



Número: 343/2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS

**As interrelações de elementos do meio físico natural e
modificado na definição de áreas potenciais de infiltração na
porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul**

PAULO VALLADARES SOARES

Tese apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências.

Orientador : Prof^a. Dr^a. Sueli Yoshinaga Pereira
Co-orientador : Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões

CAMPINAS - SÃO PAULO

Agosto - 2005

Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca do Instituto de Geociências/UNICAMP

Soares, Paulo Valladares

Solli As interrelações de elementos do meio físico natural modificado na definição de áreas potenciais de infiltração na bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista) / Paulo Valladares Soares. Campinas, SP.: [s.n.], 2005.

Orientadora: Sueli Yoshinaga Pereira

Tese de doutorado Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências

1. Bacias hidrográficas 2. Hidrologia 3. Meio Ambiente 4. Infiltração 5. Sistemas de Informação Geográfica 6. Rios São Paulo I. Pereira, Sueli Yoshinaga. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título

Título em inglês: The definition of potencial áreas of infiltration in the Paraíba do Sul river basin – an integrated approach using physical and antropic elements.

Keywords: Water availability, Watershead, Paraíba do Sul river, Integrated analyses; Physical elements, GIS.

Área de Concentração: Administração e Política de Recursos Minerais

Titulação: Doutor em Ciências

Banca Examinadora: Sueli Yoshinaga Pereira; Hildebrando Herrmann, Rachel Negrão Cavalcanti; Valter de Paula Lima; George de Paula Bernardes.

Data da Defesa: 30/08/2005.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS

**As interrelações de elementos do meio físico natural e
modificado na definição de áreas potenciais de infiltração na
porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul**

AUTOR : Paulo Valladares Soares
ORIENTADORA : Prof^a. Dr^a. Sueli Yoshinaga Pereira
CO-ORIENTADOR : Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões

Aprovada em: ____/____/____

EXAMINADORES:

Prof^a. Dr^a. Sueli Yoshinaga Pereira _____ - **Presidente**
Prof. Dr. Hildebrando Herrmann _____
Prof^a. Dr^a. Rachel Negrão Cavalcanti _____
Prof. Dr. George de Paula Bernardes _____
Prof. Dr. Valter de Paula Lima _____

Campinas, 30 de agosto de 200

Aos meus pais, José e Olga.

A Gisele, Maíra e Diego pelo que vocês representam e pelo apoio firme e carinhoso que recebi para vencer minhas limitações e estar aqui.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela oportunidade da VIDA e do aprendizado constante.

A Prof.^a Sueli Yoshinaga Pereira pela orientação e principalmente por acreditar em mim.

Ao “mestre” Prof. Silvio Jorge Coelho Simões, meu profundo agradecimento pelo profissionalismo, dedicação, competência, amizade e paciência monástica.

Ao Prof. George de Paula Bernardes, pela oportunidade do aprendizado e pela postura que ajuda na elaboração, reflexão e ação.

Ao Sérgio Barbosa pela amizade, dedicação e profissionalismo.

Enfim, ao longo deste processo ficaram algumas certezas, entre elas aquela que procuro incorporar nas minhas atividades cotidianas: não há produção individual! Não sou autor, sou co-autor, pois escrevi inspirado, iluminado e ajudado por uma fonte inesgotável que jorra a partir dos escritos, das experiências verbalizadas e vividas, e por tantos anônimos e veneráveis contribuidores, nessa e em tantas outras dimensões.

Isto posto, quero demonstrar meu enorme agradecimento a todos que fizeram parte deste processo: meus irmãos e familiares, aos graduandos de Engenharia Civil da UNESP/FEG (bolsista da VCP-Jacareí e Fapesp), colegas, professores e funcionários do IG/UNICAMP, funcionários, técnicos, gerentes e diretores da Fundação Florestal; amigos e técnicos do Instituto Florestal - Viveiro Florestal de Taubaté, Núcleo Cunha/ Indaiá, Núcleo Santa Virginia; amigos e técnicos do CBH-PS, do DAEE, DEPRN, CETESB e Polícia Ambiental de Taubaté; técnicos e amigos do EDR-Guaratinguetá e da Secretaria Municipal Agricultura de Guaratinguetá, amigos e amigas da CEF e o Marcello Alves pelas contribuições no início da pesquisa

À FAPESP pelo apoio através do projeto 2000/13714-1 na linha de Política Públicas.

*“De tudo, ficam três coisas:
A certeza de que estamos sempre começando,
A certeza de que precisamos continuar,
A certeza de que seremos interrompidos antes de terminar...”*

*Portanto, devemos:
Fazer da interrupção um caminho novo,
Da queda, um passo de dança,
Do medo, uma escada,
Do sonho, uma ponte,
Da procura, um encontro.”*

Fernando Sabino



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS

**As interrelações de elementos do meio físico natural e modificado na
definição de áreas potenciais de infiltração na porção paulista da
bacia do rio Paraíba do Sul**

RESUMO

TESE DE DOUTORADO

Paulo Valladares Soares

Esta tese apresenta os procedimentos para classificação de Áreas Homólogas, relacionadas aos processos de infiltração, na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. O método utilizado para a definição destas áreas fundamenta-se na criação de “patches”, agrupando algumas propriedades do terreno, as quais são capazes de armazenar água e manter a dinâmica hidrológica da bacia. Os elementos da paisagem utilizados na classificação destas áreas são: rochas e estruturas, relevo, solo, precipitação e uso do solo. Para cada tipo de elemento da paisagem aplicou-se um fator de escala de 1 a 5, que por sua vez corresponde a maior (5) ou menor (1) influência deste elemento na capacidade de infiltração. A ferramenta utilizada na sobreposição dos mapas e na criação das Áreas Homólogas foi o ArcGIS®. A sobreposição dos mapas com os elementos da paisagem sendo estes devidamente ponderados, resultou em classes de capacidade de infiltração que variam de muito baixa a alta. Dois mapas de Áreas Homólogas foram criados: um mapa regional, na escala 1:250.000, da porção média do Rio Paraíba do Sul, com 7.600 km²; e um mapa da bacia do Ribeirão Guaratinguetá, na escala 1:50.000, com 160km² a qual esta localizada na margem esquerda do Rio Paraíba do Sul. As Áreas Homólogas, com alta capacidade de infiltração, estão situadas entre os contrafortes da Serra da Mantiqueira e a planície aluvial na noroeste e a leste da Bacia do Rio Paraíba do Sul, divisa do estado de São Paulo. Na área do Ribeirão Guaratinguetá as melhores áreas de infiltração estão na porção central e noroeste da bacia. Tanto em escala regional quanto para a bacia representativa (Ribeirão Guaratinguetá) escarpas e áreas de planícies aluvionares apresentam baixa capacidade de infiltração. No entanto, as áreas de escarpas podem ser consideradas como importantes áreas de transferência e as planícies aluvionares, como áreas de estocagem de água sendo esta responsável pelo abastecimento da rede de drenagem. A tese discute e apresenta como indicadores ambientais: o uso da terra, posição e vazão das nascentes ao longo da vertente e vazão mínima dos cursos d’água (vazão ecológica).



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ADMINISTRAÇÃO E POLÍTICA DE RECURSOS MINERAIS**

The definition of potential areas of infiltration in the Paraíba do Sul river basin – an integrated approach using physical and antropic elements

ABSTRACT

DOCTOR IS THESIS

Paulo Valladares Soares

This thesis intends to present procedures to classify Homologous Areas related to infiltration process in Paraíba do Sul river watershed. The method used to define these areas consist to create “patches”, grouping several proprieties of the terrain in order to identify infiltration areas which are capable to supply the storage water in the ground and to maintain the underground water system of the basin. The landscape elements used to classify these areas were: rocks and structures, land surface, soil characteristics, precipitation and land use. For each element it was applied a values from 1 to 5 which corresponded the range of potential infiltration capacity varing from low (1) to high (5). GIS (Arcview) was the tool used to overlay the maps of the atributes, already scaled according to its infiltration capacity, in order to create the map with the Homologous Areas. This procedure was carried out to evaluate the Homologous Areas in two scale: (1) regional map, 1:250,000 scale, was medium portion of Paraiba do Sul river, with 7,600 square kilometers, and (2) Guaratinguetá river basin, 1:50,000 scale, with 160 square kilometers, located at left edge of Paraiba do Sul river. Homologous Areas in regional scale showed that high infiltration capacity areas are situated in hills, between scarps and alluvial plains in the north west portions of the region and in the east portion, limit of São Paulo State. For the Guaratinguetá river basin, the areas of high infiltration capacity are located in the central and northwest of the basin. For both analyses, scarp areas and alluvial plains presented low infiltration capacity. However, scarp areas are important in the transfer mechanism from production areas to storage areas. The aluvionar plains are capable to storage water and continuously supply the drainage system with it. This thesis discusses and indicates as environmental indicators: land use, dynamic of springs and minimum steam.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	
INTRODUÇÃO	01
1.1. Objetivos	04
1.2. Justificativa	04
1.3. Estrutura da Tese	05
CAPÍTULO II	
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	09
2.1 O Ciclo Hidrológico e a Bacia Hidrográfica	09
2.2 Capacidade de Infiltração	15
2.3 Monitoramento de Bacias Hidrográficas	20
2.4 Sistemas de Informações Geo-Referenciadas - SIG	23
2.4.1 Aplicação de Sistemas de Informações Geo-Referenciadas (SIG) em Bacias Hidrográficas	26
2.5 Ecologia da Paisagem	28
2.5.1 Contextualização Histórica e Conceitos	30
2.5.2 Estrutura e Função da Paisagem	31
2.5.3 Paisagem e a Noção de Escala Espacial e Temporal	33
2.6 Indicadores Ambientais	38
2.6.1 Conceitos	40
2.6.2 Pirâmide de Informações	40
2.6.3 Geoindicadores Ambientais	42
2.6.4 Conceito e Lista de Geoindicadores	43
2.6.5 Análise do Meio Físico à Luz do Processo de Infiltração	45
2.6.6 Critérios de Ponderação na Construção de Atributos Associados aos Mapas Temáticos	48
2.6.7 Indicadores de Sustentabilidade e Recursos Hídricos	53
CAPÍTULO III	
ÁREA DE ESTUDO	57
3.1 Meio Físico	69
CAPÍTULO IV	
MATERIAIS E MÉTODOS	75
4.1 Material	75
4.2 Procedimento Metodológico	76

CAPÍTULO V	
RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
5.1 Estruturação Conceitual	83
5.2 Elementos do Meio Físico	84
5.2.1 Geologia	84
5.2.2 Geomorfologia	89
5.2.3 Declividade	95
5.2.4 Densidade de Drenagem	99
5.2.5 Pedologia	103
5.2.6 Pluviometria	109
5.2.7 Uso do Solo	114
5.2.8 Áreas Homólogas	119
5.2.8.1 Integração das Grades de Valores Numéricos – Escala Regional	119
5.3 Abordagem em Bacia Representativa	125
5.4 Compartimentação Física da Bacia do Ribeirão Guaratinguetá	127
5.4.1 Geologia	131
5.4.2 Geomorfologia	137
5.4.3 Declividade	143
5.4.4 Densidade de Drenagem	148
5.4.5 Pedologia	153
5.4.6 Pluviometria	158
5.4.7 Uso do Solo	161
5.4.8 Unidades Homólogas	167
CAPÍTULO VI	
CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	173
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	179

LISTA DE FIGURAS

Nº	Título	Pág
2.1	Ciclo hidrológico	10
2.2	Representação esquemática dos processos hidrológicos qualitativos em uma bacia hidrográfica florestada	13
2.3	Representação do ciclo hidrológico, mostrando grande e pequenos pontos da intervenção humana	19
2.4	Elementos constitutivos da paisagem de uma area próxima a Campinas/SP	33
2.5	Pirâmide de informação	41
3.1	Mapa de localização da área de estudo	59
3.2	Imagem de satélite (Landsat TM) da área de estudo	63
3.3	Compartimentação do Vale do Rio Paraíba do Sul (porção paulista)	67
4.1	Fluxograma metodológico	78
5.2.1	Mapa de Geologia	85
5.2.2	Mapa de Geomorfologia	91
5.2.3	Mapa de Declividade	97
5.2.4	Mapa de Densidade de Drenagem	101
5.2.5	Mapa de Pedologia	107
5.2.6	Mapa de Pluviometria	111
5.2.7	Mapa de Uso do Solo	117
5.2.8	Mapa de Áreas Homólogas	121
5.3.1	Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Guaratinguetá	129
5.4.1	Mapa de Geologia - Bacia do Ribeirão Guaratinguetá	133
5.4.2	Mapa de Geomorfologia - Bacia do Ribeirão de Guaratinguetá	139
5.4.3	Mapa de Declividade - Bacia do Ribeirão de Guaratinguetá	145
5.4.4	Mapa de Densidade de Drenagem - Bacia do Ribeirão de Guaratinguetá	151
5.4.5	Mapa de Pedologia - Bacia do Ribeirão de Guaratinguetá	155
5.4.6	Mapa de Pluviometria - Bacia do Ribeirão de Guaratinguetá	159
5.4.7	Mapa de Uso do Solo - Bacia do Ribeirão de Guaratinguetá	163
5.4.8	Mapa de Áreas Homólogas - Bacia do Ribeirão de Guaratinguetá	169

LISTA DE TABELAS

Nº	Título	Pág
5.1.	Geologia, peso de infiltração e área	88
5.2	Gomorfologia, peso de infiltração e área	94
5.3	Declividade, peso de infiltração e área	99
5.4	Pedologia, peso de infiltração e área	109
5.5	Isoietas, peso de infiltração e área	113
5.6	Uso do solo, peso de infiltração e área	119
5.7	Intervalos propostos para o fatiamento da grade numérica e seus Respectivos qualificadores	120
5.8	Intervalo propostos e cores associadas as áreas homólogas	120
5.9	Geologia, peso de infiltração e área	136
5.10	Geomorfologia, peso de infiltração e área	142
5.11	Declividade, peso de infiltração e área	147
5.12	Pedologia, peso de infiltração e área	158
5.13	Pluviosidade, peso de infiltração e área	161
5.14	Uso do solo, peso de infiltração e área	166
5.15	Áreas homólogas, peso de infiltração e área	172

LISTA DE QUADROS

Nº	Título	Pág
2.1	Principais equipamentos para o monitoramento de bacias hidrográficas	22
2.2	Funções atribuídas a um SIG em atividades de planejamento e gerenciamento ambiental	25
2.3	Período de duração para processos-chave que afetam a dinâmica da paisagem	35
2.4	Tempo de permanência de diversos processos relacionados ao sistema Terra	37
2.5	Classificação dos geosistemas com base na interferência antrópica	37
2.6	Suscetibilidade natural vs. humana sobre os geoindicadores considerando período de tempo inferior a 100 anos	44
2.7	Relação de qualificadores e seus respectivos pesos relativos	53
2.8	Geoindicadores e formas de medição	56

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O desafio que a humanidade terá que enfrentar no século XXI, com relação aos recursos hídricos, é gerencial e está colocado em dois níveis: pessoal e ambiental. No pessoal, ao desfazer-se de antigos hábitos perdulários no uso de bens e serviços ambientais para produção de insumos. No ambiental, ao adotar a bacia hidrográfica como unidade de análise, planejamento, gestão e intervenção no manejo integrado dos recursos naturais. A dimensão da unidade de análise (macro, meso e micro), está diretamente ligada ao escopo da proposta de intervenção.

A importância de uma percepção global da realidade, advinda de uma visão sistêmica, e os desdobramentos que se apresentam a partir dos estudos dos sistemas ambientais podem contribuir para direcionar tomadas de decisão na gestão de recursos hídricos, que evitem a: intensificação da poluição dos recursos hídricos, a progressiva degradação das áreas de mananciais, o desperdício associado a incipientes ações de reuso, a ocupação desordenada das bacias hidrográficas gerando problemas de exaustão e redução qualitativa desse recurso.

Através dos processos físicos do ciclo hidrológico, a água é renovada mantendo um estoque permanente e praticamente constante capaz de suprir as necessidades da sociedade. Também é característica, deste recurso renovável, a irregular distribuição espacial e temporal que causa a escassez natural e relativa e o fato de que somente uma parcela muito pequena está disponível para consumo.

Sob a lógica da sociedade humana, o ciclo hidrológico tem um funcionamento complexo. Primeiramente, porque a distribuição global do volume de água não é homogênea, uma vez que a distribuição espacial das chuvas é bastante desigual na superfície terrestre, levando a escassez natural. Um segundo fator, escassez relativa, está ligado à distribuição espacial das chuvas e as condições geológicas-geográficas naturais ou modificadas pela ação antrópica (padrão de uso e ocupação do solo, vegetação, relevo) provocando problemas crônicos ou sazonais de escassez. Além disso, o tempo de permanência¹ e a temporalidade dos processos geohidrológicos estão

¹ Média de tempo em que a água permanece numa parte da hidrosfera e que se constitui num importante indicador do período de renovação das águas. Especificamente em relação à infiltração e ao fluxo subterrâneo, onde a água migra com velocidade muito baixa, reabastecendo os aquíferos e demais corpos d'água, o ritmo da atividade sócio-econômica não obedece a temporalidade dos processos em curso.

cada vez mais defasados do padrão de desenvolvimento sócio-econômico, cultural e do crescimento urbano desordenado.

A ausência de ações conservacionistas e o uso inadequado dos recursos hídricos é apenas um dos aspectos da utilização irracional e predatória dos recursos naturais. É necessário abordar as questões ambientais de forma sistêmica², avaliando as causas e efeitos das intervenções humanas. Desta forma, será possível traçar diretrizes sustentáveis³ para o adequado desenvolvimento do ambiente físico, biológico e social.

Embora ainda não seja considerada crítica, em sua totalidade, a porção paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul apresenta algumas bacias que já indicam condições de comprometimento de seus componentes ambientais. A região é caracterizada por uma atuação contínua de atividades ou ciclos antropogênicos no passado e intenso processo de industrialização a partir da década de 60. Foram fatores que comprometeram os geossistemas originais, provocando danos à flora, fauna, ao solo e aos recursos hídricos. Como agravantes dessa situação se destacam:

- Deterioração da qualidade da água do rio Paraíba do Sul e afluentes nos trechos urbanos e a jusante das cidades, pela inexistência ou deficiência na coleta, afastamento e tratamento dos esgotos domésticos. Apenas 47% dos 38 municípios que compõem a porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul, tratam seus esgotos ainda que de forma incipiente.
- Risco de diminuição quantitativa de água pelo manejo inadequado do solo através de práticas agrícolas não conservacionistas, a supressão de mata nativa por meio de queimadas e desmatamento, principalmente nas áreas de cabeceiras e nascentes contribuindo para a redução da capacidade de infiltração do solo, aumento nos processos erosivos e, conseqüentemente, assoreamento dos corpos d'água.
- A região vem sofrendo um crescente e indiscriminado processo de expansão e adensamento populacional sobre áreas ambientalmente frágeis - várzeas, nascentes e encostas.

² A abordagem sistêmica advém do fato de que o todo é caracterizado por qualidades e propriedades novas não constitutivas das partes, mas que aparecem como resultado de interações, em um determinado sistema de conexões. As características específicas de um sistema, não se esgotam nas características de seus elementos constitutivos, mas estão entranhadas sinergicamente e primordialmente nas características/tipos de conexões e relações existentes entre seus elementos.

