criado o mapa de classes de declividade apresentando as classes segundo a metodologia de uso e conservação do solo.

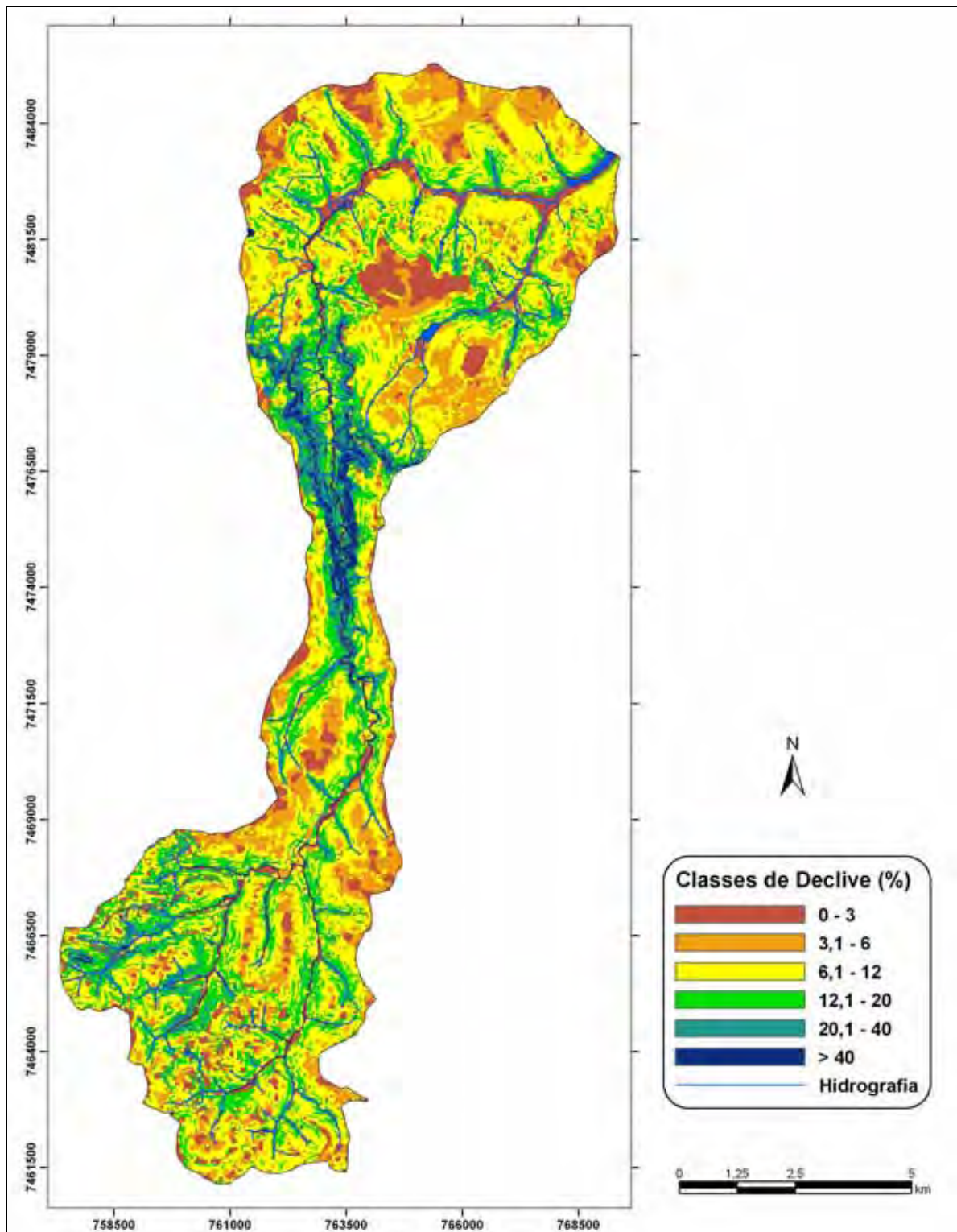
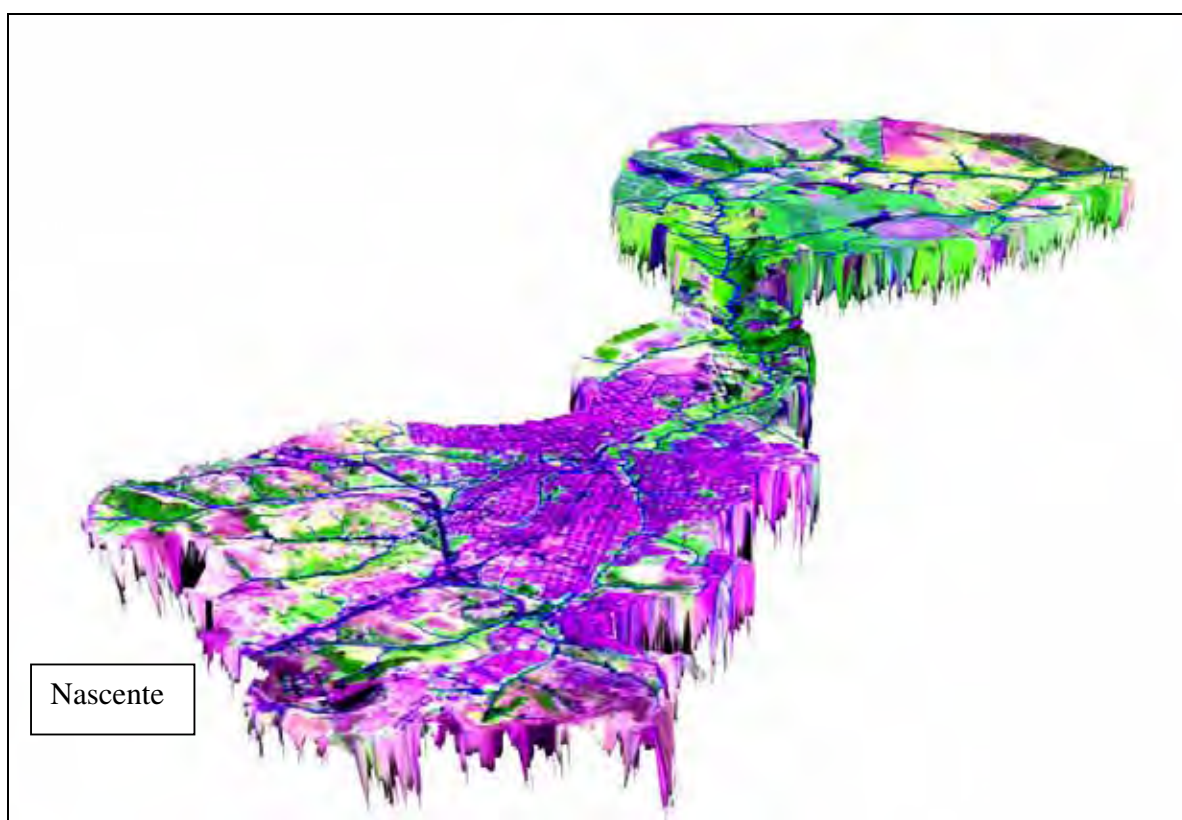


Figura 44. Mapa de Classes de Declive da bacia do Ribeirão Lavapés.