³ Princípio de sustentabilidade surge como uma resposta à fratura da razão modernizadora e como uma condição para construir uma nova racionalidade produtiva, fundada no potencial ecológico e em novos sentidos de civilização a partir da diversidade cultural do gênero humano (LEFF, 2001).

A tendência que se apresenta é uma modificação mais profunda no modelo extensivo de exploração dos recursos hídricos, com diversas mudanças em relação à estratégia de oferta, a começar pela preocupação com a preservação da qualidade dos mananciais.

A bacia hidrográfica (micro, meso e macro) por constituir-se uma unidade natural de paisagem representa uma condição apropriada de definição espacial de um geocossistema, dentro do qual é possível avaliar e prognosticar detalhadamente as interrelações entre o uso do solo, a quantidade e a qualidade de água drenada.

A disponibilidade e a regularidade de água em quantidade nas nascentes de uma dada bacia hidrográfica, está intimamente ligada ao uso e ocupação das terras nestas áreas; e a manutenção do nível e da qualidade da água subterrânea, é resultado da conservação do solo como reservatório hidrodinâmico.

Os processos de infiltração e percolação são os responsáveis pelo abastecimento deste reservatório dinâmico ao qual mantém o armazenamento e a transferência de água, assim como, pela manutenção do escoamento básico dos rios na época de estiagem, garantindo a disponibilidade e a regularidade hídrica de uma bacia hidrográfica.

Frente a este quadro, este trabalho tem como foco avaliar a capacidade de infiltração das águas de uma bacia hidrográfica dentro de um enfoque de interação entre os processos hidrológicos e geológicos. Um dos principais objetivos desta abordagem é considerar a água não apenas como um recurso, mas uma parte essencial de um sistema ambiental, através de um enfoque espacial e temporal que considere os reservatórios e os fluxos de conexão entre a água, os elementos do meio físico e os fatores sócio-econômicos (uso e ocupação do solo). Uma nova abordagem na avaliação e no entendimento das interrelações dos elementos da paisagem natural e modificada em uma bacia hidrográfica foi desenvolvida para a identificação espacial de áreas mais favoráveis ao processo de infiltração na bacia.

Algumas regiões na bacia desempenham papel fundamental no armazenamento e abastecimento das águas subterrâneas (áreas de recarga), em função da “otimização” no tempo e espaço dos processos geológicos (estrutura), geomorfológicos (forma), pedológicos e climáticos.

A abordagem sistêmica destas interrelações constitui uma estratégia de planejamento, inserida em uma etapa regional de análise e identificação de áreas “alvo” ao detalhamento e intervenção. A definição destas áreas prioritárias ao planejamento, gestão e intervenção em uma bacia hidrográfica, visa a otimização de investimentos.

Um aspecto a ser enfatizado, é que embora o sistema ambiental tenha um número ilimitado de elementos de análise e interrelações, especificamente, no estudo da infiltração em bacias hidrográficas, estes processos podem ser controlados por um número relativamente pequeno de interações passíveis de análise. Indicadores de sustentabilidade ambiental e, particularmente os geoindicadores, constituem-se em uma alternativa para reduzir esta complexidade, pois possibilitam identificar um conjunto reduzido de parâmetros que descrevem um sistema dinâmico e que poderiam representar todos os processos que estão inter-relacionados.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o de apresentar uma metodologia de análise para a definição de áreas potencialmente favoráveis ao processo de infiltração em bacias hidrográficas, em duas escalas de abordagem: regional e bacia representativa. Para tanto, esse procedimento metodológico parte da seleção, análise e definição de elementos do meio físico que compõe a paisagem (rochas, relevo, solo e uso e ocupação do solo) e suas interações com a precipitação que varia no tempo e espaço; atribuição de valores numéricos (ponderações) segundo o potencial de participação destes diferentes elementos e suas classes na capacidade de infiltração; integra, interrelaciona e espacializa todas as atividades anteriormente descritas em ambiente SIG (Sistema de Informações Geo-Referenciadas), tendo como produto final um mapa de unidades físicas territoriais homólogas à infiltração.

Os objetivos específicos estabelecidos são: identificação dos processos do meio físico quanto à infiltração e a sugestão de indicadores de disponibilidade hídrica do meio físico nas duas escalas de abordagem consideradas.

1.2 Justificativa

A importância da Bacia do Rio Paraíba do Sul no contexto sócio-econômico brasileiro, assim como, o acelerado desenvolvimento urbano-industrial das regiões metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro induziram uma demanda crescente de energia e água no eixo São Paulo-Rio de Janeiro. Demonstração desta importância é o Sistema Light que efetua uma transposição de aproximadamente 2/3 da vazão média do rio Paraíba do Sul (até 160m³/s), em seu trecho

médio, e da quase totalidade do rio Pirai (20m³/s), para complementar a vazão do rio Guandú, onde se localiza a estação de tratamento de água que abastece a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).

Esta transposição está à jusante da porção paulista da bacia que mantém há décadas uma relação insustentável entre os elementos da paisagem constitutivos das bacias hidrográficas e os processos de desenvolvimento agrícola, industrial e urbano.

A seleção do tema e sua aplicação se justificam, pelas seguintes considerações:

- ausência de indicadores de disponibilidade hídrica na gestão de bacias hidrográficas de pequeno e médio porte;
- necessidade de integração de processos estruturais (geológicos), forma (geomorfológico), pedológico, uso do solo e climáticos na definição de áreas mais favoráveis ao processo de infiltração;
- ausência de uma visão sistêmica no estudo de bacias hidrográficas e nos programas e políticas públicas de planejamento de recursos hídricos desenvolvidos pelos comitês de bacias federais (CEIVAP) e estadual (CBH-PS);
- importância e fragilidade do conjunto das bacias hidrográficas que compõe a porção paulista da bacia frente aos processos antrópicos e as demandas crescentes. O segmento posicionado a jusante, com as suas sub-bacias, fica comprometido pela intensidade, qualitativa e quantitativa, das atividades do segmento a montante.
- elevada competitividade de uso dos recursos hídricos como fonte de abastecimento pelo setor agrícola, industrial e urbano, necessitando de ações que visam a compatibilização dos múltiplos usos e a gestão das águas superficiais e subterrâneas.

1.3 Estrutura da Tese

A concepção da tese é simples e está estruturada em apresentação e discussão dos temas que suportam o trabalho de pesquisa, compartimentação e descrição da área de estudo, construção metodológica, discussão dos resultados e considerações finais e conclusões

Considerando que os conceitos que formam o arcabouço teórico do trabalho em relação ao ciclo hidrológico, infiltração, sistemas de informações geo-referenciadas e monitoramento de bacias hidrográficas são relativamente bem conhecidos, o segundo capítulo apresenta as suas

principais características, reunindo um conjunto de conceitos e definições da nomenclatura empregada. Complementarmente apresenta uma visão do ciclo hidrológico em sua porção continental, com ênfase nos processos de infiltração, uso e ocupação do solo, escoamento básico e a influência na quantidade e qualidade da água drenada em uma unidade geohidrológica de análise. Na medida do possível, fez-se a utilização de figuras para ilustrar os conceitos utilizados e suas interrelações.

No segundo capítulo é descrita uma estrutura de SIG onde são avaliados os cuidados com a escala de representação e como o sistema pode contribuir na espacialização dos elementos do meio físico (mapas temáticos). Ainda neste capítulo são apresentados os conceitos de ecologia da paisagem e indicadores ambientais que permeiam as considerações e os cruzamentos estabelecidos entre os diferentes elementos do meio físico, selecionados neste trabalho. São discutidos os critérios de ponderações na construção dos atributos associados aos mapas temáticos, a partir de um conjunto de pesquisas bibliográficas realizadas.

O terceiro capítulo apresenta uma caracterização física e sócio-ambiental da área de estudo através de uma análise integrada dos processos e ciclos econômicos históricos e atuais que modelaram seus efeitos na paisagem valeparaibana justificando a compartimentação proposta e a escolha da área de estudo.

O quarto capítulo trata da construção e elaboração do procedimento metodológico de integração dos elementos do meio físico (geologia, geomorfologia, declividade, densidade de drenagem, pedologia, pluviosidade e uso do solo – mapas temáticos), ponderados a partir de pesos relativos propostos segundo a maior ou menor facilidade no processo de infiltração, espacializados em ambiente SIG.

O quinto capítulo, foi organizado para apresentar uma descrição dos conceitos teóricos pertinentes a cada elemento do meio físico em escala regional e bacia representativa, seu comportamento frente aos processos de infiltração, a expressão espacial de cada classe e a coerência e consistência das análises.

Por fim, os capítulos seis e sete reúnem as considerações finais e a bibliografia, respectivamente. Nas considerações finais são apresentadas argumentações sobre a utilização do método como orientação e priorização de intervenção; o desenvolvimento e avaliação de indicadores hidrológicos; a pertinência da utilização dos valores numéricos (ponderações) em ambiente SIG na avaliação dos planos de informação quanto à capacidade de infiltração; a

geração de unidades homólogas e a contextualização e discussão destas unidades em nível regional e de bacia representativa (bacia do ribeirão Guaratinguetá).

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O Ciclo Hidrológico e a Bacia Hidrográfica

As interações do ciclo hidrológico, suas relações com as unidades físicas do terreno e o uso e ocupação do solo são explicitadas em função da infiltração, pois é a base fundamental da presente tese.

Os componentes do ciclo hidrológico, modificado de Speidel *et al.*, (1988) são:

- Precipitação: Água adicionada à superfície da Terra a partir da atmosfera. Pode estar na forma líquida (chuva) ou sólida (neve ou gelo).
- Evaporação: Processo de transformação da água líquida para a fase gasosa (vapor d'água). A partir dos oceanos ocorre a maior parte da evaporação; represas, lagos, rios e solos também contribuem para a evaporação.
- Transpiração: Processo pelo qual a água é retirada do solo pelas raízes das plantas e transferida para as folhas, de onde ela se evapora.
- Evapotranspiração: É o processo de água perdida em uma bacia, devido a evaporação de uma superfície saturada, transpiração da vegetação ou a umidade do solo.
- Infiltração: Processo pelo qual a água é absorvida pelo solo. Movimento vertical descendente de água em um meio poroso. Características superficiais do terreno e a tipologia pedológica interferem no processo de infiltração.
- Percolação: Processo pelo qual a água entra no solo e nas formações rochosas atravessando a zona de aeração em direção a porção externa superior da zona saturada do solo.
- Escoamento: Movimento de deslocamento da água em fluxos superficiais e subsuperficiais compondo o escoamento superficial e o básico, respectivamente.

A partir da precipitação, conforme apresentado na Figura 2.1, a água em sua trajetória em direção a superfície terrestre pode seguir caminhos preferenciais. Parte da água pode ficar acumulada na superfície ou em depressões. Uma outra parte, pode escorrer pela superfície do terreno em direção aos canais de drenagem, constituindo o fluxo de superfície (escoamento de superfície); e em condições de solos porosos, parte da chuva, devido a força gravitacional ou a

ação das tensões capilares nos poros penetra no solo em direção as camadas do subsolo através dos processos de infiltração e percolação, constituindo os fluxos de subsuperfície e o escoamento básico. A água que se acumula nas regiões saturadas do subsolo forma os reservatórios de água subterrânea.

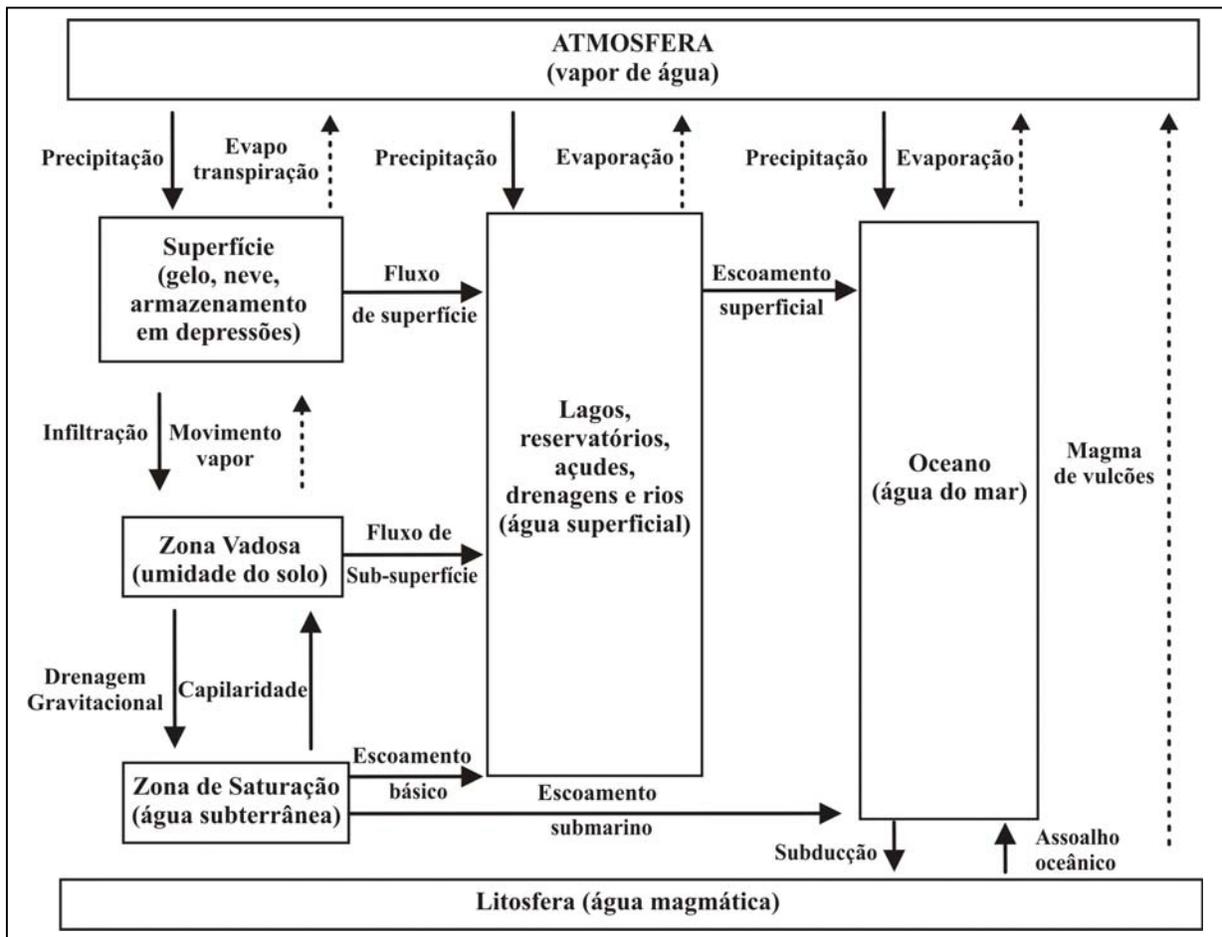


Figura 2.1 – Ciclo Hidrológico (Fetter, 2001 modificado por Pereira, S.Y., 2005)

A água acumulada em subsuperfície pode estar localizada em duas zonas: zona não saturada ou vadosa e saturada. O que diferencia uma da outra é a quantidade de ar que existe na estrutura destas duas zonas.

A porção externa superior da zona saturada está compreendida a partir da superfície do solo até profundidades que variam em função das condições climáticas de menos de um metro a algumas centenas de metros, em regiões semi-áridas. A parte superior, é alcançada pelas raízes

das plantas em seu processo de crescimento e que através da evapotranspiração movimenta a água em direção a atmosfera.

A movimentação de água na zona vadosa pode se dar em duas direções: flui lateralmente a partir da zona vadosa e constitui um fluxo de sub-superfície na direção de lagos, reservatórios, açudes, drenagens e rios (água superficial); ou por drenagem gravitacional o excesso de água da zona vadosa passa para uma região intermediária — franja capilar — onde os poros estão próximos da saturação total e a água é mantida pela força de tensão capilar. Esta é a zona insaturada (ou vadosa) que pode variar de centímetros a dezenas de metros.

Na seqüência, uma região denominada zona saturada, onde os poros se encontram cheios de água sob a forma líquida não se encontrando ar ou vapor. O nível d'água delimita a porção superior desta região e o fluxo de água subterrânea através das rochas e camadas de solo vai alimentar nascentes, fontes, lagos, rios e oceanos, compondo o escoamento básico. O movimento das águas subterrâneas inclui deslocamentos laterais estabelecendo gradientes hidráulicos em direção à áreas de descarga dos aquíferos.

O escoamento superficial é a somatória do total de escoamento proveniente do compartimento água superficial que chega até os oceanos.

A componente da precipitação que atinge a superfície terrestre infiltra através da zona não saturada para a zona saturada em condições de permeabilidade (característica de um meio de se deixar atravessar pela água) diferenciadas e que podem determinar áreas preferenciais de infiltração.

O funcionamento da parte terrestre do ciclo hidrológico, foi compreendido pelo ser humano, ao menos em parte, desde os primeiros tempos. Outros aspectos do ciclo, são negligenciados como a relação entre a água e as unidades do meio físico, pois é recente a idéia de integrar a administração da água com o uso do solo. Dentro do escopo de análise do ciclo hidrológico na superfície terrestre, o estudo de bacias hidrográficas apresenta-se como elemento fundamental no planejamento e gestão de recursos hídricos.

Segundo Lima (1996), o ciclo hidrológico descreve a dinâmica da água na natureza, consistindo em um conjunto de fases, nas quais são representados os diferentes caminhos que a água percorre pelo planeta. Participam do ciclo vários processos hidrológicos: precipitação, evaporação, transpiração, infiltração, armazenamento superficial, escoamento superficial e subsuperficial e percolação.

É um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionada fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e a rotação terrestre, onde operam processos interdependentes tanto de transferência entre os compartimentos de armazenagem como de transformação entre os estados, sólido, gasoso e líquido.

O ciclo hidrológico pode ser entendido como uma série de armazenagens de água conectadas por transferências. O tempo de permanência, que é a duração média de tempo que a água permanece em uma parte da hidrosfera ou local de armazenamento, antes de mover-se para outra parte, indica que estas transferências podem ser mais lentas (água subterrânea, por exemplo) ou mais rápidas como nos rios que exercem limitada função de armazenagem.

Neste sentido, a Figura 2.2 representa de forma esquemática os processos hidrológicos qualitativos dos principais parâmetros físicos relacionados à circulação de água em uma bacia hidrográfica florestada.

O ciclo hidrológico pode ser representado de forma simplificada por entrada, variação no armazenamento e saída de água. Para uma determinada área, a quantidade envolvida em cada fase pode ser avaliada pela seguinte equação do balanço hídrico (Fetter, 2001):

$$P - ET = Q_s \pm \Delta S + Q_{ss}$$

onde:

P = precipitação

ET = evapotranspiração

Q_s = deflúvio (vazão)

Q_{ss} = escoamento subsuperficial

ΔS = variação no armazenamento.

Considerando os componentes da equação do balanço hídrico e a Figura 2.2 verificamos que os valores mensuráveis são: evapotranspiração (ET), deflúvio (Q_s) e precipitação (P). O escoamento subsuperficial (Q_{ss}) que é função da capacidade de infiltração com o tempo, acaba sendo, incorporado a variação no armazenamento pela dificuldade de medição e instrumentação. A variação no armazenamento é função das interrelações dos elementos da paisagem que compõe o meio físico (rochas e estruturas, relevo, declividade, solo, precipitação, uso do solo).

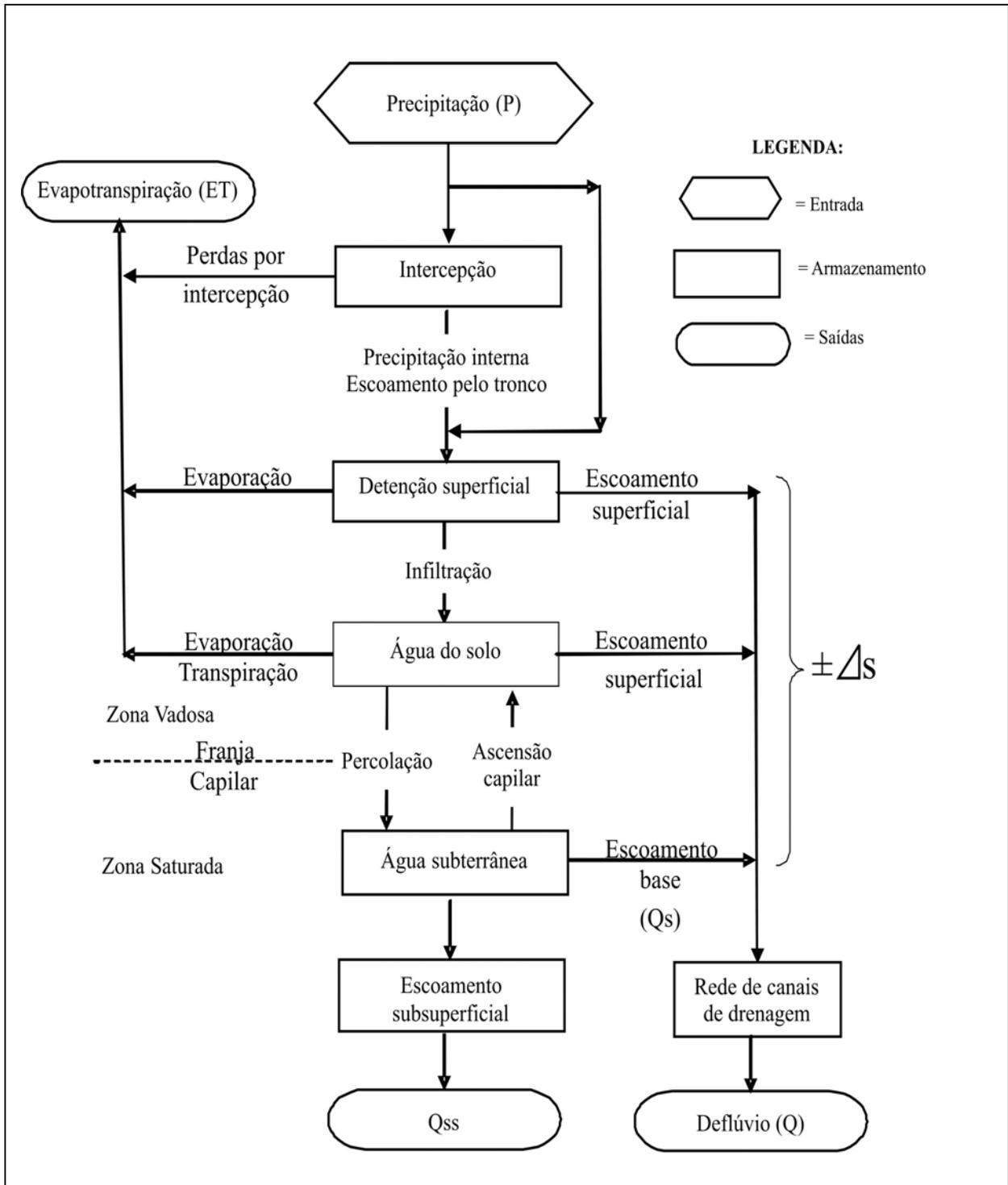


Figura 2.2 – Representação esquemática dos processos hidrológicos qualitativos em uma bacia hidrográfica florestada (modificado de Lima, 1996. 215p.)

Na equação de balanço hídrico, os componentes P, ET e Q tem variações dependentes da energia solar, no entanto, o escoamento subsuperficial e a variação do armazenamento dependem das condições do meio físico, principalmente, uso e ocupação do solo.

A bacia hidrográfica é um sistema biofísico e sócio-econômico, interdependente e integrado, composto de atividades agrícolas, industriais, urbanas, diferentes tipos de vegetação, nascentes, córregos e riachos, lagoas, morros, planícies, escarpas, enfim, um infindável conjunto de habitat e unidades de paisagem. A bacia tem como importante característica o fato de ser uma unidade funcional, com processos e interações ecológicas passíveis de serem estruturalmente caracterizados, quantificados e matematicamente modelados (Hynes, 1975; Likens, 1984; Likens e Bormann, 1985; Sträskraba e Tundisi, 2000).

Vários pesquisadores (Bormann e Likens, 1967; Chorley, 1969; Schumm, 1977; Cooke e Doornkamp, 1990; Lima, 1996; Lombardi Neto *et al.*, 1995; Resende *et al.*, 1995; Pires e Santos, 1995; Freitas e Kerr, 1996) chamam atenção para a escolha da bacia hidrográfica como unidade metodológica natural de análise, estudo, planejamento e gerenciamento da paisagem, onde é possível reconhecer e estudar as interrelações existentes entre os diversos elementos da paisagem e os processos que atuam na sua esculturação.

A bacia de drenagem ou bacia hidrográfica é definida como uma área da superfície terrestre, contida em uma linha denominada de divisor de drenagem ou divisor de águas, que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma única saída, num determinado ponto do canal fluvial, conhecido como exutório.

As vazões dos rios na bacia de drenagem, são compostas pelas águas que chegam até a drenagem após terem sido escoadas superficialmente sobre os terrenos das bacias, bem como, pelas águas que fluem até os cursos d'água depois de infiltrarem-se e terem percorrido os caminhos do subsolo na bacia. Esse escoamento é denominado escoamento de base, o qual sofreu um armazenamento, em função da estrutura geológica dos terrenos (embasamento), abaixo da superfície do terreno da bacia.

As características físicas, sócio-econômicas, históricas e ambientais das bacias hidrográficas condicionam o comportamento hidrológico das águas. Existe uma estreita correspondência entre o regime hidrológico e os elementos da paisagem que caracterizam as bacias, como: área de drenagem, forma da bacia, sistema de drenagem, declividade dos terrenos,

declividade dos cursos d'água, tipo de solo, cobertura vegetal, tipos de relevo (encostas, topos ou cristas e fundos de vale), uso e ocupação do solo.

A bacia hidrográfica é um sistema físico, onde a entrada é o volume precipitado e a saída é dada pelo volume de água escoado na seção de controle, debitadas as perdas intermediárias expressas nos volumes evapotranspirados, na quantidade armazenada em subsolo e por quantidades de água drenadas para bacias adjacentes ou contíguas devido às estruturas geológicas.

Nesse sistema físico, podemos atribuir à bacia o papel de regulação e alteração na distribuição temporal dos volumes de água. Isto porque, a bacia transforma uma entrada concentrada em volume em um determinado período (precipitação) em uma saída de água (escoamento superficial no canal de drenagem) mais distribuída no tempo. Esse efeito garante a regularidade do escoamento d'água fora dos períodos de precipitação, caracterizando os regimes hidrológicos dos escoamentos.

O regime hidrológico de um rio está relacionado com o aporte de água que é escoada nos cursos d'água, isto é, com as possibilidades de ocorrência de volumes maiores ou menores nas épocas de cheias ou estiagem. Portanto, qualquer modificação na bacia, vai alterar a distribuição de água e desregular significativamente o regime hidrológico. O incremento nas transformações numa bacia hidrográfica promoveu a diminuição da fertilidade do solo, assoreamento das drenagens e um “passivo geohidrológico” representado pela diminuição no volume d'água nas nascentes, irregularidade e até a sua esterilização ou migração para regiões mais baixas no perfil topográfico da vertente.

2.2 Capacidade de Infiltração

A água da chuva pode seguir várias direções: uma parte cai diretamente na superfície do terreno, uma outra parte é interceptada pela copa das árvores, da qual uma parte chega ao solo por gotejamento das folhas ou por escoamento de tronco (Coelho Neto, 1998). Parte da chuva que cai é interceptada pela vegetação antes de atingir o solo; em áreas florestadas a precipitação é capturada pelas folhas e ramos.

Uma vez atingida a superfície do terreno, a água pode correr pela superfície ou infiltrar no solo. O processo de infiltração resulta no avanço da frente de umedecimento no solo que após a saturação, gera o fluxo gravitacional em direção ao nível freático.

Inicialmente em precipitações intensas de chuvas, caracterizado pelo alto volume e curta duração, as gotas de chuva não alcançam o assoalho da floresta. Quando a capacidade de armazenamento das folhas é superada a água correrá pelos troncos das árvores indo ao solo por gotejamento.

A taxa de interceptação é maior no início da precipitação e declina exponencialmente com o tempo. Se a chuva é de baixa duração e intensidade, uma grande porcentagem pode ser interceptada. Se for uma chuva forte e longa somente uma pequena porcentagem pode ser interceptada.

A chuva que atinge o solo, que tem uma capacidade finita e variável para absorver água, pode infiltrar-se em solo permeável, variar seu comportamento em função do tipo de solo e de suas diferentes condições secas e úmidas. Portanto, o processo de infiltração é o resultado de relações interdependentes na entrada de água na superfície do solo, na armazenagem dentro do solo e na transmissão de umidade do solo.

Martins e Paiva (2001) definem a capacidade de infiltração como a taxa máxima com que um determinado solo pode absorver água em uma determinada condição. A umidade, permeabilidade, temperatura do solo e a profundidade da camada impermeável, grau de compactação do solo e a cobertura vegetal, são fatores que influenciam no seu valor. É um parâmetro de elevada importância no processo de transformação de chuva em vazão.

A condição ideal no início do processo de infiltração é de um solo seco, onde existirão grandes diferenças de potencial entre a água na superfície e o solo seco; essa diferença de potencial é proporcional a ocorrência da infiltração. No início as taxas são elevadas, com uma diminuição gradativa até atingir um valor constante e equivalente a condutividade hidráulica do solo, quando este atingir a saturação.

Silveira *et al.* (1993) definem infiltração como a passagem de água da superfície para o interior do solo. O mesmo autor define a percolação como o fluxo em subsuperfície que atravessa a zona vadosa em direção ao aquífero delimitada pela porção externa superior da zona saturada do solo.

Em um solo inicialmente seco, a sua capacidade de infiltração é alta; nestas condições, os efeitos de superfície entre partículas de solo e água mostram uma tensão que dirige a unidade para baixo no perfil de solo através de passagens capilares. Como as forças capilares diminuem com o aumento do teor de umidade do solo, a capacidade de infiltração cai.

Horton 1933, apud Coelho Neto (1998), denominou capacidade de infiltração a taxa máxima de absorção de água do solo, sob determinadas condições. A relação entre a intensidade da chuva e a capacidade de infiltração define a quantidade de água que infiltra:

- Quando a intensidade de chuva é menor que a capacidade de infiltração toda a precipitação infiltrará;
- Quando a intensidade de chuva é igual à capacidade de equilíbrio, mas é menor que a capacidade inicial, a precipitação inicialmente infiltrará até quando a taxa de infiltração cair abaixo da taxa de precipitação, com alguma precipitação permanecendo na superfície do solo;
- Quando a intensidade de chuva é maior que a capacidade de infiltração, o solo absorve parte da água de acordo com sua capacidade de infiltração, o excedente de precipitação, após preencher as microdepressões do terreno, escoar sobre a superfície em direção aos canais.

Segundo, Coelho Neto (1998), diversas variáveis-controladas regulam a capacidade de infiltração:

- Características físicas das chuvas – a intensidade da chuva, junto com as demais variáveis do solo, definem o que entra e o que excede a capacidade de infiltração; as chuvas mais intensas causam maiores impactos no solo exposto, e os picos de chuva de longa duração preenchem o potencial de estocagem e eventualmente conduzem os solos à saturação;
- Condições de cobertura do solo – a cobertura vegetal tende a aumentar a capacidade de infiltração; solos recobertos por florestas geralmente apresentam as maiores capacidades de infiltração, especialmente pela influência da serrapilheira. A redução na densidade da cobertura vegetal é acompanhada pelo decréscimo da infiltração;
- Condições especiais dos solos – se por um lado, a compactação pelo impacto das chuvas e a selagem por partículas finas deslocadas pelo salpico das gotas de chuva promovem uma diminuição da água infiltrada, por outro, o aumento da carga hidráulica na superfície ou das rachaduras de ressecamento do solo ou do declive da superfície aumentam a infiltração;
- Condições de textura, profundidade e umidade antecedente do solo – estas variáveis exercem influência na definição da quantidade de água que poderá ser estocada antes do solo atingir a saturação: solos profundos e bem drenados, com textura grosseira e grandes quantidades de matéria orgânica apresentarão alta capacidade de infiltração; já os solos rasos e mais argilosos mostrarão baixas taxas e volumes de infiltração; a umidade antecedente, se por um lado reduz

a ação capilar que inibe a infiltração, por outro lado limita o volume de água que pode ser estocado no solo, especialmente nos mais finos;

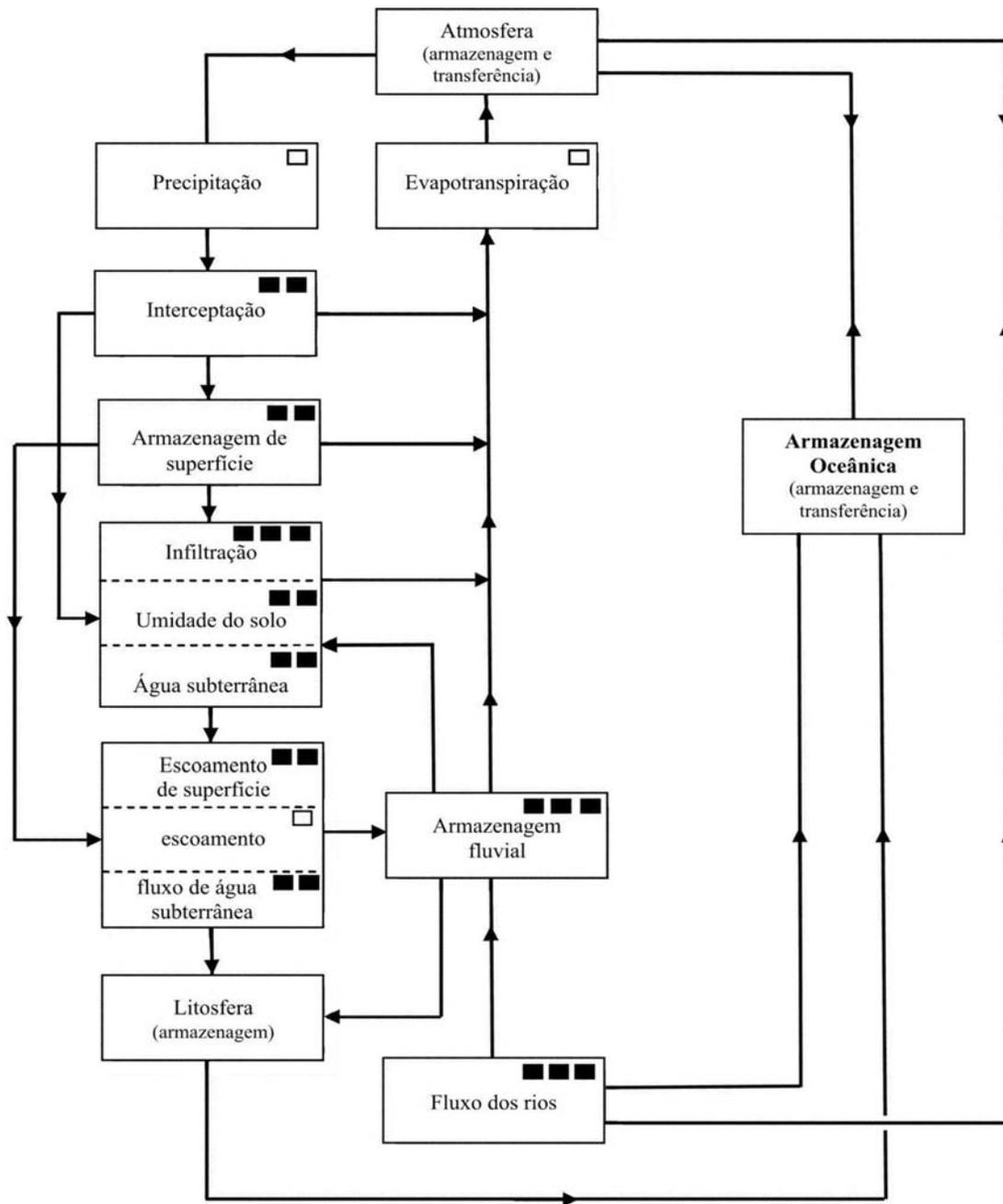
- Atividade biogênica no topo dos solos – a formação de bioporos pela atividade da fauna escavadora e do enraizamento dos vegetais aumenta a capacidade de infiltração e a percolação.

A força gravitacional gerada pelo desnível apresentado entre cotas topográficas que ao vencer a força de atrito existente entre a água e a superfície do solo condiciona o escoamento superficial por caminhos preferenciais, atuando como modelador do terreno através de processos erosivos naturais ou catalizados pela ação antrópica. O manejo conservacionista e a cobertura vegetal na superfície do solo evitam os processos erosivos, pois contribuem com o processo de infiltração, além de diminuir a energia do impacto da precipitação.

Desta forma, a absorção e o escoamento superficial estão relacionados. O escoamento é função da combinação de fatores como a magnitude (intensidade e duração) da precipitação, e a capacidade de absorção e de infiltração do solo. A absorção e infiltração variam segundo numerosos fatores determinados pelas características e condições do solo, onde dois aspectos importantes devem ser destacados: a superfície do solo funciona como um “sensor” e separa o escoamento superficial da infiltração; e a capacidade de absorção do solo da superfície, que não permite que a água passe para a zona saturada até que o reservatório do solo superficial tenha atingido sua capacidade de umidade, um ponto abaixo da saturação.

As alterações antrópicas na superfície do solo mudam a absorção, a infiltração, a qualidade e quantidade de água subterrânea; também têm o papel de acelerar os processos de fluxo de superfície.

A Figura 2.3 mostra a magnitude da intervenção humana e a capacidade de alterar a eficiência das armazenagens e transferências. Se a interferência se der em modificações de superfície ou do solo, ou em armazenagens, é provável que uma reação seqüencial provoque mudanças em todo o restante dos depósitos e transferências. A diminuição da capacidade do solo para absorver as chuvas, devido a prováveis mudanças no uso da terra, poderá afetar a distribuição de água por todas as etapas anteriores.



PONTOS DE INTERVENÇÃO HUMANA

- Impacto leve
- ■ Impacto moderado
- ■ ■ Grande impacto

Figura 2.3 - Representação do ciclo hidrológico, mostrando grandes e pequenos pontos da intervenção humana (modificado de Drew, 1994)

As atividades antrópicas podem alterar a capacidade e a eficiência de muitas das armazenagens e transferências de água em bacias hidrográficas. Estas interferências, por exemplo, podem dar-se na alteração de transferência de água através do perfil de solo, gerando modificações na armazenagem, provocando uma reação em cadeia, de mudança em todo o restante dos depósitos e transferências.