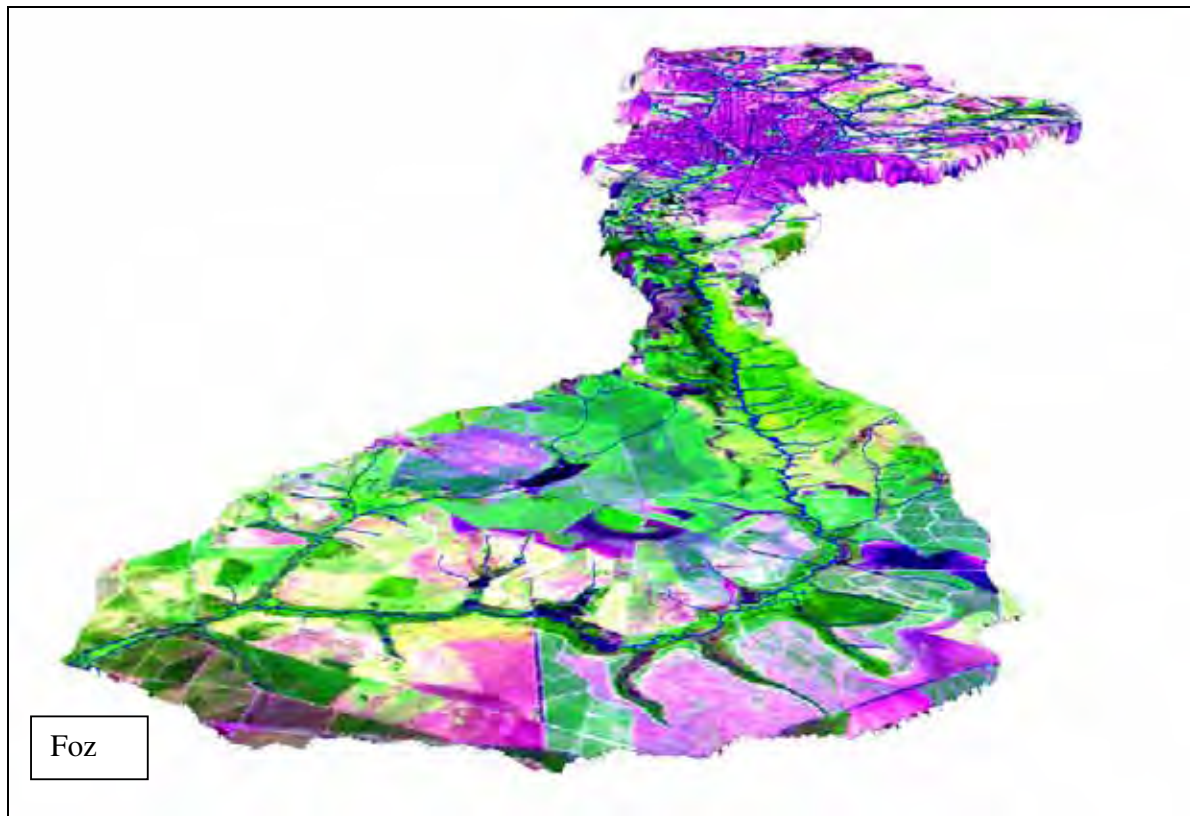
Da área total, cerca de 75% tem declividade variando de 0 até 12%. As maiores declividades são encontradas na parte média da bacia, onde o Ribeirão Lavapés atravessa o basalto no início do reverso da Cuesta de Botucatu. Nesta região existem pontos com declividades superiores a 45°.

Nas Figuras 45 e 46 a bacia do Ribeirão Lavapés é visualizada em visão tridimensional.



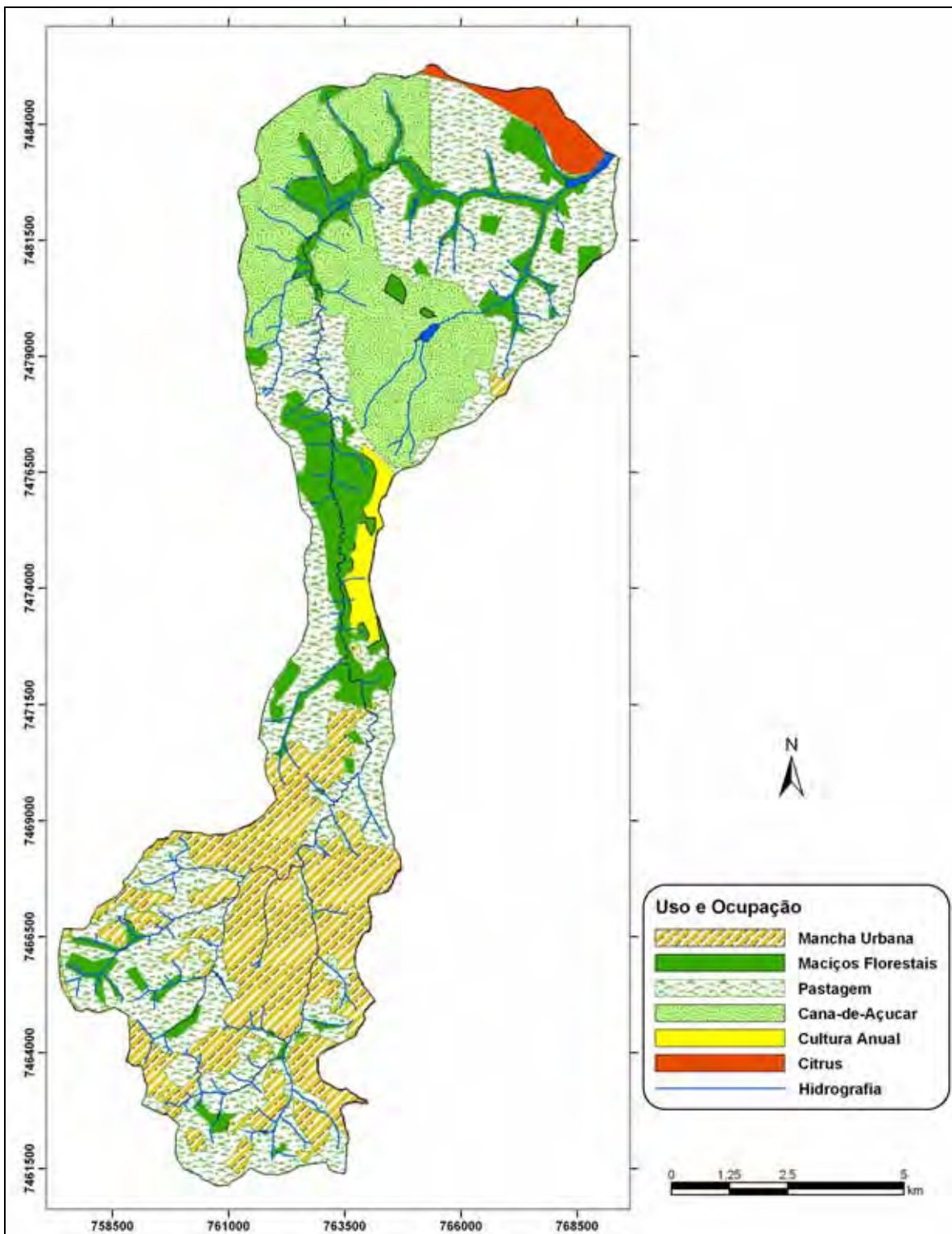
**Figura 45.** Bacia do Ribeirão Lavapés em 3D, com exagero vertical de 5x, mostrando as áreas das nascentes e mancha urbana em primeiro plano.

Com as imagens da bacia em 3D, pode-se observar com clareza as formações rochosas do Front da Cuesta na garganta do Ribeirão Lavapés, onde a declividade se acentua formando um grande canal. Visualiza-se também a geografia da bacia, permitindo obter as informações com relação ao ambiente construído, tanto com relação à mancha urbana como também com relação às áreas de culturas agrícolas.



**Figura 46.** Bacia do Ribeirão Lavapés em 3D, sem exagero vertical, mostrando a área da foz do Ribeirão Lavapés na Represa de Barra Bonita, Rio Tietê.

Tendo como ferramentas as fotografias aéreas ortorretificadas, foi efetuada a digitalização dos usos do solo encontrados na bacia. Em toda a bacia do Ribeirão Lavapés foram determinados 6 tipos de uso do solo predominantes. Na Figura 47, está exposta a distribuição do uso do solo na área de estudo.



**Figura 47.** Mapa da distribuição do uso atual da bacia do Ribeirão Lavapés, no ano 2000.

No Quadro 11, estão apresentadas as distribuições do uso atual na bacia.

**Quadro 11.** Distribuição do uso das terras e área.

<b>Uso do Solo</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área da Bacia (%)</b>
Mancha Urbana	2.324,7	21,72
Pastagem	4.353,0	40,67
Cana de Açúcar	2.152,5	20,11
Maçãos Florestais	1.525,5	14,25
Citrus	222,5	2,08
Culturas anuais	166,5	1,55
<b>Total</b>	<b>10.704</b>	<b>100%</b>

O desenvolvimento urbano que caracteriza a parte inicial desta bacia, bem como todas as áreas das nascentes, são marcadas por um excesso de impermeabilização do solo, que gerou um processo crescente de erosões em estado avançado já caracterizado por voçorocas de grandes dimensões (Figura 48). Todo este processo causou assoreamentos em diversos cursos d'água, (Figura 49), como pode se verificar pela modificação da foz do Ribeirão Lavapés.



**Figura 48.** Voçoroca do Jardim Evelin, área de nascente do Ribeirão Lavapés.



**Figura 49.** Assoreamento da nascente do Córrego da Água Fria.

As perdas de solo ocorridas na natureza têm sido aceleradas e intensificadas pelo uso inadequado do solo, desmatamentos e a urbanização (CARVALHO, 1994). A ocupação inadequada dos terrenos das várzeas e fundos de vale e um sistema de drenagem e infra-estrutura insuficientes, que não acompanham a urbanização, além do desrespeito quanto às legislações ambientais evidenciam o caos ambiental e a falta de planejamento da ocupação desta bacia (Figura 50).