Os fatores que afetam a infiltração, conseqüentemente influenciam o abastecimento do sistema geohidrológico da bacia hidrográfica, podem ser divididos nas seguintes categorias: solo, superfície, manejo. No solo são as suas propriedades morfométricas (textura e morfologia), químicas, água no solo, capacidade de retenção de água no solo e condutividade hidráulica. Quanto à superfície os fatores afetados pelo movimento da água através da interface ar-solo, estão ligados a intensidade da precipitação, declividade e ao escoamento superficial. O manejo representa o quanto a intervenção antrópica estará levando em consideração a interação entre os dois fatores anteriormente descritos e que está expresso em parte na aptidão das terras.

2.3 Monitoramento de Bacias Hidrográficas

O monitoramento das variáveis hidrológicas é fundamental no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos de uma bacia, bem como no dimensionamento de obras necessárias ao gerenciamento destes recursos. Quando bem aplicados os modelos de simulação são ferramentas muito eficazes. Porém são de pouca utilidade, caso não se disponha de dados para sua calibração e validação.

Um dos maiores desafios em hidrologia é o de se conhecer, adequadamente, o comportamento espacial dos processos hidrológicos. Os dados hidroclimatológicos são medidos em locais definidos, como um pluviômetro numa bacia ou um posto fluviométrico numa seção de rio. Uma rede hidrométrica dos postos de precipitação e vazão dificilmente cobre de maneira satisfatória uma determinada área por isso se faz necessário *regionalizar* estes dados, ou seja, “transferir informações de um local para outro dentro de uma área desde que possua um comportamento hidrológico semelhante” (Tucci, 2001).

No caso da bacia do rio Paraíba do Sul, a rede de dados de precipitação, embora relativamente densa para os padrões brasileiros, não cobre homogeneamente toda a bacia a qual possui características físicas bastante diferenciadas. Por exemplo, nas áreas geomorfologicamente

constituídas de morros e serras, a rede de postos de precipitação não é suficientemente representativa da diversidade física observada na região. O efeito da orografia tem interferência direta na dinâmica climatológica.

As características físicas de uma bacia hidrográfica, tais como: tipo de solo, hipsometria, uso e ocupação e os parâmetros hidrológicos, são fatores espacialmente inerentes e que podem ser usados diretamente em modelos de análise em bacia hidrográfica ou cruzamento de planos de informações.

Desta maneira, o monitoramento ambiental em bacias hidrográficas através de medições de qualidade da água, fluxo e armazenamento de nutrientes, balanço hídrico e resposta hidrológica (reação hidrológica a uma determinada chuva e seu escoamento direto) constitui-se em estratégia adequada de avaliação ambiental na busca da sustentabilidade das atividades desenvolvidas. A bacia hidrográfica é a menor unidade ecossistêmica da paisagem onde os processos naturais e antropogênicos de entrada, armazenamento, fluxos internos e saída de nutrientes podem ser quantificados; assim como, a interação entre eles e os componentes da biogeoquímica: vegetação, atmosfera, relação solo-planta, geologia, água superficial e subterrânea.

Para o entendimento do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, medidas e monitoramento de precipitação, vazão e evaporação são fundamentais. As hipóteses científicas estruturadas em modelos, têm nessas medidas/dados suporte à calibração e à validação.

A seguir no Quadro 2.1 são apresentados os instrumentos geralmente empregados para medição em bacias hidrográfica.

A adequada caracterização quanti-qualitativo dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica, está diretamente relacionada ao tipo monitoramento e ao entendimento da dinâmica dos fatores que estão sendo medidos. Na instrumentação e monitoramento de uma bacia, o método de medição de vazão deve considerar que na determinação da composição do deflúvio fazem parte os fluxos superficiais e subsuperficiais da bacia.

A vazão dos rios é composta pelas águas que atingem a drenagem, após terem sido escoadas superficialmente sobre os terrenos da bacia, acrescida das águas que chegam aos cursos d'água depois de se infiltrarem e terem percorrido os caminhos no subsolo da bacia hidrográfica.

Quadro 2.1 – Principais equipamentos para o monitoramento de bacias hidrográficas

	Aparelho	Componente do ciclo hidrológico	Fator de Análise
Estação Linimétrica	Linígrafo	Vazão	Quantitativo – vazão ou escoamento direto, variação do nível d'água ao longo do tempo na seção de controle. Qualitativo – amostra de água do deflúvio, parâmetros analisados: nitrato, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, pH, condutividade elétrica, turbidez, cor e sedimentos em suspensão.
	Régua Linimétrica		Controle e medida da vazão
	Pluviômetro		Altura de água ou lâmina que será acumulada em superfície plana se nenhuma perda ocorresse
	Pluviógrafo	Precipitação	Registro gráfico da intensidade de chuva em um determinado período.
	Tanque Classe A	Evaporação	Evaporação / Evapotranspiração
	Termômetro		Temperatura
	Lisímetro	Evapotranspiração	Medida de evaporação do solo e transpiração da planta
	Tensiômetros	Potencial mátrico	Medida da tensão com que a água é retirada pelo solo
	Molinete hidrométrico	Vazão	Velocidade em função da profundidade, através da contagem do número de rotações de sua hélice em um dado período de tempo
	Vertedores e calhas medidoras	Vazão	Relação entre profundidade e vazão; adequada para pequenas e médias bacias hidrográficas
	Vertedores	Vazão	Vazão de escoamento
	Calhas medidoras de Vazão	Vazão	Medidores de regime crítico, ou seja, construídos de forma a promover, em seu interior, a transição entre o regime fluvial e torrencial; relação direta entre lâmina d'água e a vazão de escoamento
	Calhas Parshal	Vazão	Medição de vazão
	Calhas de fundo plano	Vazão	Medição de vazão
Infilômetro	Capacidade de Infiltração	Capacidade de infiltração por intervalo de tempo	

Fonte: Soares, 2005

O escoamento subsuperficial ou subterrâneo sofre um armazenamento abaixo da superfície do terreno da bacia e este armazenamento não é necessariamente limitado ao divisor topográfico; a estrutura geológica do terreno influencia nas condições de armazenagem

subterrânea de maneira que uma outra linha imaginária pode ser utilizada para a definição da bacia de drenagem, o divisor freático, o qual estabelece os limites e conexões dos reservatórios de água subterrânea, a partir da formação geológica regional, a qual não segue necessariamente as condições superficiais.

O divisor freático apresenta flutuações ao longo do tempo, em função dos armazenamentos das bacias, e em muitos casos as transferências de águas ocorrem possibilitando uma compensação dos volumes de água “perdidos” e “recebidos”. Podemos considerar que diante do exposto, anteriormente:

- o tipo de monitoramento dos processos e variáveis da bacia envolvidos no planejamento, nas alterações ambientais e nas obras necessárias à gestão dos recursos hídricos podem ser realizado com os instrumentos apresentados no Quadro 2.1, de maneira parcial, pois considera apenas o divisor topográfico;
- na equação de balanço hídrico, o fator variação no armazenamento (ΔS) acaba sendo, em algumas vezes, incorporado a evapotranspiração (ET);
- que as considerações apresentadas no primeiro item à luz do conhecimento geohidrológico na unidade de análise e no contexto regional onde está inserida essa unidade, propiciará um melhor dimensionamento da disponibilidade hídrica;
- que o escoamento subsuperficial, a infiltração e o escoamento base são responsáveis por um regime de vazão mais uniforme.

2.4 Sistemas de Informações Geo-Referenciadas – SIG

Os modelos de análises espaciais desenvolvidos em SIG visam combinar dados espaciais para descrever e analisar interações, constituindo-se em uma importante ferramenta no planejamento da paisagem, bem como na obtenção de dados a serem utilizados no planejamento e zoneamento, tanto em nível regional quanto municipal, contribuindo na análise da dinâmica temporal da transformação de determinadas áreas, por exemplo, as bacias hidrográficas.

Uma das principais aptidões do SIG é a de simular e inter-relacionar eventos de natureza intrinsecamente espacial. Esta ferramenta permite a confecção de cenários para efeito de planejamento, bem como a modelagem de funções de correlação e a interação de dados de monitoramento para efeito de controle, supervisão e obtenção de diagnósticos.

Os SIG se inserem como uma ferramenta que tem a capacidade de manipular as funções que representam os processos ambientais em diversas regiões, de uma forma simples e eficiente, permitindo economia de recursos e tempo. Estas manipulações permitem agregar dados de diferentes fontes (imagens de satélite, mapas topográficos, mapas temáticos) e em diferentes escalas. O resultado destas manipulações, geralmente é apresentado sob a forma de mapas temáticos com as informações desejadas. A combinação de dados multi-fontes permite reduzir a ambigüidade de interpretação que normalmente ocorre na análise individual dos mesmos.

O Quadro 2.2, adaptado de Santos *et al.* (1998) mostra algumas funções que podem ser atribuídas a um SIG nas atividades de planejamento e gerenciamento ambiental.

No planejamento ambiental é realizado um conjunto de etapas distintas, que por sua vez, compreende uma série de procedimentos desenvolvidos com base em metodologias originárias do planejamento urbano e de análise de impacto ambiental, ou seja, aquelas que se utilizam de métodos que envolvem análise espacial, classificação, matrizes e modelagem. Estas etapas e os seus métodos de execução dependem do tipo de planejamento ambiental que se irá realizar. Independente do objetivo, normalmente se utiliza uma coleção de dados ambientais que serão utilizados entre as etapas de diagnóstico e seleção de alternativas (Santos *et al.* 1998).

Para Grigg (1997), a abordagem sistêmica é o caminho a ser seguido na aplicação de metodologias de análises, na síntese de problemas e questões organizacionais relacionadas ao ambiente, modelando o mundo real com funções de inter-relações e integrações existentes. Essa abordagem implica em uma maior utilização de ferramentas computacionais de análise, que sejam capazes de manipular grandes quantidades de dados e gerar novas informações e conhecimentos. Os SIG são portanto a ferramenta de suporte à decisão que mais se enquadram no enfoque sistêmico de gerenciamento de recursos naturais, em face de suas características de integração e manipulação de grandes quantidades de dados espaciais e alfanuméricos.

Quadro 2.2 - Funções atribuídas a um SIG em atividades de planejamento e gerenciamento ambiental.

Procedimentos	Funções no SIG
Avaliar os elementos que compõe o meio	Apresentação de dados temáticos de forma espacial Representar e gerar classificações agro-florestais Expressar, espacialmente, processos físicos, biológicos e populacionais Avaliar riscos de enchentes, incêndios e erosão
Analisar fatos dentro de uma abrangência temporal	Representar a história da dinâmica do uso da terra Avaliar a dinâmica histórica regional Avaliar causas e conseqüências históricas de desmatamentos Representar a evolução ou expansão agrícola Mapear as perdas territoriais de tipos de produção Mapear vocações territoriais e impactos ambientais temporais
Relacionar os fatos	Cruzar informações politemáticas, com produção de mapas-síntese Avaliar a dinâmica do uso da terra em relação a declividade e altitude Interpretar áreas de plantio em relação ao clima, solo e declividade
Elaborar prognósticos	Determinar possíveis causas de impacto e prever futuras conseqüências ambientais Medir e inferir sobre a quantidade dos recursos naturais Simular cenários futuros
Definir zonas ou territórios	Estabelecer zoneamentos de acordo com regras pré-estabelecidas Identificar áreas de proteção, de refúgios ou <i>habitat</i> exclusivos Definir áreas de visão aprazível para lazer Planejar rotas ou percursos adequados dentro de uma região Selecionar áreas de pastagem
Elaborar alternativas de ação	Apresentar alternativas mitigadoras ou de resolução de conflitos Elaborar planos de reflorestamento Obter alternativas para manejo de recursos, como o manejo de vegetação considerando-se atributos estruturais das florestas relacionadas a outros mapas Monitorar o ambiente, como controle do fogo ou propagação de desertificação

Fonte: Modificado de Santos *et al.* (1998)

Por outro lado, no planejamento ambiental, os insucessos estão ligados ao fato deste ter como base um conjunto de ações que não refletem a realidade, por não apresentarem um conjunto de dados integrados de forma eficiente ou por erro de diagnóstico. A primeira questão para ser solucionada requer os mecanismos necessários que permitam uma realimentação freqüente de dados e a conseqüente reavaliação do planejamento, requisitos que são preenchidos pelo banco de dados do SIG, que além de serem georeferenciados possuem acesso rápido, permitem análises temporais e referenciais cruzadas. Com relação à segunda questão, o diagnóstico é definido como

a arte de se conhecer os problemas que afetam uma área, bacia hidrográfica ou população, através de observações, questionamentos, análises e interpretações. De acordo com os diagnósticos realizados são elaborados prognósticos, que são a previsão ou a perspectiva do que deve acontecer se forem ou não aplicadas às ações propostas.

Os SIG são excelentes como plataformas de suporte para tomadas de decisão como explicitado por Loh e Rykel Jr. (1992), ao definirem como principais vantagens do seu uso como gerenciador:

- em um só local estão as informações relevantes ao planejamento e gerenciamento;
- uma série extensa de alternativas podem ser consideradas com a mesma intensidade e em vários cenários;
- o processo de tomada de decisão é inteiramente documentável e as decisões podem ser repetidas se adequadas;
- as regras a serem aplicadas podem ser desenvolvidas pelos próprios tomadores de decisão e os cenários avaliados imediatamente;
- agregação e desagregação dos dados entre as diversas escalas.

A utilização de SIG na quantificação e associação entre características espaciais (uso do solo, geologia, tipo de solo, topografia, hidrografia, densidade populacional) e escalar, podem ser observados nos trabalhos de Ziemer (1997); Meixler *et al.* (1995); Cooper *et al.* (1998).

2.4.1 Aplicação de Sistemas de Informações Geo-Referenciadas (SIG) em Bacias Hidrográficas

Uma importante aplicação de SIG em bacias hidrográficas é a classificação e priorização de bacias e regiões para fim de orientação a programas de conservação, recuperação e de políticas públicas de planejamento regional (FAO, 1996; SHENG *et al.*, 1997). Os procedimentos para priorização de bacias em escala regional podem envolver múltiplas etapas dentro de uma hierarquia de critérios, como descrito pelos autores. Processos de priorização, entretanto dependem de que as bacias possam ser caracterizadas segundo critérios comuns e então classificadas. Tal caracterização pode variar em detalhe e extensão conforme os objetivos, dados disponíveis, tempo, recursos técnicos e financeiros (FAO, 1996).

A tomada de decisão é baseada na seleção e hierarquização de alternativas de ação e segundo Conyers e Hills (1984), um dos aspectos de grande importância para planejamentos é analisar a capacidade de manejo ou de implementação das diretrizes propostas.

Montgomery *et al.* (1995), descrevem as tarefas fundamentais para os quais as análises em SIG ajustam-se perfeitamente, como a organização da paisagem em unidades (ecótopos) a partir do delineamento e estratificação destas unidades, para as quais características estruturais e funcionais as distinguem de unidades contíguas. Existem diversas estruturas de classificação de paisagens em unidades homólogas, as quais combinam os dados como: clima, geologia, solo, vegetação, uso do solo e que são básicos para a análise de bacias hidrográficas e ecossistemas aquáticos (Bryce e Clarke, 1996; Griffith *et al.*, 1999).

Montgomery *et al.* (1995), apresentam um procedimento para caracterização e análise detalhadas de bacias hidrográficas em que fica evidente o potencial de aplicação do SIG. A análise é baseada em cinco eixos, que foram adaptados para este trabalho, representados pelas seguintes perguntas:

- como funcionam os elementos e unidade da paisagem na resposta ao tema de pesquisa?
- qual o histórico da bacia?
- quais são as condições atuais?
- quais são as tendências?
- qual a sensibilidade da bacia em relação a futuras ações antrópicas?

A primeira pergunta exige uma análise detalhada das relações do meio físico (geológica, geomorfológica) e de pluviosidade; a segunda, estabelece as interrelações entre os elementos e as unidades da paisagem moldadas por diferentes processos ambientais ou antrópicos; a terceira faz uma interpretação histórica e atual dos processos. Na quarta pergunta, as tendências nas modificações podem ser expressas em termos de mudanças em alguma medida de condição física ou biológica; e finalmente, a identificação e avaliação de seus componentes ou regiões mais sensíveis, frente as diferentes opções de manejo.

Problemas ambientais em bacias hidrográficas podem ser abordados através da aplicação de SIG, constituindo-se em importante instrumento de integração de temas em múltiplas escalas com objetivo de compreender a influência de fatores naturais e antrópicos sobre o objeto de observação.

A necessidade atual por abordagens espaciais mais abrangentes e em múltiplas escalas é amplamente recomendada e aceita (Tundisi e Barbosa, 1995; Bryce e Clarke, 1996; Tundisi, 1999; Gustafson *et al.*, 2000). As interações entre os componentes tanto físicos como biológicos do ecossistema implica relação em diferentes escalas temporais e espaciais. Por exemplo, em uma bacia hidrográfica, a distinção entre as alterações na quantidade e qualidade das águas de um rio provocada pela abertura de uma estrada em sua margem, das associadas a proporção de solo utilizada para culturas agrícolas extensivas anuais desprovidas de métodos conservacionista de uso e ocupação do solo.

Um SIG possibilita mapear e analisar a distribuição de determinado litotipo em toda uma bacia hidrográfica, tanto quanto a distribuição areal de um determinado fácies litológico em um quilômetro quadrado. Tudo isso é dependente da extensão e resolução dos dados disponíveis e de que o objeto mapeado, através de um sistema de coordenadas, possa ser localizado.

A melhor escala que deve ser utilizada, dependerá do objetivo do trabalho que será desenvolvido. Diante disso, a escala com maior detalhe, nem sempre é a mais adequada, mas sim a utilização de níveis de resolução de cada escala em função da influência desta na detecção de relações entre tipo, posição, configuração e extensão de um determinado elemento da paisagem sobre uma determinada característica que se queira analisar.

A combinação de abordagens que extrapole da pequena para a grande escala, e vice-versa, podem fornecer melhores informações para efetivamente se estabelecer uma ligação entre escalas grandes e pequenas, tanto do ponto de vista do desenvolvimento de métodos e teorias, como de manejo e priorização de intervenção e pesquisas.

2.5 Ecologia da Paisagem

A paisagem pode ser entendida como um sistema que integra a heterogeneidade vertical e horizontal de um determinado espaço como uma unidade de superfície do terreno em função de um atributo (cobertura vegetal, paisagem geológica, paisagem pedológica) vista sob o prisma sistêmico.

Para Melendo (1999), a paisagem está em permanente evolução como consequência de:

- processos dinâmicos naturais do meio biótico, como evolução da vegetação e do meio abiótico, como processos erosivos (denudacionais) e sedimentológicos (agradacionais), processos glaciais, alterações nos cursos d'água.

- processos antrópicos: transformações da cobertura do solo, instalação de infra-estrutura, alterações de uso do solo.

As principais vantagens do estudo da paisagem estão na aplicabilidade, na redução da quantidade de material cartográfico, na facilidade e rapidez nos processos de tomada de decisão e nas interações ajustadas e elaboradas gradativamente minimizando a tendência de centralização de uma determinada linha de conhecimento. Já as limitações estão ligadas a dificuldade de representar cartograficamente indicadores sociais ou econômicos; a homogeneidade de cada unidade está ligada a escala de trabalho; quando existe uma modificação em curto espaço de tempo, as unidades de paisagem devem ser reavaliadas e também a confiabilidade dessas unidades em termos de homogeneidade.

Os princípios e elementos da Ecologia da Paisagem representam uma interessante alternativa para cartografar regiões com grande diversidade do uso da terra permitindo estabelecer uma matriz para cada elemento da paisagem e o grau de conectividade entre as manchas que a compõem. O caráter de análise dinâmica (temporal e espacial) e a ênfase direcionada para os fluxos entre os elementos (processos) permitem compreender melhor a rápida transformação física que vêm ocorrendo em determinadas áreas rurais (áreas naturais para áreas modificadas) ou áreas situadas nas franjas urbanas com sua imensa diversidade de paisagem.

De maneira geral, a delimitação desses elementos da paisagem tem que ter uma dimensão relevante e que possa ser cartografada em uma determinada escala. Isto explica a utilização de um sistema de informação geográfica na caracterização e interpretação dos planos de informação que compõem os elementos da região estudada.

Ecossistemas e comunidades existem em diferentes escalas, possuindo dinâmicas e variações distintas entre si na escala temporal. No entanto, aqueles aspectos que desempenham importância básica na caracterização de um ecossistema, são comuns a qualquer ecossistema, independente da escala considerada. Estes aspectos são a estrutura e a interação entre seus componentes.

Aos elementos constitutivos dos meios biótico, abiótico e antrópico podem ser atribuídos diferentes pesos específicos em cada unidade de paisagem, estabelecendo entre eles uma série de relações e interdependências que dão unidade ao conjunto analisado e determinam sua evolução e comportamento.

Isto pode ser explicitado no conceito de disponibilidade hídrica de determinada bacia

hidrográfica que é função e relaciona-se à percepção integrada do funcionamento de elementos e processos do meio físico natural e modificado, à precipitação. Entretanto, um elemento fundamental de referência é a infiltração que é o indicador da capacidade da bacia hidrográfica transformar entradas concentradas de água em saídas regulares no tempo.

2.5.1 Contextualização Histórica e Conceitos

O termo paisagem vem sendo utilizado desde a Idade Média com os mais diferentes enfoques. O conceito de paisagem, do ponto de vista científico, foi introduzido no início do século XIX por A. von Humboldt que foi um grande pioneiro da Botânica e da Geografia Física. A partir daí o conceito de paisagem passa a ter, principalmente na Alemanha, uma percepção epistemológica com uma conotação geográfica utilizando, para sua definição, feições do meio físico oriundo da Geologia e da Geomorfologia.

Já o termo Ecologia da Paisagem, surgiu em 1939 através de Carl Troll e por seus pesquisadores, essencialmente geógrafos, com forte influência da geografia humana, da fitossociologia e da biogeologia (Troppmair, 2001); ou seja, um espaço total integrando a geosfera e a biosfera, bem como, a integração entre as disciplinas geografia e ecologia. Como destacam Naveh e Lieberman (1994), Troll olhava a paisagem como uma percepção integral, como uma entidade integrada holística significando que o “todo” é mais do que a soma das partes. Parte desta visão integrada de Troll, certamente deve-se ao uso de fotografias aéreas, o qual foi dos pioneiros em sua utilização.

Esta percepção geográfica de ver a paisagem também se encontra nos pesquisadores russos e do leste europeu que a ampliaram integrando os fenômenos orgânicos e inorgânicos e designando o estudo em sua totalidade como “paisagem geográfica”.

Com o passar dos tempos e dependendo das características paisagísticas de cada país o estudo da paisagem geográfica e o termo ecologia da paisagem passou por uma grande abrangência e diversidade conceitual.

Na Alemanha, talvez em face da ausência de áreas naturais e do avanço da urbanização, a ecologia da paisagem passa a ser um instrumento do planejamento urbano atendendo demandas da sociedade industrial. O mesmo ocorre em países do leste e do centro da Europa, onde a

ecologia da paisagem teve um grande avanço pela importância que é dada tanto à conservação natural quanto à necessidade de um planejamento urbano-rural.

Este aspecto duplo de ser a ecologia da paisagem, ao mesmo tempo, um suporte de proteção de áreas de conservação e, também, um suporte para o planejamento urbano é bem presente na América do Norte, onde os princípios da ecologia da paisagem têm abrangido diferentes áreas como paisagem arquitetônica, planejamento urbano, conservação natural e ecologia aplicada (Naveh e Lieberman, 1994).

Portanto, ecologia da paisagem é presentemente vista na Europa e nos EUA como a base científica para o planejamento urbano, gerenciamento e conservação dos recursos naturais, desenvolvimento e recuperação ambiental.

Esta ampliação dos horizontes e dos campos de conhecimento envolvidos obriga, como destaca Naveh e Lieberman (1994), que os recentes desenvolvimentos na área tenham inclinado a tendência de abordagem para uma percepção mais interdisciplinar além de enfatizar uma abordagem quantitativa no sentido de avaliar os impactos do homem sobre o uso da terra e os recursos naturais.

2.5.2 Estrutura e Função da Paisagem

Conforme foi resumido por Risser (1991), as principais características das paisagens são:

- áreas espacialmente heterogêneas;
- fluxos e redistribuição de materiais e energia entre os elementos da paisagem;
- atividade humana como resposta e sua influência nos processos ecológicos.

Portanto, para que se obtenha uma compreensão da paisagem é fundamental entender as suas três principais características: estrutura, função e dinâmica de alteração. Conforme citam Forman e Godron (1986); e Turner e Gardener (1991), estes termos podem ser definidos, da seguinte maneira:

- **Estrutura:** relação espacial entre distintos ecossistemas ou elementos presentes; a distribuição de energia, material e relação de espécies em tamanhos, formas, números, espécies e configuração dos componentes da paisagem.
- **Função:** refere-se a interação entre os elementos espaciais, isto é, ao fluxo de energia, de matéria e de espécies entre os componentes do ecossistema que constituem a paisagem.

- Dinâmica de alteração: alteração da estrutura e função do mosaico ecológico/paisagístico (ecossistêmico) ao longo do tempo.

A estrutura seria o primeiro passo na compreensão de uma paisagem, pois faz a sua descrição morfológica; ela é formada pela matriz, patches (manchas ou fragmentos) e corredores. Designa-se matriz à classe de uso do solo em uma determinada paisagem com grande dominância sobre as demais. As manchas descrevem fragmentos que compõem uma paisagem, sendo definida como uma classe de uso da terra distinta das classes adjacentes; podem ser descritas segundo o tamanho, a forma, o tipo biótico e a quantidade. Os corredores são elementos unidimensionais de forma alongada (rios e estradas, por exemplo).

No exemplo mostrado na figura 2.4, a matriz é formada pelas áreas de campo sujo (pastagens) enquanto as demais formas de uso (reflorestamento, áreas urbanas, áreas de cultura e solo exposto) representam fragmentos da paisagem. Estradas e sistemas de drenagem correspondem aos corredores.

Atributos funcionais não são tão claros como os atributos estruturais. Entretanto, várias características da paisagem influenciam significativamente o transporte e a redistribuição de material. Um dos atributos funcionais mais estudados é a conectividade que caracteriza a capacidade da paisagem de facilitar e até impedir movimentos dos recursos da natureza entre as manchas. A aplicação do conceito de conectividade pode ser visualizada nos trabalhos de Metzger (1997) e Metzger e Décamps (1997). Estes autores avaliaram paisagens altamente fragmentadas em regiões do Estado de São Paulo onde a ecologia da paisagem é utilizada para compreender os efeitos do desmatamento e da fragmentação dos remanescentes florestais.

Ao se analisar as propriedades funcionais de uma paisagem, os efeitos temporais e espaciais devem ser fortemente considerados.

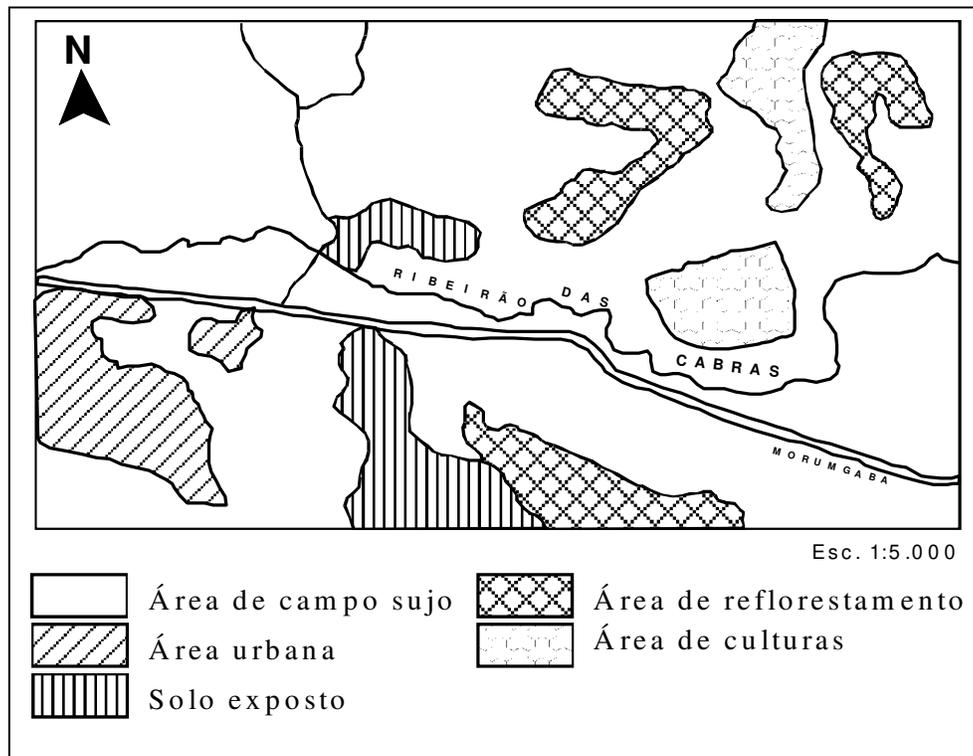


Figura 2.4 – Elementos constitutivos da paisagem de uma área próxima a Campinas/SP (Simões, inédito)

2.5.3 Paisagem e a Noção de Escala Espacial e Temporal

Em relação aos efeitos espaciais, isto decorre do fato de que as paisagens são espacialmente heterogêneas, ou como ressalta Turner e Gardner (1991), constituídas de “mosaicos ambientais”. Forman e Godron (1986) propuseram três mecanismos para o desenvolvimento da heterogeneidade da paisagem:

- processos geomórficos que ocorrem sobre períodos longos de tempo;
- padrões de colonização de organismo ocorrendo de curtos a longos períodos de tempo;
- distúrbios locais de ecossistemas individuais ocorrendo em períodos pequenos de tempo.

Estabelecer, espacialmente, as delimitações de uma unidade de paisagem — assim como os ecossistemas — é um processo subjetivo e artificial, desde que unidades de paisagens são sistemas abertos com trocas de matéria e energia de diferentes naturezas. Desta forma, na maioria das vezes, trata-se de uma escolha pragmática baseada em certas características visuais e de identidade.

Quanto à sua dimensão, Forman (1995), sugeriu que uma paisagem é uma área com vários quilômetros de largura e comprimento com elementos estruturais que se repetem de forma similar. Segundo Forman e Godron (1986), o tamanho mínimo de uma paisagem é uma área com vários quilômetros de diâmetro.

De uma maneira geral esta delimitação tem que ter uma dimensão relevante e que possa ser cartografada em uma determinada escala. Isto explica o sucesso de técnicas como sensoriamento remoto (Metzger, 1997; O'Honney *et al.*, 2003) e os sistemas de informação geográfica (Johnston, 1998) na caracterização e interpretação dos elementos da paisagem. Por outro lado, como ressaltam Gardner *et al.* (1987), a escala é determinante para a definição do número, do tamanho e das formas dos fragmentos que compõem uma determinada paisagem.

Uma paisagem também é marcada por mudanças no tempo. Escalas temporais são parecidas com escalas espaciais exceto que o tempo envolve somente uma dimensão e uma direção. Na paisagem, um importante aspecto da escala temporal é que muitos processos requerem longos períodos de observação.

O enfoque temporal da ecologia da paisagem trata com dimensões de tempo de anos a milhares de anos; dessa forma, é muito menor que as dimensões de evolução de uma determinada paisagem e mais que as flutuações causadas por variações anuais do clima.

O Quadro 2.3 apresenta os intervalos temporais para a identificação de processos chaves que afetam a transformação da paisagem. Cada uma das cinco categorias gerais de processos-chaves apresentados contém uma variedade de processos-chaves atuando.

Inicialmente os processos, apresentados no Quadro 2.3, geológicos e climáticos refletem as variáveis de base que são responsáveis pela estruturação das formas sub e superficial da terra e na transformação da paisagem, respectivamente; em seguida, a categoria padrões de colonização avalia o crescimento de organismos que podem ser naturais ou antropogênicos e ocorrer sobre curtos ou longos períodos de tempo; a quarta categoria contém os distúrbios nos processos chaves que são os de maior dificuldade de previsão e de se produzir, podendo ser endógenos ou exógenos e afetar a direção e a velocidade da dinâmica de paisagem; finalmente, a categoria cultural onde os processos transformadores da paisagem podem ocasionar mudanças tanto físicas, como culturais, que ocorrem sobre longos ou curtos períodos e podem ser naturais ou antrópicas, esta é uma área em crescimento na investigação da paisagem (Morelli, 2002).

Quadro 2.3 – Período de duração para processos-chaves que afetam a dinâmica da paisagem

PROCESSOS	< 1 ano	anos	décadas	séculos	milênios	Centenas séculos	> 100.000 anos
<i>Geológicos</i>							
Placas tectônicas							
Glaciação							
Erosão							
Deposição							
<i>Climáticos</i>							
Idade gelo							
Aquecimento global							
<i>Padrões colonização</i>							
Evolução Biológica							
Movimentos naturais							
Agentes antropogênicos							
Agentes patogênicos							
Dinâmica população humana							
<i>Distúrbios</i>							
Fogo/supressão							
Vulcões							
Inundações							
Tempestades							
Desmatamento							
Mineração							
Agricultura							
Suburbanização							
Construção de Estradas							
<i>Processos Culturais</i>							
Valores Culturais							
Controle legal da terra							
Padrões de colonização							
Avanços no transporte							
Atividade econômica							

Fonte: Modificado de Morelli, 2002

Morelli (2002) considera que em uma investigação inicial sobre a história de uma paisagem deve-se trabalhar com as escalas temporais de milênios a anuais, porque em cada uma delas podem ocorrer processos-chaves que não são aparentes em outras escalas.

O entendimento dos processos chaves que influenciam a trajetória evolutiva da paisagem é condição fundamental para análise dos processos antrópicos de apropriação dos recursos naturais. Desta maneira, a “lógica” que permeia a sobre-utilização, a sub-utilização ou a não utilização está relacionada ao referencial político, social e econômico adotado.

As transformações podem ocorrer em grandes extensões territoriais (completa) ou restritas a mesma unidade de paisagem ecótopos (incremental). Transformações completas ocorrem quando fenômenos de grande abrangência atuam em toda a paisagem; já as mudanças incrementais, que ocorrem de ecótopos para ecótopos, causam mudanças na paisagem quando estas são persistentes e os ecótopos são não-resilientes. No espaço e o tempo, mudanças incrementais, agregam em si um padrão geral de dinâmica e evolução. Cabe lembrar que nem todos os processos atuantes em uma paisagem são igualmente significantes em seus efeitos, particularmente com respeito à sua transformação (Morelli, 2002).

Embora se costume tratar com escalas de até algumas centenas de anos, alguns autores têm procurado estender este período de tempo no sentido de compreender os processos de evolução da paisagem. Naveh (1982), discutiu a evolução da paisagem antropogênica do Mediterrâneo desde o paleolítico até períodos recentes. Considerando períodos ainda mais extensos, Delcourt e Delcourt (1988), consideram a necessidade de se conhecer as mudanças nas paisagens ocorridas em todo o Quaternário (1,8 m.a.) que possibilitaria predizer futuras tendências de evolução da paisagem em escala local (3), regional (2) e global (1).

Um importante conceito é que a paisagem é dinâmica e transforma-se através do tempo, mas nem todos os processos da paisagem, como por exemplo, vegetação, solo, ocorrem, simultaneamente, ou na mesma taxa. A interação entre elementos tão distintos como vegetação, atmosfera e clima é bastante complexa, onde cada elemento possui um tempo de permanência diferente (Quadro 2.4).

Quadro 2.4 – Tempo de permanência⁴ de diversos processos relacionados ao sistema Terra.

Processos	Escala de Tempo
Precipitação	Minutos a horas
Transpiração proveniente da mata	Horas a dias
Mudanças de composição das espécies	Meses a anos
Formação dos solos	Anos e séculos
Processos geomórficos/geológicos	Séculos a milhares de anos, não estão incluídos vulcanismo, atividade sísmica, tsunami
Processos geohidrológicos	Séculos a milhares de anos

Fonte: modificado de Habber, 1990

Uma outra forma de classificar uma paisagem é através do grau e do tipo de interferência antrópica que uma determinada região foi afetada. Desta forma, dependendo da relação entre a matriz e os fragmentos de uma paisagem (por exemplo, elementos de uso do solo) se estabelece uma classificação baseada no quanto esta paisagem foi modificada (Quadro 2.5). Esta classificação pode ter uma importância significativa na avaliação das condições de infiltração de uma região ou de uma bacia.

Quadro 2.5 - Classificação dos geossistemas com base na interferência antrópica

Paisagem Natural	Sem influência direta do homem. Capazes de auto-regulação considerando grandes escalas de tempo.
Paisagem Manejada	Manejo de pastagem e floresta. Mudanças pouco significativas após interferência antrópica. Fragmentação. Capacidade de auto-regulação.
Paisagem Cultivada	Pequenos núcleos urbanos e geo/ecossistemas naturais ou manejados dentro da paisagem predominantemente agrícola ou de pasto. Limitada capacidade de auto-regulação.
Paisagem Peri-Urbana	Mistura heterogênea de áreas residenciais, comerciais, áreas agrícolas e vegetação manejada.
Paisagem Urbana	Área densamente construída. Sistema criado para indústria, economia e cultura.

Fonte: modificado de Habber, 1990

⁴ Tempo de permanência – é o tempo entre o início e o término do processo analisado. As modificações e interações dos elementos da paisagem influenciam na escala do tempo.

2.6. Indicadores Ambientais

As primeiras discussões sobre os indicadores ambientais ocorreram na década de 70 no sentido de se estabelecer indicadores e índices ambientais. Entretanto, foi a partir da realização da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento de 1992, no Rio de Janeiro, que a construção de indicadores e índices ambientais tomou uma maior evidência no cenário internacional, incluindo a informação ambiental no processo de tomada de decisões (Lenz *et al.*, 2000).

A partir da década de 90 passou-se a desenvolver métodos estatísticos mais adequados às incertezas das questões ambientais (Hewitt, 1992; Ott, 1995) e ao mesmo tempo possibilitando obter informações mais confiáveis sobre a sua qualidade.

Conforme ressalta Serra (2002), “firmou-se um compromisso, no âmbito das Nações Unidas, para identificar conjuntos de indicadores, descrever metodologias, definir estruturas para organizá-los, testá-los no contexto nacional e promover treinamentos relativos ao seu uso”. Ainda segundo Serra (2002), diversos órgãos das Nações Unidas, organizações internacionais e nacionais e ONGs, vêm trabalhando neste sentido como: *United Nations Development Program* (UNDP), *United Nations Environment Program* (UNEP), Banco Mundial, *World Resources Institute* (WRI), *Statistical Office of the European Commission* (EUROSTAT).

Os trabalhos desenvolvidos por estas instituições refletem um investimento cada vez maior na obtenção e análise de dados estatísticos e no desenvolvimento de modelos aos níveis nacional e internacional.