**Figura 50.** Construções irregulares dentro de A.P.P do Ribeirão Lavapés, no centro da cidade de Botucatu.

Os maciços florestais (matas nativas e áreas de reflorestamentos), representam apenas cerca de 14,25% da cobertura de toda a bacia do Ribeirão Lavapés, deve-se ressaltar que esta distribuição ocorre principalmente nas áreas de declive mais acentuado da bacia. Fator relevante, visto que a cobertura vegetal, principalmente quando composta de florestas, segundo Netto (1998), apresentam os maiores valores de infiltração de água no solo, diminuindo o escoamento superficial e protegendo assim o solo dos processos erosivos.

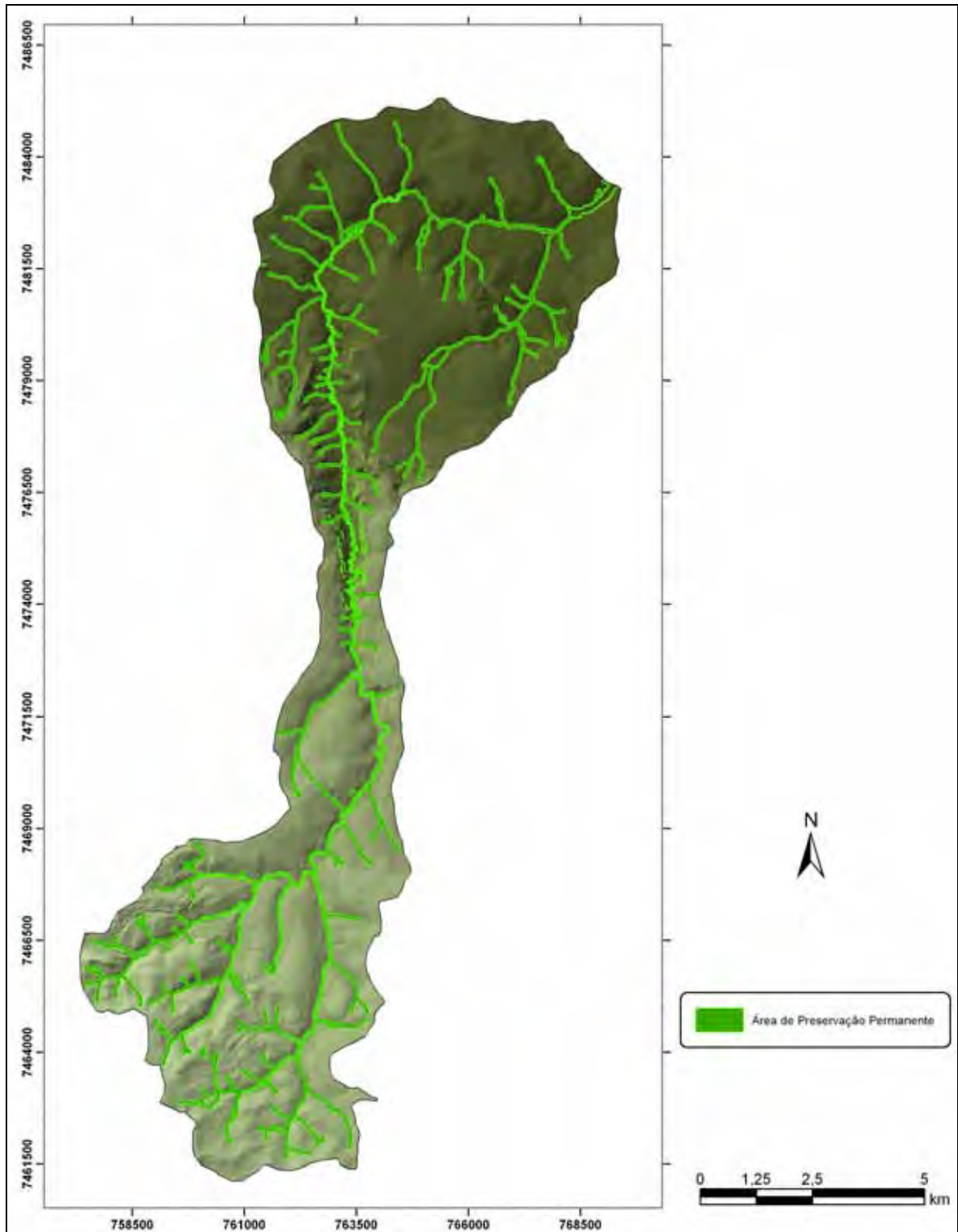
Bertoni & Lombardi Neto (1990) consideraram a cobertura vegetal uma defesa natural de um terreno contra a erosão, sendo assim, afirmaram que após um desmatamento são verificadas alterações importantes nas taxas de erosão, devido à ação direta da chuva no solo.

Pela distribuição dos usos na bacia detectou-se que a maior parte está sendo utilizada com pastagens em estado avançado de degradação devido ao manejo incorreto dessas áreas, fator que pode determinar altas perdas de solo e formação de erosões. Também é evidenciado nestas áreas uma baixa fertilidade com teores reduzidos de M.O. A diminuição no teor de matéria orgânica afeta não só a fertilidade natural do solo, mas também diminui a sua resistência ao impacto das gotas de chuva, ocasionando um aumento nas taxas de escoamento superficial (GUERRA, 1998).

Em situações onde ocorre o escoamento superficial, a mata ciliar atua como barreira vegetativa, diminuindo a capacidade de transporte de sedimentos. A maior parte dos sedimentos em suspensão nos rios provém das próprias margens, confirmando a importância da mata ciliar, como agente estabilizador. A presença de mata ciliar em áreas de pastagens atua como obstáculo ao acesso do gado às margens, reduzindo a destruição das mesmas (SIMÕES, 2001).

Segundo o Código Florestal, Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, no artigo 2º, consideram-se de preservação permanente, as florestas e demais formas de vegetação natural situadas ao longo dos rios ou de qualquer curso d' água desde o seu nível mais alto em faixa marginal cuja largura mínima seja de 30 metros para os cursos d' água de menos de 10 metros de largura; ao redor das lagoas, lagos ou reservatórios d'água naturais ou artificiais; nas nascentes, ainda que intermitentes e nos chamados olhos d'água, qualquer que seja a sua situação topográfica, num raio mínimo de 50 metros de largura. E ainda, nas encostas ou partes destas com declive superior a 45°, equivalente a 100 por cento na linha de maior declive.

Na bacia do Ribeirão Lavapés encontra-se todas estas situações, onde as Áreas de Preservação Permanente representam 9,2% da área da bacia, ou seja, 982,6 ha. A Figura 51 ilustra a localização obrigatória das A.P.P.s na bacia.



**Figura 51.** Mapa demonstrativo da localização obrigatória das Áreas de Preservação Permanente.

Pelo cruzamento do mapa de uso atual das terras (Figura 47), com o mapa da localização obrigatória da área de preservação permanente (Figura 51), obteve-se o mapa de adequação para se recompor as áreas que se apresentam fora do regulamentado pela legislação ambiental.

Com este plano é possível verificar que dos 982,6 ha do adequado em relação às áreas de preservação permanente, estão em situação regular cerca de 336,8 ha, ou seja, para que a bacia do Ribeirão Lavapés entre em conformidade com a legislação ambiental será necessário recompor uma área de 645,8 ha, representando 6% da área total da bacia.

A Figura 52 apresenta a situação da bacia do Ribeirão Lavapés quanto a necessidade de adequação das áreas de preservação permanente.

A situação se complica ainda mais se, pelo mesmo Código Florestal, for avaliada a situação atual da Reserva Legal da bacia, que pela legislação determina que 20% da área esteja sobre cultivos de floresta (reserva), o que representa uma área de 2.141 ha, porém atualmente só se encontra 1.188,7 há, faltando, portanto, recompor 9% de reserva, ou uma área de 952 ha. É importante lembrar que segundo a legislação a Reserva Legal deve estar estabelecida descontando-se as áreas de preservação permanente.

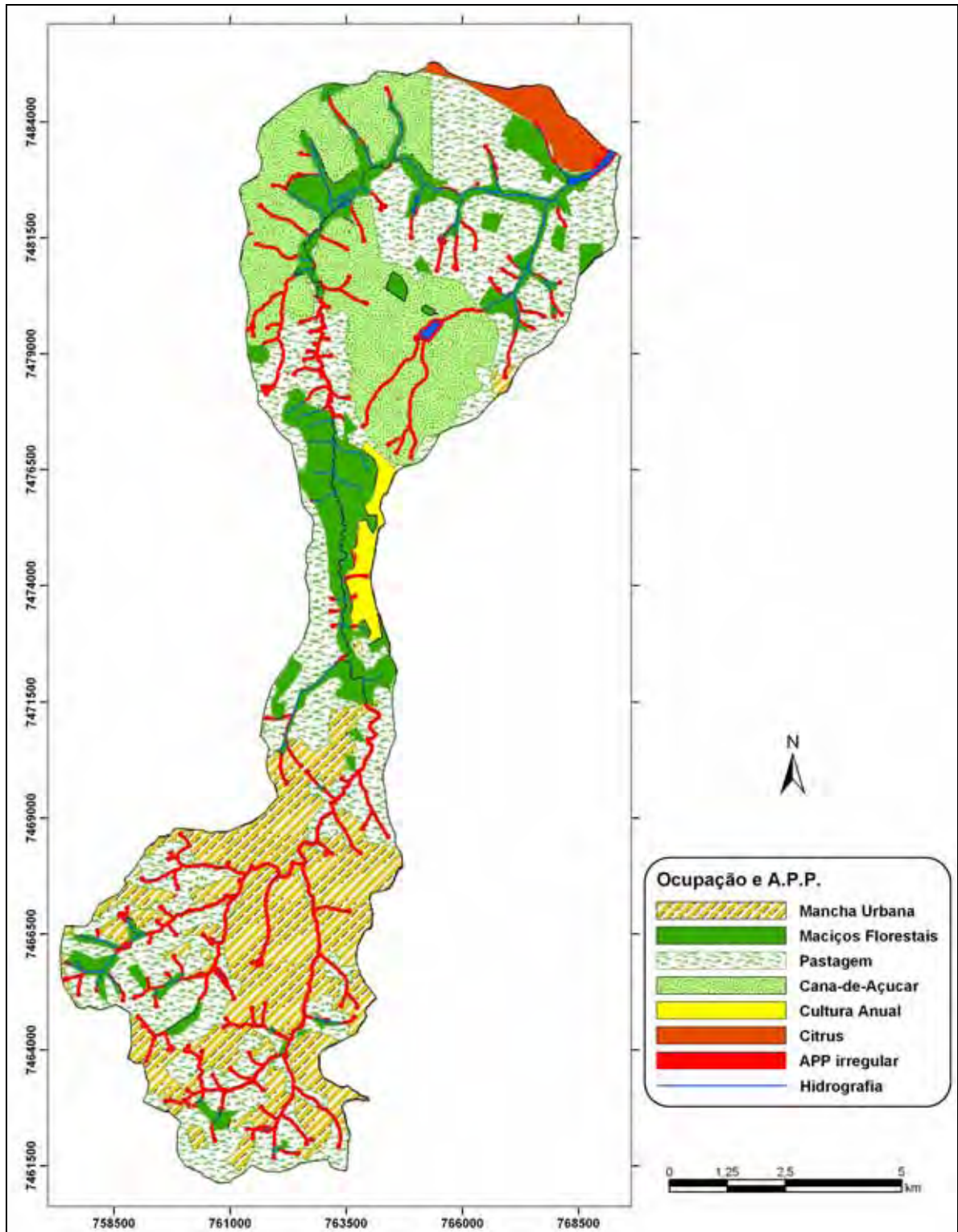


Figura 52. Mapa de adequação da recomposição das áreas de preservação permanente.

O uso adequado da terra é o primeiro passo em direção a sustentabilidade ambiental. Para isso, deve-se empregar diferentes tipos de manejo para cada parcela de terra de acordo com a sua capacidade de sustentação e produtividade econômica, de forma que os recursos naturais sejam colocados à disposição do homem para melhor uso e benefício, procurando ao mesmo tempo preservar estes recursos para gerações futuras (LEPSCH et al., 1991).

Segundo Lepsch et al. (1991), classifica-se os solos com a finalidade de ordenar os conhecimentos atuais de maneira concisa e simples. Assim, solos semelhantes quanto a determinadas características, ou semelhantes quanto ao seu comportamento, podem ser agrupados em classes. A Capacidade de Uso expressa o potencial de utilização agrícola, sendo estabelecidos com base na intensidade de uso das terras.

As classes de capacidade de uso são baseadas nas alternativas de uso e no grau das limitações, onde terras comportando as mesmas alternativas de uso e apresentando limitações semelhantes, são incluídas na mesma classe ( I à VIII ).

As terras próprias para culturas, pastagens e florestas podem se enquadrar nas seguintes classes:

- **Classe I:** Terras aparentemente sem problemas de conservação (verde *claro*). Inclui as terras altamente produtivas, praticamente planas, fáceis de serem trabalhadas, sem erosão aparente, sem pedras e bem drenadas. Não exigindo práticas especiais de melhoramento ou proteção, onde se recomenda apenas: rotação de culturas, adubação de manutenção e tratos culturais normais (plantio em nível).
- **Classe II:** Terras com problemas simples de conservação (amarelo). Inclui as terras produtivas, com declives suaves, facilmente trabalháveis, erosão ligeira, podendo apresentar pedras ocasionais (menos de 1% da área). Exigem práticas simples de conservação, tais como: plantio em nível; culturas em faixas; uso de fertilizantes e corretivos para aumentar a fertilidade.
- **Classe III:** Terras com problemas complexos de conservação (*vermelho*). Inclui as terras com produtividade pelo menos razoável, podendo apresentar declive e erosão moderados, ser planas e mal drenadas, apresentar pedras e sulcos de erosão ou estar

temporariamente encharcadas. Exigem práticas intensivas tais como: terraceamento; cordões de contorno; remoção de pedras; drenagem artificial; irrigação; adubação e calagem; mesmo em pastagem é importante a construção de sulcos em nível.

- **Classe IV:** Terras com sérios problemas de conservação (azul). Inclui as terras pouco produtivas, com declives fortes, erosão acentuada, solos rasos ou com bastante pedras. Cultivados ocasionalmente ou em extensão limitada, sendo mais bem aproveitadas para culturas perenes ou pastagens, com práticas intensivas de melhoramentos ou proteção.
- **Classe V:** Terras próprias para pastagens, florestas e silvicultura, sem restrições especiais de uso. (*verde escuro*). Inclui as terras de boa produtividade, planas e não sujeitas à erosão, mas não se prestam para a agricultura por serem excessivamente úmidas ou sujeitas a inundações frequentes ou por serem muito pedregosas. Entretanto, podem ser usadas para pastagens e florestas sem restrições especiais. Portanto, pela sua própria definição, essas terras constituem um caso muito especial e raro.
- **Classe VI:** Terras próprias para pastagens e florestas, com restrições de uso. (*alaranjado*). Inclui as terras de baixa produtividade, ou então com alta produtividade, mas com outros problemas tais como, pedregosas, muito inclinadas ou severamente erodidas. Embora impróprias para o cultivo, essas terras podem sustentar uma vegetação permanente, como pastagens e florestas com restrições moderadas de uso. As restrições referentes às pastagens são: ajuste do número de animais; divisão dos pastos; rotação do pastoreio; adubação das pastagens fracas e práticas mecânicas para o controle de erosão.
- **Classe VII:** Terras de pastagens ou florestas com severas restrições de uso (*marrom*). Inclui as terras de produtividade variável, mas em geral muito íngremes, severamente erodidas ou muito pedregosas. Exigem grandes cuidados quando utilizadas para pasto ou floresta. A maior parte dessas terras são indicadas para florestas.
- **Classe VIII:** Terras impróprias para culturas, pastagens ou exploração florestal, podendo servir apenas para abrigo da fauna silvestre ou recreação. (*Roxo*).

Segundo metodologia utilizada por Zimback & Rodrigues (1993), gerou-se o mapa de classes de capacidade de uso para a bacia do Ribeirão Lavapés, utilizando-se do mapa interpolado de condutividade hidráulica com o mapa de fertilidade aparente para a profundidade 0-20cm e ainda o mapa de classes de declive da bacia. No Arc GIS 8.2, através do sistema determinou-se as classes de capacidade de uso. A Figura 53 representa o mapa de classes de capacidade de uso.

Ainda através do Arc GIS 8.2, foi possível gerar o conflito de irregularidade com relação ao uso atual e a determinação das classes de capacidade de uso. Esta análise permitiu identificar as áreas de cultivo que não seguem os critérios básicos de uso e conservação do solo, e prejudicam a qualidade ambiental da bacia criando impactos e não respeitando a capacidade produtiva das terras da bacia.