A diversidade de procedimentos e grau de evolução dos dados em diferentes regiões do planeta leva a uma falta de consenso no sentido de determinar quais indicadores seriam os mais apropriados para a construção de uma base comum.

Este processo tem se dado em graus bastante diferentes de país para país e depende fundamentalmente da base de dados disponível e do tempo de operação das redes de monitoramento. Portanto, estabelecer redes de monitoramento modernas e operantes é um passo fundamental para a construção de indicadores ambientais.

Entre os países pioneiros com relação ao desenvolvimento de indicadores ambientais está o Canadá que publica, já há algum tempo, uma lista de indicadores (Environment Canadá, 1991). Entretanto, Berger (1996), ressalta que esta lista se concentra nos parâmetros químicos e

biológicos relacionados com a poluição e pouca atenção tem sido dada para os processos abióticos e aqueles parâmetros que determinam a natureza da paisagem.

No âmbito dos países da América Latina e Caribe, a construção de conjuntos de indicadores ambientais ainda é incipiente. As iniciativas existentes são de competência de organismos governamentais de meio ambiente e/ou instituições estatísticas, compreendendo escalas diversas e enfoques metodológicos distintos (CEPAL, 2001).

No que se refere ao Brasil, a construção de um conjunto de indicadores de desenvolvimento sustentável foi elaborada pelo IBGE (2005) e organizados em relação aos estados da federação. Foram produzidos 50 indicadores envolvendo as áreas sociais e ambientais e temas bastante diversos como: saúde, educação, população, habitação, atmosfera, terra, oceanos, mares e áreas costeiras, biodiversidade e saneamento.

No tocante aos indicadores ambientais o ideal é que representem com fidelidade as condições do meio, serem de fácil interpretação, serem capazes de mostrar tendências temporais, estarem relacionados às atividades humanas e às mudanças correlatas do meio; seja possível a comparação com padrões ou valores de referência, fácil acesso, com conceitos bem definidos podendo ser empregados em prognósticos, modelos e sistemas de informações. Segundo Berger (1996), indicadores ambientais deveriam ser quantificados e seu conhecimento deveria fornecer a chave que torne possível, por exemplo, perceber uma tendência ou um fenômeno que de outra forma seria difícil detectar.

Estão sendo enfatizado, neste trabalho, apenas os geoindicadores, que se constituem “medidas de processos geológicos e do meio físico ocorrendo perto, ou na superfície terrestre e sujeitas à variações significantes para monitoramento ambiental em períodos igual ou inferior a 100 anos” (Berger e Iam, 1996).

Por outro lado, embora com diferentes origens conceituais, os geoindicadores podem ser relacionados com a noção de fragilidade e evolução da paisagem. A ecologia da paisagem ao tratar com estrutura, função e dinâmica necessita informações acerca do papel funcional dos elementos do meio físico envolvidos. Neste sentido, geoindicadores ligados ao sistema solo-água-floresta tem um papel fundamental na compreensão dos fluxos envolvidos e podem demonstrar a importância dos processos abióticos na estruturação das paisagens e de processos geohidrológicos.

2.6.1. Conceitos

Em face dos objetivos específicos e funções que se desejam alcançar, o conceito de indicadores ambientais possui uma diferença de significados entre diferentes autores.

A Organization for Economic Cooperation and Development - OECD (1994), recomenda a adoção de três grupos de indicadores: do estado do meio e dos recursos naturais (bióticos e abióticos), das pressões das atividades antrópicas sobre o meio (agricultura, urbanização, estradas, indústrias) e dos agentes responsáveis pelo processo.

Os preceitos para seleção de indicadores ambientais, além dos listados no item 2.6, são de ter uma relação custo/benefício adequada, estar documentado, não ser redundante com outros indicadores e ter qualidade reconhecida. A confiabilidade dos dados a partir de validações científicas e existência de séries temporais adequadas é um dos principais preceitos para seleção do indicador. Outro preceito fundamental é a coerência entre os dados e as premissas do planejamento e gestão, como escala, sensibilidade a mudança do meio e aplicabilidade às propostas de planejamento.

É muito importante inicialmente, selecionar os indicadores a partir de uma matriz que tenha em uma coluna as questões-base do plano e, na outra, questões relativas aos indicadores como: o que avaliar?; como avaliar?; qual o nível de correlação com o problema?; origem da informação?; e, qual o espaço físico e de tempo?

2.6.2 Pirâmide de Informações

A pirâmide de informação foi apresentada por Serra (2002), no sentido de organizar e posicionar as informações em camadas na qual, da base para o ápice, representa um nível crescente de agregação de dados. As camadas mostradas na Figura 2.5, seriam categorias interdependentes onde, para se subir um determinado nível, necessitaria um aumento no conteúdo da informação. Na parte superior da pirâmide encontram-se os indicadores e índices que representam a forma mais sintética de agrupamento de dados primários derivados de monitoramentos e análises de dados.



Figura 2.5 - Pirâmide de Informação (Serra, 2002).

Quando se caminha da base para o ápice, se vai na direção de níveis crescentes de agregação de dados. Os níveis de agregação dos dados na “pirâmide de informação” possibilitam uma ampla visão e ajudam a compreender a importância de se estabelecer indicadores a partir de uma determinada base preliminar de dados.

Na porção inferior da pirâmide se situariam os dados primários, os quais necessitam serem consistentes para não comprometerem a proposição do(s) geoindicador(es). No nível hierárquico seguinte temos os dados analisados, sobre os quais deveriam ser utilizadas técnicas mais aprimoradas considerando, sempre que possível, os princípios da aleatoriedade e da incerteza que acompanham a análise dos dados ambientais.

Em função de que estes dados normalmente apresentam significativa heterogeneidade espacial e temporal, é fortemente recomendada a utilização de abordagens de cunho espacial — via sistemas de informações geo-referenciadas — e tratamento estatístico aplicado. No nível acima, temos a formulação dos indicadores ambientais reduzindo o ruído da informação e propondo aqueles que podem ser, potencialmente, avaliados quali/quantitativamente. Finalmente, no nível hierárquico mais superior, tem-se a construção de índices, com um enfoque exclusivamente quantitativo. Os índices podem representar um quadro simplificado do estado do ambiente e, em face desta simplificação, serem mais adequados para tomadas de decisões e na orientação das ações de planejamento.

Lorenz *et al.* (2001), destaca que enquanto os indicadores são construídos, tendo como base critérios científicos; os índices refletem uma forma compacta e densa de informações para

gerenciamento e desenvolvimento político, onde as preferências sociais influenciam os critérios de ponderação das informações para a construção dos índices; e que desta maneira procuram dar uma resposta para as necessidades da sociedade.

Os indicadores e índices representam, portanto, a forma mais sintética de agrupamento de dados primários derivados de programas de monitoramento e análises de dados. Conforme ressalta Serra (2002), a pirâmide de informações pode ser pensada como um funil invertido, cuja base comporta uma grande quantidade de dados que devem ser comprimidos para gerar, no topo, um índice. Se a análise dos dados segue uma sistematização técnico-científica adequada, a construção dos indicadores e índices vai depender da base de dados que tanto pode ser excessiva como deficitária.

2.6.3 Geoindicadores Ambientais

Os relatórios de caráter regionais e referentes à situação ambiental de alguns países dão maior importância aos parâmetros biológicos e químicos relacionados à poluição; poucos tratam com parâmetros relacionados à dinâmica do meio físico e como estes processos influenciam nas mudanças da paisagem e na intensificação de fenômenos como erosão acelerada, assoreamento, inundação e variação no nível da água subterrânea.

No caso do Canadá que possui um dos melhores programas de monitoramento ambiental, Berger e Iam (1996), estimam que menos de 1% dos parâmetros estão relacionados ao meio físico enquanto cerca de 80% estão relacionados ao controle qualitativo e quantitativo da água.

Um dos motivos pelos quais os geoindicadores vem sendo negligenciados em diversos programas ambientais é certamente devido ao fato que fenômenos geológicos freqüentemente envolvem enormes períodos de tempo (escala de milhões de anos) o que é aparentemente incompatível com a curta escala da civilização humana. Porém, a recente ênfase que muitos pesquisadores têm dado para o período Quaternário, particularmente o Holoceno (últimos 10.000 anos), tem demonstrado que fenômenos geológicos de origem natural podem acontecer em curtíssimos períodos de tempo geológico, ou seja, dentro da escala antrópica. (Soares *et al.*, 2005).

Por outro lado, nos últimos anos, têm surgido esforços para congregar e estabelecer bioindicadores (Jeffrey e Madden, 1991), indicadores para os solos (Fedoroff e Courty, 1989),

indicadores para o clima (relatórios anuais do *Intergovernmental Panel Climate Change*, IPCC) e indicadores para as condições das florestas (Riitters *et al.*, 1992).

No sentido de se estabelecer parâmetros idênticos para o meio físico foi criado, em 1992, pela International Union of Geological Sciences, um Grupo de Trabalho designado “Cogeoenvironment” o qual procurou desenvolver indicadores geológicos ou “geoindicadores” para serem aplicados no monitoramento dos processos abióticos do meio físico.

De uma maneira um pouco tardia tem surgido esforços para a criação de geoindicadores, principalmente a partir da publicação do livro de Berger e Iam (1996).

Desta forma, este trabalho procura discutir, analisar e propor geoindicadores assim como alguns critérios e técnicas de monitoramento que podem ser aplicadas em programas de gestão e monitoramento de bacias hidrográficas.

2.6.4 Conceito e Lista de Geoindicadores

Pela definição do “Cogeoenvironment”, geoindicadores são “medidas de processos geológicos e fenômenos ocorrendo perto, ou na superfície terrestre, e sujeitas a variações significantes para monitoramento ambiental em períodos igual ou inferior a 100 anos” (Berger e Iam, 1996).

A ênfase é dirigida para processos abióticos ocorrendo em diferentes escalas (áreas variando de 0.1 a 100 km) considerando eventos graduais ou catastróficos. Os geoindicadores podem ter origem natural ou antrópica sendo, muitas vezes, difícil diferenciar estas causas. Informações provenientes de paleo-registros podem ser bastante úteis para distinguir processos naturais dos processos decorrentes da ação do homem, embora, em muitos casos, haja um elevado grau de incertezas nestes registros. A Quadro 2.6, organizada por Berger e Iam (1996), estabelece vinte e sete geoindicadores onde são ressaltados, para cada um, sua influência natural e antrópica.

Quadro 2.6 – Suscetibilidade natural vs. humana sobre os geoindicadores considerando período de tempo inferior a 100 anos ● forte suscetibilidade; ○ baixa suscetibilidade

Geoindicadores	Suscetibilidade à processos naturais	Suscetibilidade à processos antrópicos
Águas de superfície	○	●
Águas subterrâneas – nível freático	○	●
Águas subterrâneas – qualidade	○	●
Águas subterrâneas – química na zona não-saturada	●	●
Áreas úmidas – extensão, estrutura e hidrologia	●	●
Ambientes fluviais – morfologia	●	●
Ambientes fluviais – escoamento	●	●
Movimentos de massa	●	●
Sedimentação – transporte e armazenamento em rios	●	●
Sedimentação – composição	●	●
Solos – erosão e sedimentação	●	●
Solos – qualidade	○	●
Sub-superfície – soerguimentos e subsidências	●	○

Fonte: Berger e Iam, 1996, simplificado

Como pode se observar no quadro acima, o conceito de geoindicadores referem-se aos mais diferentes geossistemas terrestre e, de certa forma, seu conceito não deve ser confundido com a noção de processo físico. Enquanto o conceito de “processos do meio físico” tem uma conotação mais ampla, os indicadores devem traduzir as alterações impostas sobre o meio físico e orientar na definição dos parâmetros de medição que deverão ser estabelecidos em seguida.

Porém, é preciso considerar que a simples apresentação de uma lista para os processos do meio físico não evidencia as inevitáveis interações e combinações que seguramente existem entre diferentes conjuntos de geoindicadores. Embora os processos bióticos não sejam considerados é preciso destacar as interações entre os processos do meio físico e a cobertura vegetal (Soares *et al.*, 2005).

Neste sentido, o estudo dos geoindicadores exige uma integração de mais alto nível baseado em princípios sistêmicos que possibilitem estabelecer direções de fluxos e retroalimentações entre os diferentes processos envolvidos (Simões, 1997).

Apesar dos geoindicadores se constituírem uma importante ferramenta no planejamento geoambiental são poucos os trabalhos de pesquisa e divulgação dos geoindicadores no Brasil. Entre estes trabalhos se pode citar os de Coltrinari (1996), Bitar *et al.*, (1996), Simões (1999), Serra (2002).

Porém isto não é privilégio do Brasil. Os relatórios de caráter regional e nacional referentes à situação ambiental de alguns países dão maior importância aos parâmetros biológicos e químicos relacionados à poluição. Poucos tratam com parâmetros relacionados à dinâmica do meio físico e como estes processos influenciam nas mudanças da paisagem e na intensificação de fenômenos tais como: erosão acelerada, assoreamento, inundação e variação no nível de água subterrânea. (Soares *et al.*, 2005).

Como exemplo, a atividade erosiva acelerada pode deslocar volumes imensos do solo em poucas décadas a partir de mudanças de origem natural ou antropogênica (Descroix e Gautier, 2002; Viles e Goudie, 2003).

2.6.5 Análise do Meio Físico à Luz do Processo de Infiltração

O ciclo hidrológico é o ponto de partida da água que chega ao solo e pode ser acondicionada nas depressões ou se infiltrar, aumentar a umidade do solo e/ou abastecer a água subterrânea. O solo quando não absorve mais água devido ao excesso, começa a se mover em superfície ou em subsuperfície, podendo provocar erosão.

O índice que mede a velocidade com que a água da chuva se infiltra no solo é chamado taxa de infiltração. Durante um evento chuvoso, os espaços entre as partículas do solo são preenchidos por água, ocorrendo o decréscimo das forças capilares.

Desta forma, as taxas de infiltração variam com o tempo, são mais rápidas no início da chuva e diminuem até alcançar o máximo de absorção pelo solo. Quando a capacidade de infiltração é excedida satura-se a capacidade de armazenamento do solo e têm início dois tipos de fluxo: escoamento superficial e subsuperficial. As taxas de infiltração variam ao longo de um evento chuvoso, mas também tem suas características condicionadas às características do solo, ao uso e ocupação e à declividade das vertentes.

O impacto do uso predatório do solo no comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, em áreas rurais, é um elemento de análise fundamental na preservação,

regularidade e uso de recursos hídricos. Normalmente capacidades elevadas de infiltração estão associadas as florestas, que desempenham papel fundamental em uma bacia hidrográfica, quer seja nas regiões mais elevadas onde a declividade mais acentuada está associada à solo pouco profundo e instável, quer seja, nas partes mais baixas, nas áreas de mata ciliar, protegidas legalmente e inseridas nas paisagens agrícolas.

Em um intervalo amplo de escalas espaciais e temporais, o ciclo hidrológico atua de forma integrada com outros ciclos de matéria e energia. De acordo com Mediondo *et al.*, (2001), o ciclo hidrológico deve ser analisado segundo os seus componentes, de acordo com a dinâmica de sua ocorrência e consideradas as características do sistema envolvido. A dinâmica abrange as mudanças das variáveis no tempo e no espaço, enquanto o espaço agrega as características (solo, cobertura, oceanos...) do sistema, que apresenta poucas variações em curtos espaços de tempo. Em síntese, a representação dos processos hidrológicos em diferentes escalas tem encontrado resistência nos seguintes aspectos:

- a heterogeneidade espacial dos sistemas hídricos e a incerteza com a qual os parâmetros e processos são medidos em diferentes escalas;
- a dificuldade de representar os processos caracterizados e analisados na microescala para outras escalas de bacias hidrográficas;
- a falta de relação entre os parâmetros de modelos matemáticos com as diferentes configurações espaciais encontrados na natureza.

O problema reside em conhecer como variáveis e parâmetros são representados em diferentes escalas e como estabelecer as funções de transferências entre essas escalas. O principal objetivo, nesse contexto, é o de determinar qual é a área representativa apropriada para uma variável hidrológica que identifique a escala do processo natural. Uma vez encontradas as variáveis explicativas numa escala, o passo seguinte é encontrar as funções de transferência para as escalas vizinhas (Mediondo *et al.*, 2001).

Como já mencionado, a análise da infiltração em uma paisagem diversificada e fragmentada deve ser realizada de forma a considerar os diversos elementos abióticos e bióticos que compõem esta paisagem. Para esta análise foi estabelecido um critério de avaliação qualitativa baseada na ponderação dos diferentes níveis de abordagem considerando rochas e estruturas (unidades geológicas), relevo (unidades geomorfológicas), declividade, solos (unidades pedológicas), precipitação e uso da terra. Esta análise com vistas à distribuição espacial de

parâmetros e variáveis do meio físico foi realizada a partir de dois níveis de abordagem: um regional e outro em uma bacia representativa (ribeirão Guaratinguetá).

Neste ponto, procura-se compreender as variações nos significados a respeito de unidade, sistemas complexos e unidade homogênea.

Para Christofolletti (1999), unidade representa a qualidade do que é um, único, só ou sem partes, sendo tudo o que pode ser considerado individualmente. A harmonia de conjunto estabelece-se como norma de caracterização, podendo inclusive ser composto por agrupamento de seres individuais considerados pelas reações mútuas que existem entre si, por seus caracteres comuns, por sua mútua dependência. Nesse contexto, as unidades areais ou os lugares são entidades individualizadas, únicas, em sua ocorrência.

Um sistema complexo pode ser definido como sendo composto por grande quantidade de componentes interagentes, capazes de intercambiar informações com seu entorno condicionante e, também, de adaptar sua estrutura interna como sendo consequência ligada a tais interações (Christofolletti, 1999).

Os sistemas têm elementos ou unidades que são as suas partes constitutivas — os componentes. Os elementos integrantes dos sistemas encontram-se interrelacionados, um dependendo do outro, através de ligações que indicam fluxos. Denominam-se atributos as qualidades dos elementos ou do sistema com o objetivo de caracterizá-lo. Estes podem se referir à área, volume, composição, densidade de fenômenos observados, entre outras.

O conceito de “unidade homogênea” apresenta variações entre os diferentes autores e instituições que o utilizaram. As definições a seguir estão atreladas as áreas de conhecimento da Geologia de Engenharia e à Cartografia Geotécnica, que por sua vez estão voltadas para a solução de problemas ligados a implantação de obras de engenharia civil e a riscos geológicos urbanos (IG, 1993). A unidade homogênea pode corresponder a:

- uma área de comportamento geotécnico similar (Lemos, *et al.*, 1990);
- uma área estabelecida com base nas características do substrato rochoso, pressupondo que a geologia imprime uma regularidade na definição da unidade em termos geotécnicos, hidrológicos e de recursos minerais (IG, 1990);
- uma área geograficamente delimitada com as mesmas potencialidades e fragilidades, quanto aos seus recursos minerais, água subterrânea e à geotecnia, apresentando respostas semelhantes a uma intervenção específica (Hirata *et al.*, 1991);

- uma área com certa probabilidade (expectativa) de ocorrência de determinados riscos geológicos (Nakazawa, *et al.*, 1991);
- uma área com os mesmos atributos ou parâmetros (Nakazawa, *et al.*, 1991) e,
- área com aptidão à determinada forma de uso e ocupação (Nakazawa, *et al.*, 1991).