No Quadro 12, estão apresentadas as distribuições em área e porcentagem do uso atual que conflitam com as classes de capacidade de uso na bacia.

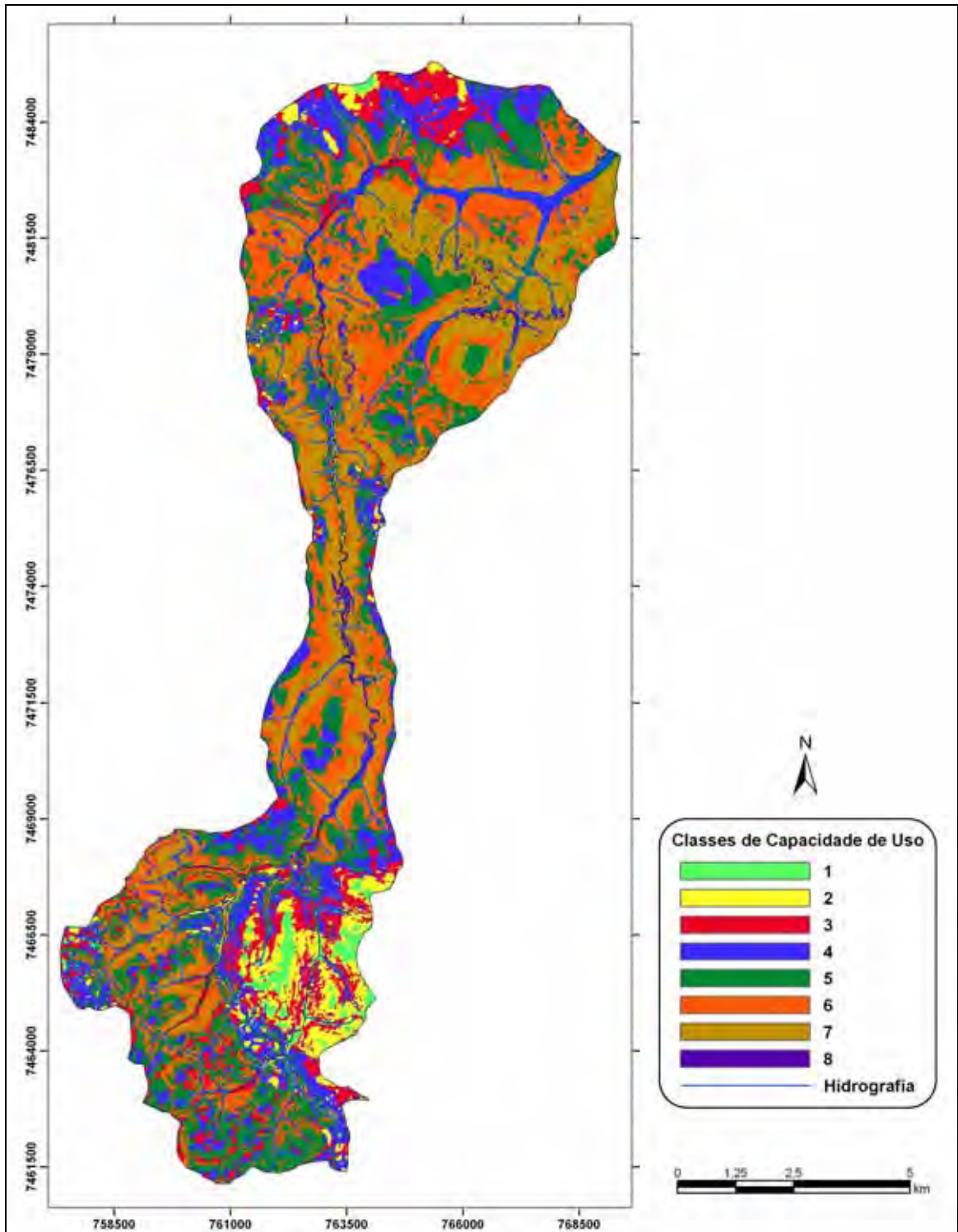
Através do Quadro 12, pode-se verificar que os cultivos agrícolas ocupam cerca de 16,33% de áreas impróprias para este uso. Outra análise importante deste estudo é verificado com relação a mancha urbana que invade 10,22% de terras de excelente capacidade de uso para fins agrícolas. Estes resultados mais uma vez confirmam que a falta de planejamento ambiental traz grandes impactos as condições de sustentabilidade das bacias hidrográficas.

**Quadro 12.** Distribuição dos conflitos do uso das terras e área, em relação às classes de capacidade de uso.

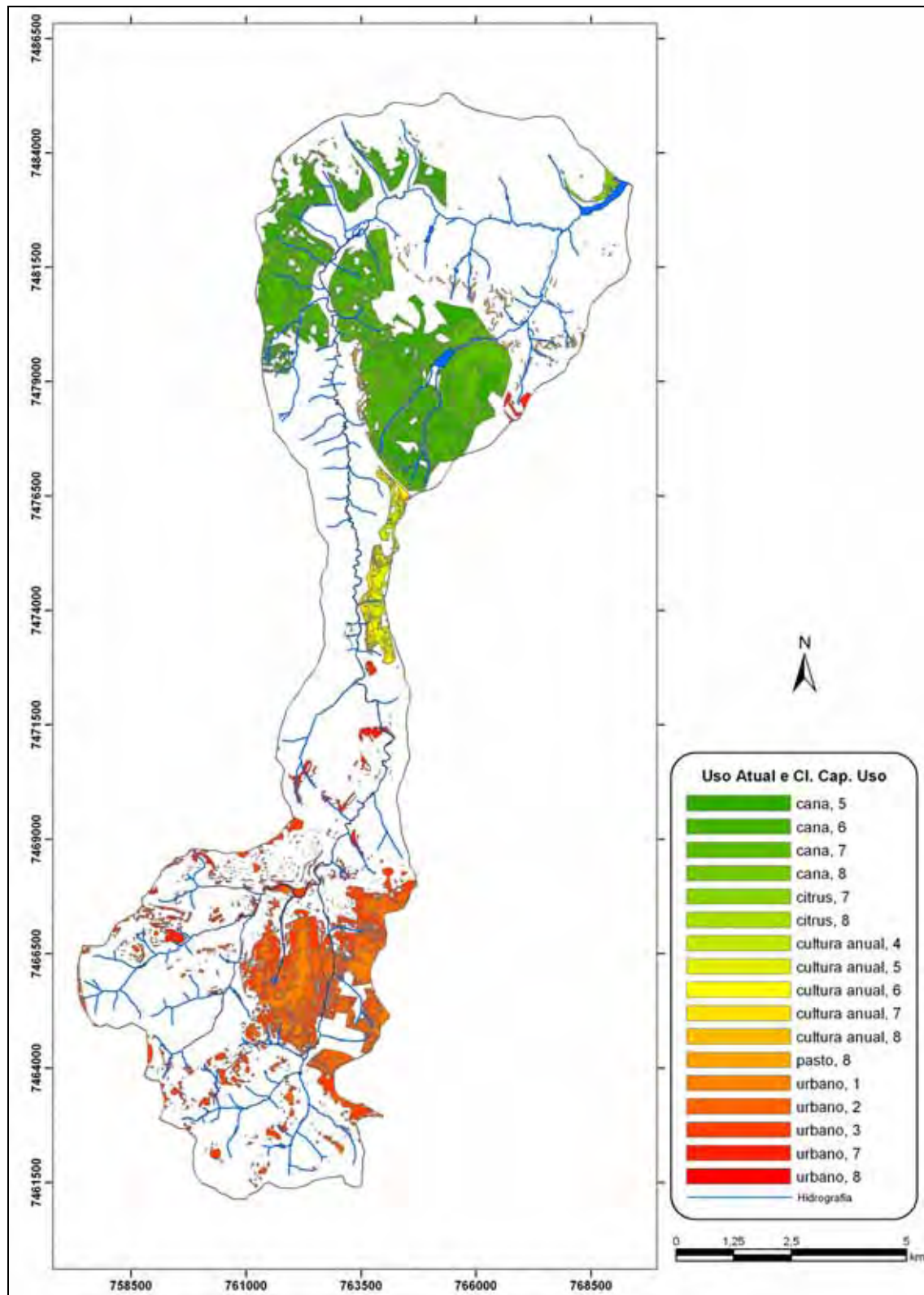
<b>Uso do Solo</b>	<b>Classe de Capacidade de Uso</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área da Bacia (%)</b>
Cana de Açúcar	5	567,73	5,31
	6	681,42	6,43
	7	315,18	2,91
	8	13,14	0,13
Culturas anuais	4	16,85	0,16
	5	1,87	0,02
	6	33,15	0,31
	7	50,25	0,47
Citrus	7	30,83	0,29
	8	31,21	0,29
Pastagem	8	1,48	0,01
Mancha Urbana	7	157,20	1,47
	8	320,08	2,99
	3	424,65	3,97
	2	121,19	1,13
	1	1,98	0,02

A Figura 53 mostra o mapa de Classes de Capacidade de Uso para a bacia do Ribeirão Lavapés, onde nota-se que a bacia possui uma aptidão florestal em suas terras, isto em função da declividade que no geral está entre 6 a 12% e também devido a baixa fertilidade aparente e aos problemas de permeabilidade principalmente na profundidade 0-20cm.

Na Figura 54 é possível visualizar as áreas de produção agrícolas e da mancha urbana que apresentam problemas por não seguirem os critérios de uso e conservação do solo.



**Figura 53.** Mapa de Classes de Capacidade de Uso para a bacia do Ribeirão Lavapés.



**Figura 54.** Mapa de conflito entre o uso atual e as classes de capacidade de uso.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- as técnicas de geoprocessamento e a utilização da krigagem como interpolador permitiram a construção de banco de dados versáteis e de fácil recuperação, principalmente na confecção de mapas de fertilidade aparente;
- pela análise dos planos de informação nota-se que as áreas de preservação permanente a serem recuperadas na bacia representam 6% da área total, onde o estabelecido na legislação ambiental está em torno de 9,2% do total da área;
- ocorre o mesmo problema nas áreas de reserva legal. A bacia possui 11% atualmente e o ideal seria de no mínimo 20% da área total;
- o mapeamento das características da macrodrenagem permitiram avaliar as interfaces da geografia da bacia com o ambiente natural e o construído (crescimento urbano e utilização agrícola);
- o mapeamento dos parâmetros pedológicos e ambientais gerou argumentos para fundamentar decisões no planejamento, que permitam minimizar os impactos ambientais da ocupação desordenada da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUFIRASSI, M., MARIÑO, M. A. Kriging of water levels in the Souss Aquifer, Morocco. *Math. Geol.*, v.15, p.537-50, 1983.

ALMEIDA, F. F. M. *Perfil geológico do Estado*. In: IGC, Geologia do Estado de São Paulo. Bol. n. 41, p. 254-262, 1964.

ASARE, S. N., RUDRA, R. P., DICKINSON, W. T., WALL, G. J. *Seasonal variability of hydraulic conductivity*. Translations of ASAE, v.36, p.451-457, 1993.

ASSAD, E.D., SANO, E.E., MEIRELLES, M.L., MOREIRA, L. *Estruturação de dados geoambientais no contexto de microbacia hidrográfica*. In: ASSAD, E.D., SANO, E.E. Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura. 2.ed. Planaltina: Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados – Embrapa, 1998. p.119-37.

AUTODESK. *AutoCAD Map 5*. San Rafael, 2002.

BAVER, L. D. *Soil physics*. John Wiley e Sons, New York, p.224-303, 1966.

BERNARDO, S. *Manual de Irrigação*. Imprensa Universitária, Viçosa, 1989. 596p.

BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo. São Paulo*. Editora Ícone. 1990. p.170-241.

BONHAM-CARTER, G.F. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Oxford: Pergamon Press, 1994. 414p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas. Comissão de Solos. *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo*, Brasília, Bol. n. 12, 1960.

BRIDGES, E. M., DOORNKAMP, J. C. Morphological mapping and the study of soil patterns. *Geography*, v.48, n.1, p.175-181, 1963.

BRUAND, A., BAIZE, D., HARDY, M. Prediction of water retention properties of clayey soil: validity of relationship using a single soil characteristic. *Soil Use and Manag.*, Amsterdam, v.10, n.3, p.99-103, 1994.

BURGESS, T.M., WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties, 1. The semi-variogram and punctual kriging. *J. Soil Sci.*, v. 31, p. 315-331, 1980.

CÂMARA, G. *Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica*. Campinas, Instituto de Computação - UNICAMP, 197p. 1996.

CÂMARA, G., MEDEIROS, J.S. *Princípios básicos em geoprocessamento*. In: ASSAD, E.D., SANO, E.E. Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura. 2.ed. Planaltina: Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados – Embrapa, 1998. p.3-11.

CÂMARA, G., ORTIZ, M.J. *Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA: CARTOGRAFIA, SENSORIAMENTO E GEOPROCESSAMENTO, 27, 1998, Poços de Caldas. Anais...Lavras: UFLA, 1998. p.59-88.

CAMBARDELLA, C. A., MOORMAN, T. B., NOVAK, J. M., PARKIN, T. B., KARLEN, D. L., TURCO, R. F., KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.58, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, S.P. *Planejamento agroambiental de uma microbacia hidrográfica utilizando um sistema de informações geográficas*. Botucatu, 2001. 137p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372p.

CARVALHO, W. A. *Relações entre relevo e solos da bacia do rio Capivara – município de Botucatu – SP*. Botucatu, 1981. 193p. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP.

CARVALHO, W.A., JIM, J. *Áreas de proteção ambiental: Região da “Serra de Botucatu” e Região da “Serra de Fartura”*. Botucatu: Instituto Básico de Biologia, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1983. 47p.

CASTRO, J. F. M. *Princípios de cartografia sistemática, cartografia temática e sistema de informação geográfica (SIG)*. IGCE, UNESP, Rio Claro, 1996. 40p.

CHIEN, Y. J., LEE, D. Y., GUO, H. Y., HOUNG, K. H. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Sci.*, v. 162, p. 291-298, 1997.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica das bacias hidrográficas. *Notícias Geomorfológicas*. Campinas, v.9, p.35-64, 1969.

CHRISTOFOLETTI, A. A variabilidade espacial e temporal da densidade de drenagem. *Notícias Geomorfológicas*. Campinas, v.21, n.42, p.3-22, 1981.

CHRISTOFOLETTI, A. *Modelagem de sistemas ambientais*. 1.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1999. 236p.

CIOLLARO, G., ROMANO, N. Spatial variability of the hydraulic properties of a volcanic soil. *Geoderma*, v.65, p.263-82, 1995.

DAINESE, R.C. *Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao estudo temporal do uso da terra e na comparação entre classificação não-supervisionada e análise visual*. Botucatu, 2001. 186p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

DEUTSCH, C. V., JOURNEL, A. G. *GSLIB. geostatistical software library*. New York: Oxford Univ. Press, 1998.

EASTMAN, J.R. *IDRISI 32 for Windows: guide to GIS and image processing*. Massachusetts: Clark University, 1999. 2v.

ELRICK, D. E., REYNOLDS, W. D. Methods for analyzing constant-head well permeameter data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.56, p.320-323, 1992.

ELRICK, D. E., REYNOLDS, W. D., TAN, K. A. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Ground Water Monitoring Review*, 9:184-193, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – *Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Critérios para distinção de classe de solos e de fases de unidades de mapeamento – normas em uso pelo SNLCS*, Doc. N. 11, Rio de Janeiro, 1988. 65p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de método de análises de solo*. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1999. 412p.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. *Arc GIS 8.2*. California, 1996. 340p.

ENGLUND, E. J., SPARKS, A. *Geo-EAS*. Users's guide. Las Vegas: USEMS, 1988. sp.

FERREIRA, P. A. *Drenagem*. Brasília, ABEAS, 1990. 86p.

GABRIEL, J. L. C. *Composição florística e estrutura fitossociológica do estrato arbóreo de mata mesófila semidecídua de encosta, no município de Botucatu, SP*. Rio Claro, 1990. 198p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

GOMES, F. P. *Curso de estatística experimental*. Piracicaba: Ed. CALQ/ESALQ, 1976. 250p.

GOMES, C.B.G., LEITE, F.R.B.L., CRUZ, M.L.B. *Aptidão agrícola das terras através do sistema de informações geográficas*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 1993, São José dos campos. Anais...São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993. p.132-39.

GS+. *GS+ Geostatistical for Environmental Sciences. Version 5.0*. Michigan: Gamma Design Software, 2000.

GUERRA, P. A. G. *Geoestatística operacional*. Brasília: MME/DNPM, 1988. 145p.

GUERRA, A. T. *Dicionário geológico-morfológico*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 1993. 446p.