O IG (1993), com a finalidade de utilizar uma denominação mais adequada às finalidades do projeto e de estar em concordância com os termos utilizados, adotou nos estudos para o município de Campinas o termo “tipos de terreno” (Pires Neto e Lepsch, 1992) que é definido com base no relevo, que é considerada como uma síntese histórica e dinâmica das interações que ocorreram entre a litosfera, hidrosfera e atmosfera ao longo do tempo.

Tucci (1993) e Lanna (1983) ao discutirem as províncias hidrológicas como sendo regiões hidrológicamente homogêneas, ou seja, regiões identificadas por apresentarem similaridade nos fenômenos integrantes do processo hidrológico, de forma a possibilitar a transferência de informações de um local para outro. Assim, a escassez de dados hidrológicos é combatida com a otimização das informações disponíveis, através de um conjunto de ferramentas que buscam explorar ao máximo as informações, visando à estimativa de variáveis hidrológicas em locais sem dados.

Distinguir um sistema na multiplicidade das características e fenômenos da superfície terrestre é procurar identificar os elementos componentes e as relações existentes, considerando a proximidade espacial das unidades, o objetivo comum proposto que permeia o olhar sobre as unidades, a organização e a funcionalidade

Neste trabalho, utiliza-se o termo “unidade homóloga” que expressa equivalência, correspondência, semelhanças estruturais e de origem para os elementos constitutivos da paisagem; uma área com os mesmos atributos ou parâmetros, embora admitindo aspectos diversos intrínsecos a cada elemento (atributo).

2.6.6 Critérios de Ponderação na Construção de Atributos Associados aos Mapas Temáticos

A enorme diversidade de vegetação, usos, topografia e solos em bacias hidrográficas e suas interações com componentes meteorológicos que variam no tempo e no espaço produzem efeitos complexos. Para cada um destes elementos existe uma escala de variação própria, tanto no

tempo com no espaço, fazendo com que os processo hidrológicos possam ser investigados sobre uma faixa bastante extensa de escalas temporais e espaciais. Em um extremo, investigações em microescala são exemplificadas por estudos do movimento de contaminantes ou da própria água no interior do solo. No outro extremo, problemas envolvendo alterações ambientais só podem ser resolvidos a partir de uma melhor compreensão dos processos hidrológicos em macroescala.

Segundo Shamir 1995, apud Mediondo *et al.* (2001) a hidrologia trata de problemas que variam desde a escala pontual, passando por plano de vertentes, bacias de diferentes tamanhos, até escalas regionais e globais. A importância é compreender como se modificam (ou não) as leis que regem os processos nas diferentes escalas. Como a heterogeneidade cresce com a escala, é importante que se saiba se as mudanças nas repostas se devem a esta maior heterogeneidade, ou se as leis básicas se alteram com a escala.

Mediondo *et al.*, (2001), considera, que para permitir a análise da escala dos processos hidrológicos são apresentados os aspectos conceituais, que envolvem os elementos qualitativos e quantitativos e as metodologias correspondentes.

Neste trabalho foi utilizado o conceito de elementos qualitativos, considerando que normalmente a escala é entendida de maneira puramente quantitativa, como a simples redução ou ampliação das variáveis espaciais alteradas sobre uma faixa ampla e contínua. Como a maioria das extrapolações, este conceito simples de escala não pode ser utilizado em qualquer situação, particularmente em sistemas naturais, onde as escalas dos objetos não são arbitrárias ou escolhidas previamente. Elas estão ligadas funcionalmente a sua composição física e ao balanço de forças atuando sobre o sistema; as formulações mais apropriadas num dado nível de maneira geral não são utilizáveis em níveis imediatamente próximos. Esta é uma das principais razões para o vagaroso avanço da ciência hidrológica na escala de bacia, uma vez que esta está limitada às observações dos efeitos na escala hidráulica de canais e a de vertente hidrográfica (Mediondo *et al.*, 2001).

Ainda, segundo Mediondo *et al.*, (2001), para a natureza, não é possível definir e impor escalas, mas devem-se procurar aquelas que existem e compreender suas relações e padrões. Os resultados exigidos nos problemas práticos são cada vez mais complexos, é raro ter estimativas quantitativas com um total embasamento conceitual. Diante disto, a confiabilidade em métodos quantitativos tende a ser substituída por um melhor entendimento do tipo qualitativo, isto é, qual

é o comportamento em cada processo do padrão natural. A precisão dos métodos qualitativos pode ser questionada, mas estes são mais simples, modestos e parcimoniosos.

A natureza qualitativa está baseada em seis caracteres relevantes às escalas hidrológicas (Mediondo *et al.*, 2001):

- discreto;
- relativista;
- dominante;
- sistêmico;
- de complexidade;
- transdisciplinar.

Discreto: entre as características naturais, o espectro de escalas comuns tende a se concentrar ao redor de estados discretos que se diferenciam bem entre si. Assim, os estados discretos quando caracterizados permitem definir e quantificar hierarquias e transições de escalas, responsáveis pela transferência de informação.

Relativista: está ligado ao conceito de ordem na qual o sistema pode ser considerado em equilíbrio. Desta forma, um conjunto de leis físicas pode ser válido em um nível escalar, mas parecer anti-intuitivo a partir de um nível diferente.

Dominante: existem diferentes forças atuantes que tendem a dominar os processos nos vários níveis de escala, impondo limitações sobre a validade das relações matemáticas com base em evidência empírica observada em uma dada escala (Klémes, 1993).

Sistêmica: as interações dos componentes, levando a uma noção de natureza multivariada dos processos.

Complexidade: é representado pelo grau e tipo de heterogeneidade visualizado no sistema, suscetíveis de quantificar. Isto implica estudar a informações contidas, por exemplo, nas micro e macro escalas.

Transdisciplinar: a compreensão dos processos naturais envolve conhecimentos que são desenvolvidos em diferentes áreas e disciplinas de estudo. O desafio de entender uma grande diversidade de processo e escala requer profissionais sem os limites tradicionais de suas disciplinas particulares.

Quando se conceitua os fenômenos (neste caso, infiltração) como sistemas, uma das principais atribuições e dificuldades está em identificar os elementos, seus atributos (variáveis e ponderações) e suas relações, a fim de delinear de forma clara o sistema em foco.

Chorley e Kennedy (1971), levando em consideração critérios para a complexidade da composição integrativa de sistema propõe uma classificação estrutural e distinguem onze tipos. Dentre eles, o mais relevante para este trabalho é o sistema de processos-respostas. A caracterização do sistema é a seguinte: são formados pela combinação de sistemas morfológicos e sistemas em seqüência. Os sistemas em seqüência indicam o processo, enquanto o morfológico representa a forma, a resposta a determinado fundamento.

Ao definir o sistema de processos-respostas, a ênfase maior está localizada para identificar as relações entre o processo e as formas que dele resulta, caracterizando a globalização do sistema. Consequentemente, pode-se definir e estabelecer um equilíbrio entre o processo e a forma, de modo que qualquer alteração no sistema em seqüência será refletida por alteração na estrutura do sistema morfológico (isto é, na forma), através de reajustamento das variáveis, em vista a alcançar um novo equilíbrio, estabelecendo uma nova forma. Por outro lado, as alterações ocorridas nas formas podem alterar a maneira pela qual o processo se realiza, produzindo modificações na qualidade das entradas fornecidas ao sistema morfológico. Por exemplo, aumentando a capacidade de infiltração de determinada área, haverá diminuição no escoamento superficial e na densidade de drenagem, o que reflete na diminuição da declividade das vertentes. Essa diminuição, por sua vez, facilita a capacidade de infiltração e diminui o escoamento superficial. Ao contrário, diminuindo a capacidade de infiltração de uma área, haverá aumento do escoamento superficial e da densidade de drenagem, o que reflete em maior declividade das vertentes. Este aumento, por sua vez, irá dificultar a capacidade de infiltração e aumentar o escoamento superficial.

Diversos instrumentos podem contribuir para a construção de atributos numéricos associados a mapas temáticos. Dependendo das situações envolvidas, alguns são mais intensivos em suportes lógicos, como modelos matemáticos ou por meios computacionais; ou menos intensivos e permeados por questões de conhecimento da área social. Muitos fatores acabam influenciando e contribuindo para o processo decisório, como a intuição e a experiência adquirida.

Modelos do processo de decisão que disponibilizam o máximo de informação podem ser de grande utilidade e de aplicação. A partir desses pressupostos, o modelo utilizado na escolha da melhor alternativa para construir unidades homólogas à infiltração, foi a atribuição dos valores numéricos às classes de análises.

Primeiramente são listados os principais requisitos que o sistema, objeto de estudo, deve satisfazer, atribuindo-se posteriormente pesos a cada uma de suas classes. Esses pesos simbolizam a importância de cada tema (classes) para o sistema de análise. São números que identificam o tipo de classe de um determinado mapa temático que ocorre em determinada unidade de terreno sobre uma área de estudo. Quanto melhor for uma classe em relação a determinado requisito, maior será seu peso para o referido requisito.

Os pesos atribuídos a cada classe, formam assim um conjunto de pesos da referida alternativa.

A partir das notas pode-se construir uma graduação numérica, de maneira que quanto maior o peso, mais adequada é considerada a opção analisada.

O uso criterioso de notas para as classes analisadas e seu posterior cruzamento pressupõe a visão sistêmica dos atributos analisados e, portanto, a interdependência e complementariedade dos elementos da paisagem no entendimento da dinâmica analisada, nesse caso, a infiltração. A idéia por trás da escolha dos valores de peso foi a de garantir que as classes consideradas secundárias influenciassem minimamente na nota final para construção das unidades homólogas, enquanto os requisitos considerados fundamentais precisariam ter valor de peso suficientemente distante dos demais para que uma alternativa que não cumprisse com um desses requisitos jamais ficasse entre as primeiras posições.

Para a escolha dos melhores atributos na solução do problema estudado nesse trabalho (infiltração) foram considerados relevantes os seguintes requisitos:

- Identificar elementos na paisagem que representam o estado de um processo ou o resultado deste;
- Capacidade de associar valores numéricos pré-estabelecidos baseado na representatividade do atributo em si, no processo;
- Construir uma relação matemática entre elementos do meio físico e o objeto de pesquisa que resulte em uma medida quantitativa;
- Eliminar ambigüidades;

- Facilidade de comparação;
- Facilidade de compreensão para não especialistas;
- Facilidade de levantamento.

Os diferentes elementos do meio físico que compõem a paisagem (rochas e estruturas, relevo, declividade, densidade de drenagem, solos e uso e ocupação do solo) e suas interações com estímulos meteorológicos que variam no tempo e espaço, se apresentam no ambiente com as mais diferentes formas e arranjos. Procurando representar estas diferentes interações, são propostos pesos que variam de 1 (hum) a 5 (cinco) segundo seus atributos em função da capacidade de infiltração (Quadro 2.7)

Na análise da área estudada pode-se constatar a presença de diferentes índices pluviométricos, combinados com diferentes coberturas vegetais, usos do solo e relevo, com distintos tipos pedológicos associados a relevo diferenciados e com substrato geológico distinto com características de pouco a muito fraturados. Desta maneira, com as diferentes formas de combinar os elementos da paisagem, o ciclo hidrológico torna-se não linear no contexto de infiltração das águas.

Quadro 2.7 – Relação de qualificadores e seus respectivos pesos relativos

QUALIFICADORES	PESOS RELATIVOS
Muito Baixa	1
Baixa	2
Regular	3
Boa	4
Muito Boa	5

2.6.7 Indicadores de Sustentabilidade e Recursos Hídricos

Tradicionalmente, os indicadores de sustentabilidade relacionados aos recursos hídricos têm sido fortemente direcionados para o controle de qualidade da água e dos ambientes aquáticos. Indicadores relacionados à disponibilidade hídrica são mais raramente estabelecidos e normalmente associam disponibilidade hídrica com projeções populacionais ou de consumo.

Utilizando a noção de geoindicadores, Osterkamp e Schumm, (1996) e Edmunds (1996) propuseram que descargas líquidas, nível piezométrico e parâmetros físicos dos solos poderiam constituir-se em geoindicadores ambientais relacionados aos recursos hídricos. Entretanto, estes poderiam ser considerados geoindicadores “gerais” que necessitariam ser aprofundados para que possam ser mais adequadamente quantificados e aplicados em bacias de pequeno e médio porte.

Indicadores de disponibilidade hídrica mais voltados para a gestão de bacias hidrográficas de pequeno e médio porte são raramente estabelecidos. A formulação de indicadores com este objetivo deve levar, fortemente, em consideração a integração dos elementos e dos processos do meio físico - natural e modificado - e as interações entre água de superfície e água subterrânea.

Aspectos geológicos, geomorfológicos e pedológicos tem um papel fundamental na capacidade de armazenamento de água em uma bacia. Certamente um elemento de referência fundamental é o processo de infiltração que pode ser o responsável para a manutenção do solo como reservatório dinâmico de produção de água. Do ponto de vista natural, para se avaliar as condições de infiltração de uma determinada região se necessita conhecer como funciona o sistema solo – água e as interações entre a drenagem superficial e a dinâmica do fluxo subterrâneo nas zonas saturadas e não-saturadas dos solos e rochas (Sophocieous, 2002).

Com base nas considerações acima e na análise dos elementos da paisagem em nível regional e de bacia de afluentes é possível estabelecer um número relativamente pequeno de parâmetros que poderiam ser definidos como *indicadores da sustentabilidade hídrica na inter-relação águas superficiais - águas subterrâneas*. Soares, *et al.*, (inédito) propõem os seguintes conjuntos de indicadores:

a) Vazões mínimas – a caracterização das vazões mínimas tem um papel fundamental na sustentabilidade hídrica de uma bacia. Pelo seu papel na manutenção de ecossistemas são também designadas “vazões ecológicas”. No Brasil, a vazão mínima de referência $Q_{7,10}$ tem sido a mais utilizada em projetos e estudos relacionados à gestão dos recursos hídricos. Entretanto, hoje está disponível uma diversidade grande de metodologias para determinar vazões mínimas a partir de abordagens tanto qualitativas quanto quantitativas (Benetti *et al.*, 2003). Neste estudo se propõem os seguintes métodos de abordagem:

- Vazão mínima de sete dias com período de recorrência de 10 anos ($Q_{7,10}$)
- Método utilizando regressões múltiplas
- Método da área de drenagem

Um outro aspecto importante é procurar estabelecer uma associação destes métodos – normalmente pontuais – com técnicas de espacialização através de sistemas de informações geo-referenciadas que permitam que as informações obtidas possam ser regionalizadas para toda a bacia de interesse.

- b) Rebaixamento do nível freático ou nível subterrâneo– o nível freático pode ser apresentado como resultado de um processo de infiltração da água que se iniciou da superfície do solo atravessando a zona não saturada e que se estocou na zona saturada. O processo de infiltração está relacionado à capacidade de infiltração do solo, que por sua vez é função de permeabilidade, do grau de umidade (sucção) e de condições como presença de vegetação, por exemplo, que favoreça este processo. O rebaixamento constante do nível freático pode indicar que não há armazenamento suficiente no sistema que descarregue na drenagem, que há favorecimento e predominância do escoamento superficial. Os resultados do monitoramento do nível freático, acompanhados da observação das transformações físico-ambientais em uma bacia hidrográfica, podem indicar modificações ocorrentes nos processos de recarga e descarga do aquífero, e conseqüentemente revelar que a “saúde hídrica” da bacia pode estar afetada por essas transformações. Assim como nas vazões mínimas, a espacialização da superfície freática é importante, pois possibilita a visualização do comportamento desta superfície com a sazonalidade e possíveis mudanças de comportamento em relação às suas áreas de descarga e de recarga.
- c) Grau de evolução dos processos erosivos – no estudo do grau dos processos erosivos, devem-se separar os processos de desagregação e transporte. Para avaliar os processos erosivos duas abordagens devem ser consideradas: geomorfológica e pedológica. Na abordagem geomorfológica, são considerados os elementos morfométricos relacionados à dinâmica da paisagem e a sua fragilidade aos processos naturais; na abordagem geotécnica o foco é direcionado na definição do grau de fragilidade do solo. A avaliação do potencial erosivo em encostas pode ser executada a partir de diversas propostas de abordagem; entre estas destacam-se as abordagens geomorfológica e geotécnica. Na abordagem geomorfológica, são considerados os elementos morfométricos relacionados à dinâmica da paisagem e a sua fragilidade aos processos naturais; na abordagem geotécnica, a ênfase é direcionada para os ensaios quantitativos. Entre os ensaios para se avaliar, quantitativamente, a erosão destacam-se os ensaios de desagregação conhecidos como “interbitzem” e “pinhole” Araújo (2000).

Outros ensaios são baseados em correlações com as características dos solos, principalmente através da granulometria, sucção, gênese e capacidade de sorção. Um novo método para quantificar os processos erosivos é através da resistência à tração obtida pelo Ensaio de Compressão Diametral conhecido por “Ensaio Brasileiro”.

O Quadro 2.8 mostra de forma sucinta, a relação entre os conjuntos de indicadores, os indicadores de medida e as principais formas de medição.

Quadro 2.8 – Geoindicadores e formas de medição

Conjunto de indicadores	Geoindicadores de medida	Principais formas de medição
Vazão mínima	Q _{7,10} Regressão múltipla	Séries históricas, Dados cartográficos
Rebaixamento do nível freático	Variação intra-anual e inter-anual de nível	Ensaios de campo (piezômetros)
Processos erosivos	Elementos morfométricos Ensaios de desagregação e de tração	Dados cartográficos Ensaios de campo (“interbitzem” e “pinhole”)

Fonte: Soares *et al.*, 2005

CAPÍTULO III

ÁREA DE ESTUDO

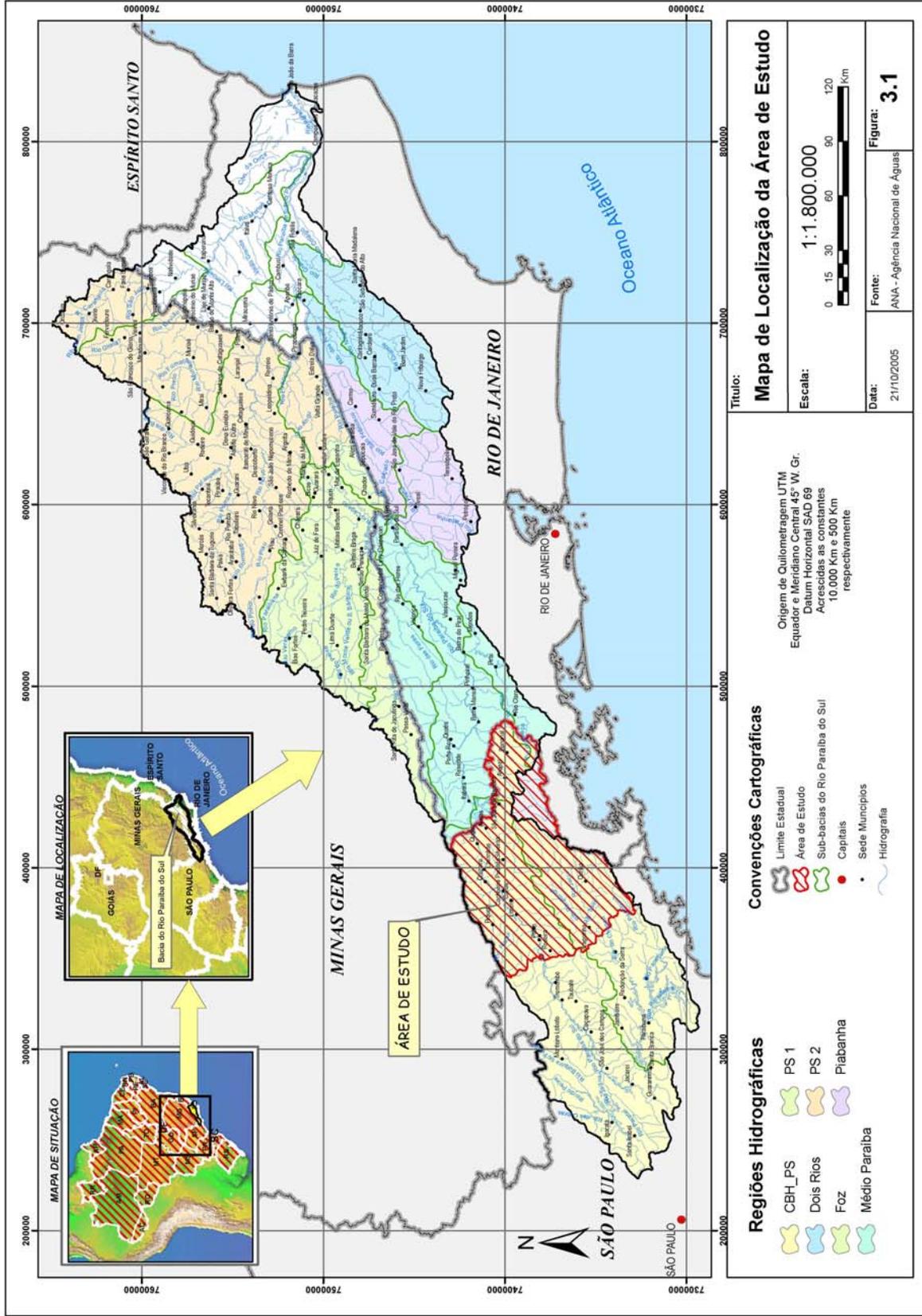
Na região sudeste, a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul tem área de drenagem de 55.500km², inserida em território dos Estados de São Paulo (13.900 km²), Rio de Janeiro (20.900km²) e Minas Gerais (20.700km²), abrangendo 180 municípios. Suas águas são responsáveis pelo suprimento doméstico de 14,3 milhões de habitantes, sendo que destes, 8,7 milhões estão na Região Metropolitana do Rio de Janeiro - RMRJ (Figura 3.1).