GUERRA, A.J.T. *Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia*. In: GUERRA, A.J.T., CUNHA, S.B. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 3.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p.149-209.

HELALIA, A. M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soil. *Agric. Water Manag.*, v.24, n.1, p.39-47, 1993.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, Colorado, v.56, p.275-370, 1945.

HOSSEINI, E., GALLICHAND, J., CARON, J. *Comparison of several interpolators for smoothing hydraulic conductivity data in south west Iran*. Transl. ASAE, v. 36, p. 1687-1693, 1993.

HOSSEINI, E., GALLICHAND, J., MARCOTTE, D. *Theoretical and experimental performance of spatial interpolation methods for soil salinity analysis*. Transl. ASAE, v. 37, p. 1799-1807, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Secretaria de Planejamento da Presidência da República. *Carta do Brasil – Quadrícula de Botucatu*. Rio de Janeiro. Escala 1:50.000, 1982.

INSTITUTO DE GEOGRAFIA CARTOGRAFIA. Secretaria de Economia e Planejamento. *Plano cartográfico do estado de São Paulo. Município de Botucatu*, Folhas SF-22-Z-VI-1-SO-E, SF-22-Z-VI-1-SO-F, SF-22-Z-VI-3-NO-A, SF-22-Z-VI-3-NO-B, SF-22-Z-VI-3-NO-C, SF-22-Z-VI-3-NO-D, SF-22-Z-VI-3-NO-E, SF-22-Z-VI-3-NO-F, SF-22-Z-VI-3-SO-A, SF-22-Z-VI-3-SO-B, SF-22-Z-VI-3-SO-C, SF-22-Z-VI-3-SO-D, São Paulo, Escala 1:10.000, 1978.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, Escala 1:500.000, 1981. 2v.

ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford Univ. Press., 1989. 600p.

JABRO, J. D. Variability of field-saturated hydraulic conductivity in a Hagerstown soil as affected by initial water content. *Soil Sci.*, v.161, p.735-739, 1996.

JABRO, J. D., FRITTON, D. D. Simulation of water flow from a percolation test hole in layered soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.54, p.1214-1218, 1990.

JENKINS, A., PETERS, N. E., RODHE, A. Hydrology. In: MOLDAN, B., CERNY, J. (Coords). *Biogeochemistry os small catchments: A tool for enviromental research*. Chichester: John Wiley & Sons, p.31-54, 1994.

JONYS, G. K. *Impact of erosion on environmental quality*. Toronto, conservation council of Ontario. 1973. 13p.

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

KLUTE, A. *Laboratory measurement of hydraulic condutivity of saturated soil*. In: *Methods of Soil Analysis*. p.255-261, 1965.

LANDIM, P. M. B. *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: Ed. UNESP, 1998. 226p.

LASLETT, G. M., McBRATNEY, A. B., PAHL, P., HUTCHINSON, M. Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *J. Soil Sci.*, v. 38, p. 325-341, 1987.

LEOPOLDO, P. R. *Aspectos hidrológicos da região de Botucatu*. In: Encontro de Estudos sobre a Agropecuária na região de Botucatu. 1, 1989, Botucatu, SP. Anais...Botucatu: Núcleo de extensão de serviços à Comunidade, 1989. p.57-70.

LEOPOLDO, P.R., STERNBERG, S., SALATI, E. *Tendências de alterações no regime pluviométrico da região central do Estado de São Paulo, Brasil*. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA RURAL, 2, CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERIA RURAL, 5, 1998, La Plata. Libro de las Memórias...Avances en el manejo del suelo e água en la Ingeniería Rural Latinoamericana, La Plata: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, 1998. 6p. (Paper ICR52) (CD-ROM).

LEPSCH, J, F; BELLINAZZI JUNIOR, R; BERTOLIONI, D; ESPÍNDOLA, C, R. *Manual para levantamento do físico e classificação terras no sistema de capacidade de uso*. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 1991, p.175.

LIBARDI, P. L. *Infiltração da água no solo: uma generalização*. Piracicaba: ESALQ/USP, 1973. 46p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – ESALQ, Universidade de São Paulo, 1973.

LIBARDI, P. L., REICHARDT, K. Características hídricas de cinco solos do Estado de São Paulo. II. Curvas de retenção e condutividade hidráulica, *Rev. O Solo*, n.2, p.7-12, 1973.

LIBARDI, P. L., REICHARDT, K., NIELSEN, D. R. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, v.44, p.3-7, 1980.

LUEDER, D. R. *Aerial phoyographic interpretation-principles and applications*. McGraw Hill Book, New York, 1959. 462p.

McBRATNEY, A.B., HART, G.A., McGARRY, D. The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. *J. Soil Sci.*, v. 42, p. 513-532, 1991.

MEHTA, B. K., SHIOZAWA, S., NAKANO, M. Hydraulic properties of a sandy soil at low water contents. *J. Soil Sci.*, Baltimore, v. 157, n.4, p.208-214, 1994.

MENDES, C. A. B., CIRILO, J. A., *Geoprocessamento em Recursos: Hídricos Princípios, Integração e Aplicação*. ABRH, Porto Alegre, 2001. 533p.

MILLER, V. C., MILLER, C. F. *Photogeology*. McGraw Hill Book Co., New York, 1961. 248p.

MORAES, M. H., CARVALHO, A. M., ZIMBACK, C. R. L., LIMA, S. L. *Levantamento semidetalhado dos solos do Horto Mogi-Guaçu*. Botucatu: Convênio Chamflora/FEPAP, FCA/UNESP, 1995. 292p.

NACHABE, M. H. Estimating hydraulic conductivity for models of soils with macropores. *J. Irrig. Drain. Engin.*, Colorado, v.121, n.1, p.95-102, 1995.

NETTO, A. L. C. *Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia*. In: GUERRA, A. J. T., CUNHA, S. B. *Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos*. 3.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p.93-148.

OLIVER, M. A. *Exploring soil spatial variation geostatistically*. In: EUROPEAN CONF. ON PRECISION AGRICULTURE, 2, 1999. Denmark, Anais... Denmark: IPAS, 1999.

PALAVECINO, J. A., MAIOCCO, D. C., KOZARIK, J. C., GAUT, O. A., BENITEZ, J. C. *Levantamiento de la cobertura y uso de la tierra en el municipio de Eldorado – Misiones – utilizando productos de los sensores remotos*. In: SIMPÓSIO LATIOAMEROCANO DE PERCEPCION REMOTA, 9, 2000, Puerto Iguazú. *Anais em CD ROM...* São Jose dos Campos: SELPER, 2000.

PARKIN, T. B., ROBINSON, J. A. Analysis of lognormal data. *Adv. Soil Sci.*, v. 20, p. 191-235, 1992.

PARR, J. F., BERTRAND, A. R. Water infiltration into soils. *Adv. Agron.*, v.12, p.311-363, 1960.

PETERSEN, G.W., BELL, J.C., MCSWEENEY, K., NIELSEN, A.G., ROBERT, P.C. Geographic information systems in agronomy. *Adv. Agron.*, v.55, p.67-111, 1995.

PETERSEN, G.W., NIELSEN, A.G., WILDING, L.P. Geographic information systems and remote sensing in land resources analysis and management. *Suelo y Planta*, v.1, p.531-43, 1991.

PETRI, S., FÚLFARO, V. J. *Geologia do Brasil*. Ed. Universidade de São Paulo, 1983. 631p.

PIROLI, E. L. *Geoprocessamento na determinação da capacidade e avaliação do uso da terra no município de Botucatu – SP*. Botucatu, 2002. 108p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista.

PIZARRO, F. *Drenaje agrícola y recuperation de suelos salinos*. ED. Agrícola espanhola, Madrid. 1978. 525p.

PROCHNOW, M. C. R. Recursos hídricos e metodologia de pesquisa. *Geografia*. v.10, n.19, 1985.

RAIJ, B. V., QUAGGIO, J. A., CANTARELLA, H. *Análise química do solo para fins de fertilidade*. Ed. Fundação Cargill, Campinas. 1987.

RAY, R. G. *Fotografias aéreas na interpretação e mapeamento geológicos*. Trad. Jesuíno Felicissimo Jr. Inst. Geol. e Geol. , São Paulo. 1963. 163p.

RAWLS, W. J., GISH, T. J., BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristic. *Adv. Soil Sci.*, New York, v.16, p.213-234, 1991.

RANIERI, S.B.L. *Avaliação de modelos matemáticos (USLE e WEPP) para a determinação da erosão do solo em uma bacia hidrográfica no município de Piracicaba-SP*. Piracicaba,

2000. 92p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

RANZANI, G. *Manual de levantamentos de solos. São Paulo*. Ed. Edgard Blücher Ltda/EDUSP, São Paulo, 1969.167p.

REYNOLDS, W. D., ELRICK, D. E. A reexamination of the constant head well permeameter method for saturated hydraulic conductivity above the water table. *J. Soil Sci.*, v.136, p.250-268, 1983.

REYNOLDS, W. D., ELRICK, D. E. The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow. *J. Soil Sci.*, v.139, p.172-180, 1985.

REYNOLDS, W. D., ZEBCHUK, W. D. Hydraulic conductivity in a clay soil: two measurement techniques and spatial characterization. *J. Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.60, p.1679-1685, 1996.

RIBEIRO Jr., P.J. *Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo*. Piracicaba, 1995. 99p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Estatística e Experimentação Agrônômica), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

RICCI, M., PETRI, S. *Princípios de aerofotogrametria e interpretação geológica*. Ed. Nacional, São Paulo, 1965. 226p.

ROCHA, J. V., LAMPARELLI, R. A. C. *Geoprocessamento*. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. Mecanização e Agricultura de Precisão. Lavras: UFLA/SBEA, p.1-30. 1998.

RODRIGUES, M. *Introdução ao Geoprocessamento*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 1990, São Paulo. Resumos...São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990. p.1-26.

RUHE, R. V. *Elements of the soil landscape*. In: International Congress of Soil Sci., Madison, EUA, v.4, p. 165-170, 1960.

RUSSO, D.A. Design of an optimal sampling network for estimating the variogram. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.48, p. 708-716, 1984.

SALVIANO, A.A.C., VIEIRA, S.R., SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L.) em área severamente erodida. *R. Bra. Cien. Solo*, v. 22, p. 115-122, 1998.

SALES, L. E. O. *Variabilidade espacial da velocidade de infiltração básica associada a propriedades físicas da camada superficial e subsuperficial de dois solos da Região de Lavras (MG)*. Lavras, 1992. 104p. Dissertação (Mestrado/Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura de Lavras.

SALVERDA, A. P., DANE, J. H. The examination of the Guelph permeameter for measuring the soil's hydraulic properties. *Geoderma*, v.57, p.405-421, 1993.

SÃO PAULO. *Legislação sobre recursos hídricos*. São Paulo: Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1994. 72p.

SCHIMDT, M., KOLM, K. E., FLINT, A. L. Use of statistically distinct genesis-lithology-qualifer map units for classifying upland soil at Yucca Mountain, Nevada, by geomorphology and physical properties affecting infiltration. *Bull. Assoc. Engin. Geol.*, v. 29, n.1, p.33-47, 1992.

SCHWAB, G.O., FANGMEIER, D.D., ELLIOT, W. J. *Soil and water management systems*. New York: John Willey e Sons, 1993. 371p.

SHAINBERG, I., LEVY, G. J. *Infiltration and seal formation processes*. In: Soil erosion, conservation, and rehabilitation. Ed. M. Agassi. Marcel Dekker, Inc. New York. 1995. p.1-22.

SILVA, C. L., KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, 32(2):213-220, 1997.

SILVA, K. A., RIGHETTO, A. M. *Modelo hidrológico distribuído de alta resolução para bacias urbanas*. In: Drenagem urbana: gerenciamento, simulação e controle. TUCCI, C e TOZZI, M. (organizadores), Curitiba-PR, Editora da Universidade/UFRGS, p. 101-113. 1997.

SILVA, J. X. *Geomorfologia e geoprocessamento*. In: GUERRA, A.J.T., CUNHA, S.B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 3.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.393-414.1998.

SILVA, A.B. *Sistemas de informações geo-referenciados (SIG): conceitos e fundamentos*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2000. 240p.

SILVEIRA, A.L.L. *Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica*. In: TUCCI, C. E. M. (Org). Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade do Rio Grande do Sul e Editora da Universidade de São Paulo, 1993. p.35-51.

SIMÕES, L. B. *Integração entre um modelo de simulação hidrológica e sistema de informação geográfica na delimitação de zonas ripárias*. Botucatu, 2001. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

SISSON, J. B., FERGUSON, A. H., GENUCHTEN, M. T. Simple methods for predicting drainage from field plots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, v.44, p.1147-1152, 1980.

SISSON, J. B., WIERENGA, J. Spatial variability of steady-state infiltration rates as a stochastic process. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.45, p.699-704, 1981.

SMITH, D. D., WISCHMEIER, W. H. Rainfall erosion. *Adv. Agron.* V.14, p.109-148, 1962.

SOUZA, A.J., ANDRADE, F.C., TOLEDO PIZA, M.A.B., CONTE, M.L. *Aspectos físicos do município de Botucatu*. In: BOTUCATU: polo de desenvolvimento regional, 1985, Botucatu. Mimeog...Botucatu: 1985. 34p.

TAKEDA, E. Y. *Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de uma associação de solos sob a videira (Vitis vinifera, L.) em Vitória Brasil-SP*. Ilha Solteira, 2000. 102p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Produção Vegetal), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

TRANGMAR, B. B., YOST, R. S., UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, v.38, p.45-94, 1985.

TUCCI, C. E. M. *Inundações urbanas*. In: Drenagem urbana. Tucci, C. E. M.; Porto, R. L. L. e Barros, M. T. Porto Alegre, RS. ABRH/ Editora da Universidade/ UFRGS, 1995.

TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre, RS. ABRH/ Editora da Universidade/ UFRGS, 1998. 669p.

VETTORATO, J. A. *Mapeamento da fertilidade do solo utilizando sistema de informação geográfica*. Botucatu, 2002. 94p. Tese (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

VIEIRA, S.R. Pemeâmetro: novo aliado na avaliação de manejo do solo. *O Agrônomo*, Campinas, v 47-050, p. 32-33, 1998.

VIEIRA, S. R., REYNOLDS, W. D. & TOPP, G. C. *Spatial variability of hydraulic properties in a highly structured clay soil*. Proc. Symp. Validation of Flow and Transport Models for the Unsaturated Zone, Ruidoso, New Mexico, USA, 1988.

VOLTZ, M., WEBSTER, R. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *J. Soil Sci.*, v. 41, p. 451-472, 1990.

WHITE, J.G., ZASOSKI, R. J. Mapping soil micronutrients. *Field Crops Research*, v.60, p. 11-26, 1999.

WILLIAMS, R. D., AHUJA, I. R. Using available water content with the one-parameter model to estimate soil water retention. *J. Soil Sci.*, Baltimore, v.156, n.6, p.380-388, 1993.

WILSON, G. V., ALFONSI, J. M., JARDINE, P. M. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity of the subsoil of two forested watersheds. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.53, p.679-685, 1989.

WU, L., SWAN, J. B., PAULSON, W. H., RANDALL, G. W. Tillage effects on measured soil hydraulic properties. *Soil & Tillage Res.*, v.25, p.17-33, 1992.

YOST, R. S., UEHARA, G., FOX, R. L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. II. Kriging. *Math. Geol.*, v. 46, p. 10-33-1037, 1982.

ZHANG, R., GENUCHTEN, M. T. New models for unsaturated soil hydraulic properties. *J. Soil Sci.*, Baltimore, v.158, n.2, p.77-85, 1994.

ZIMBACK, C.R.L. *Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do Rio Pardo nos Municípios de Pardinho e Botucatu*. Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 1997. 55p.

ZIMBACK, C.R.L. *Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo*. Botucatu, 2001. 114p. Tese (Livre-docência), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

ZIMBACK, C.R.L., CATANEO, A., RODRIGUES, J.B.T. *Interpolação de características físicas de solos por Krigagem ordinária e correlações*. In: LATINOAMERICANO DE ENGENHARIA RURAL, 1, 1998. Argentina, Anais... Argentina: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. CDRom.

ZIMBACK, C.R.L., RODRIGUES, A. M. *Determinação das classes de capacidade de uso das terras na Fazenda Experimental de São Manuel/UNESP*. Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 1993. 17p.

ZIMMERMAN, D. L. Another look at anisotropy in geostatistics. *Math. Geol.*, v.25, p. 453-470, 1993.

ZIMMERMAN, D.L., ZIMMERMAN, M. B. A comparison of spatial semivariogram estimators and corresponding ordinary kriging predictors. *Technometrics*, v. 33, p. 77-91, 1991.

ZINKE, P. J. *Photo interpretation in hydrology and watershed management*. In: American Society of Photogrammetric, Manual of Photographic Interpretation, Washington, p.539-560, 1960.