A atividade econômica na bacia responde por 12% do Produto Interno Bruto nacional – PIB; e o eixo fortemente industrializado definido por São Paulo-Rio de Janeiro-Juiz de Fora-Cataguazes concentra grande parte dos cerca de cinco milhões de habitantes da bacia.

As águas da bacia sofrem forte degradação provocada pelo despejo diário de um bilhão de litros de esgotos sanitários, com nível de tratamento insignificante; e de efluentes industriais, em geral tratados, mas que contribuem com carga remanescente elevada, que impacta os recursos hídricos de forma significativa.

Outros fatores que compõem a realidade valeparaibana:

- a) disposição final de resíduos sólidos em condições inadequadas;
- b) poluição dos corpos d'água por carga difusa;
- c) o rio Paraíba do Sul é manancial quase que exclusivo de abastecimento público aproximadamente 9 milhões de pessoas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro – RMRJ;
- d) este abastecimento está à jusante da porção paulista onde se concentram os formadores ou “áreas berço” do rio Paraíba do Sul em coexistência não sustentável com um contingente populacional de 1,8 milhões de habitantes (IBGE, 2005) e intensa atividade urbana, industrial e agrícola;
- e) um conjunto de problemas ambientais que se acumulam e cresce ano a ano evidenciam problemas críticos em todos os aspectos ambientais: contaminação das águas por lançamento de esgotos domésticos e industriais sem tratamento adequado, o esgotamento da capacidade produtiva dos solos, sobre exploração dos mananciais e diminuição das áreas de florestas.



No âmbito do Comitê para a Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), os segmentos do estado, município e da sociedade civil, representando as diferentes formas de organização das bacias hidrográficas em SP, RJ e MG, vem estabelecendo um processo de gestão e planejamento participativo dos recursos hídricos da bacia.

No trecho paulista, confinado entre os alinhamentos orográficos das serras do Mar e da Mantiqueira e dispostos paralelamente à linha da costa, encontra-se o vale do rio Paraíba do Sul com seus formadores, os rios Paraibuna e Paraitinga e tributários.

Do ponto de vista geológico, geomorfológico e pedológico, a região “oriental” paulista está estruturada como um espaço regional organizado, sistêmico e moldado em relevos alinhados (sentido NE/SW) que por sua vez, condicionam uma rede hidrológica e de solos associados. Pode ser dividida em três subregiões, com as seguintes características:

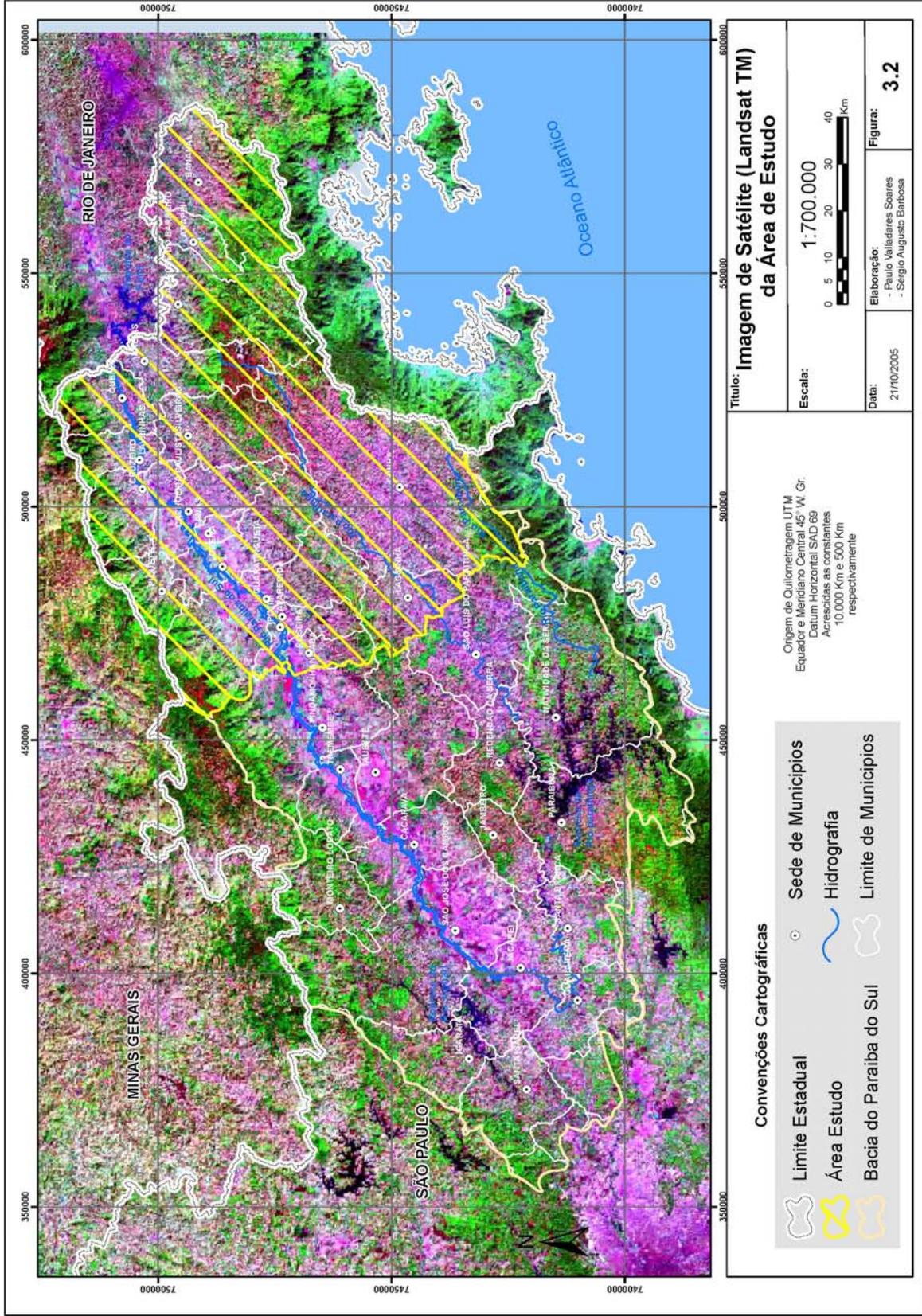
1. Serra da Mantiqueira – É a borda meridional da Serra da Mantiqueira, do embasamento cristalino do pré-cambriano (Proterozóico), apresentando paredões abruptos voltados para S/SE, intercalados por vales e esporões. Ao longo da serra encontramos superfícies regularmente planas provenientes de erosões antigas como os planaltos de Campos do Jordão e maciços alcalinos com cristas elevadas, atingindo de 1.200 a 2.000m acima do nível do mar, como em Itatiaia já no Estado do Rio de Janeiro. As partes serranas onde encontramos as ocupações mais diversificadas e descontínuas, merece uma nova subdivisão, sendo: escarpa SE, escarpa SW e cristas paralelas. Essa morfologia provoca significativas conseqüências à distribuição da pluviosidade.
2. Vale do Paraíba – Inicia-se onde o curso do Rio Paraíba do Sul muda radicalmente de direção em Guararema a jusante dos reservatórios Paraitinga e Santa Branca. Este segue paralelamente ao litoral por aproximadamente 180km atravessando três estados, São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, até sua foz próxima à cidade de Campo dos Goytacazes (RJ). Esta subregião se constitui num compartimento básico da área em estudo por apresentar um maior índice de urbanização e abriga praticamente toda a atividade industrial da região e constitui-se no eixo de circulação entre as metrópoles do Rio de Janeiro e São Paulo. O solo na região é geologicamente classificado como segmento cenozóico formando a Bacia Sedimentar de Taubaté.

3. Serra do Mar – É a borda setentrional do embasamento cristalino pré-cambriano, que compreende a Serra do Mar e paralelamente a do Quebra-Cangalha, caracterizando as zonas do Planalto de Paraitinga, Planalto Bocaina e médio vale do Paraíba, conforme Almeida (1964). Apresenta relevo diversificado e acidentado constituído de morros, morrotes e serras suportadas por rochas migmatíticas apresentando fortes declividades em suas escarpas. As amplitudes altimétricas, bem como, sua proximidade do litoral expõe a região à ação umidificadora do oceano, que proporcionam uma somatória de condições que influenciam na circulação atmosférica, nos índices pluviométricos e na vegetação. Os solos encontrados nesta região são podzólicos e latossolos.

A área de estudo, porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul, devido a sua estratégica localização geográfica entre as duas mais importantes regiões metropolitana do país (São Paulo e Rio de Janeiro), é objeto da implantação de uma série de aproveitamento de usos múltiplos visando a regularização de vazão, controle de cheias e geração de energia elétrica (Figura 3.2). As ações de gestão e planejamento desenvolvidas na bacia têm por objetivo, estruturar tanto em nível federal como estadual, a implementação de políticas públicas no uso e preservação dos recursos hídricos.

A precipitação média, na bacia, é da ordem de 1.400mm/ano, mas exhibe uma grande variabilidade inter-anual alcançando valores entre 1.300 e 2.400mm/ano (Simões *et al.*, 2004) e uma grande variabilidade espacial (Silva, 1999). A variação altimétrica da bacia fica entre 450m e 2.000m. A sua paisagem é formada por um complexo mosaico onde predominam as pastagem (53,4% da área total), vegetação natural e fragmentos de florestas (30,7%), reflorestamento (5,2%), agricultura (6,4%), reservatórios (1,4%) e áreas urbanas (2,9%) (CEIVAP, 2000).

Quanto aos recursos hídricos, em termos quantitativos, a agricultura possui o uso mais relevante quando comparado com abastecimento doméstico e uso industrial. Entretanto, a agricultura está perdendo significância devido ao relevo pouco favorável, a degradação dos solos e a expansão urbana. Parte da bacia, na região compreendida entre Pindamonhangaba e Jacareí, é densamente povoada e concentra grande parte da atividade econômica regional, principalmente industrial. A população no Vale do Paraíba cresceu 300% nos últimos 30 anos; de 518.000 para 1,690 milhão em 2000 (IBGE, 2005), aproximadamente.



Em termos de uma certa homogeneidade nas características históricas, sociais, econômicas, ambientais e do comportamento hidrológico predominante, a região do Vale do Paraíba paulista pode ser subdividida em quatro compartimentos conforme pode se observar na Figura 3.3: o compartimento nascente, o reservatório, o urbano-industrial e o agrícola-urbano-industrial. A compreensão sistêmica das características de cada compartimento é fundamental no desenvolvimento de ações de planejamento e gestão de recursos naturais.

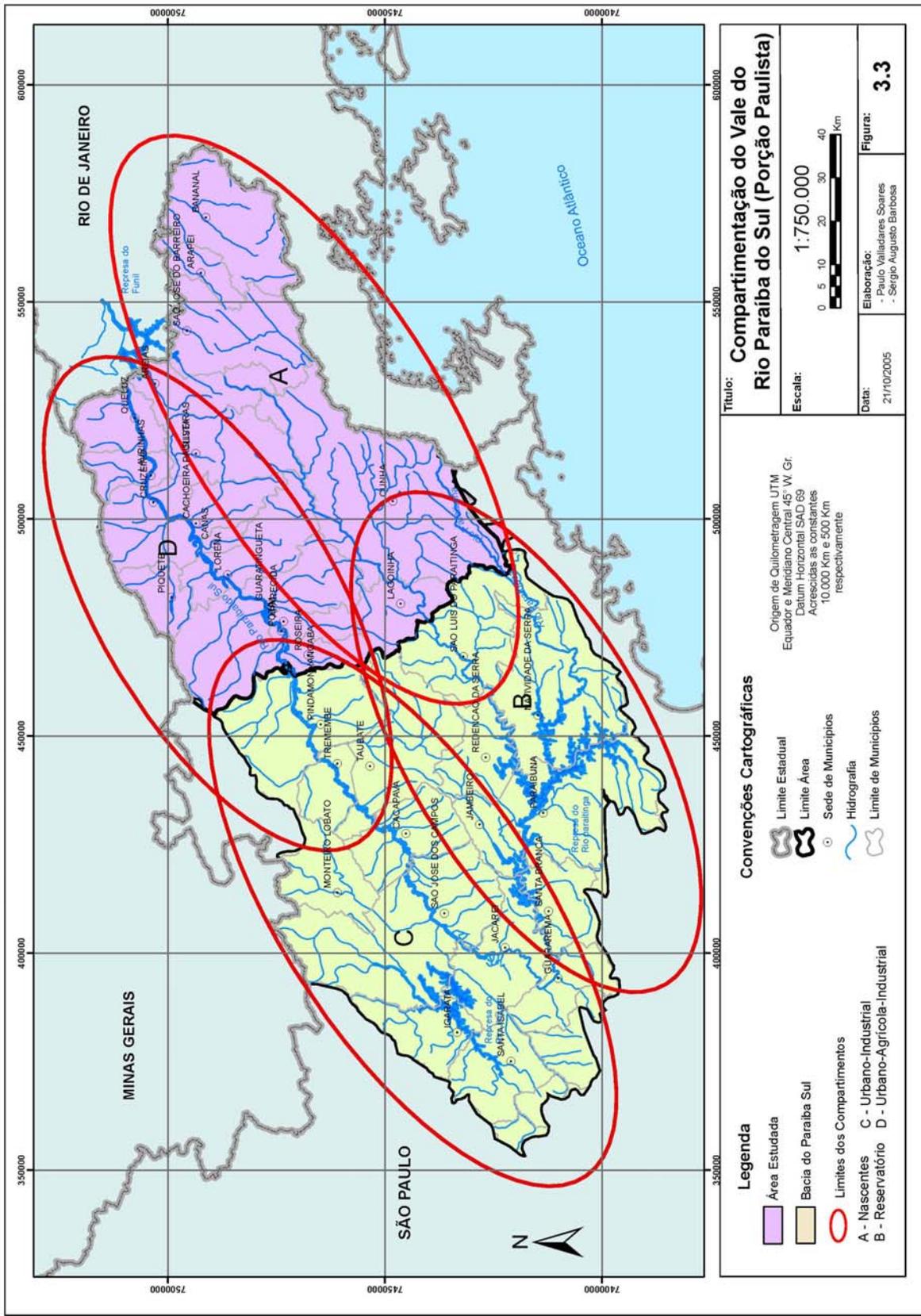
O compartimento nascente corresponde ao primeiro trecho onde estão inseridas as bacias hidrográficas que compõe os formadores do rio Paraíba do Sul (rio Paraibuna e rio Paraitinga). Estas drenagens estão dispostas paralelamente às Serras do Mar e do Quebra Cangalha com significativas alterações ambientais nas bacias dos formadores.

O compartimento reservatório é a região onde deságuam os formadores do rio Paraíba do Sul, constituindo o sistema de represa gerenciado pela CESP. A jusante está o reservatório Santa Branca, gerenciado pela LIGHT. A região caracteriza-se por extensas áreas degradadas de pastagem e intensa fragmentação de remanescentes florestais de mata atlântica.

O compartimento, urbano, industrial e agrícola, constitui o eixo de maior desenvolvimento tecnológico-industrial da região com processos acelerados e desordenados de urbanização, conurbação e altos índices de poluição hídrica; é característica dessa região a grande extensão areal da várzea do rio Paraíba do Sul.

O compartimento, agrícola, urbano e industrial corresponde ao último trecho da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul no Estado de São Paulo e caracteriza-se, também, por pastagens degradadas, intensa fragmentação florestal, início de processos de conurbação e crescente atividade industrial. De uma maneira geral, as indústrias tendem a se localizar junto a vias de conexão regional que lhe garantam rápido escoamento da produção para o mais amplo leque de mercados alternativos. Na bacia do rio Paraíba do Sul não é diferente e a legislação dos municípios reforça esta tendência.

A área de estudo compreende os municípios Cunha e Lagoinha, no “compartimento nascente”; e os municípios de Roseira, Aparecida, Guaratinguetá, Potim, Canas, Lorena, Piquete, Cachoeira Paulista, Queluz, Lavrinhas, Cruzeiro, Silveiras, Areias, São José do Barreiro, Arapeí e Bananal, denominado “compartimento agrícola, urbano e industrial”, com aproximadamente 6.400km² de área total.



A área de estudo está localizada entre as coordenadas UTM: 455004/7489312; 520266/7522484; 586157/7492747; 489122/7421119.

Representam estes dois compartimentos, respectivamente, o conjunto das bacias hidrográficas que compõem a região das nascentes do rio Paraíba do Sul com significativas alterações ambientais em suas áreas; e uma outra de “transposição” das águas da porção paulista para o Estado do Rio de Janeiro caracterizada por extensas áreas historicamente degradadas por atividades agropastoris, processos de conurbação crescente e desordenado desenvolvimento urbano-industrial.

3.1. Meio Físico

Almeida (1964), define duas importantes províncias geomorfológicas no Estado de São Paulo: o Planalto Atlântico e a Província Costeira. O Planalto Atlântico compreende cinco zonas: Planalto do Paraitinga, Planalto da Bocaina, Médio Vale do Paraíba, Serra da Mantiqueira e Planalto de Campos de Jordão. A província Costeira compreende a zona Serras Costeiras.

A região da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, apresenta três principais conjuntos litológicos: terrenos cristalinos ígneo-metamórfico (embasamento das bacias cenozóicas), as rochas sedimentares cenozóicas (Formações Resende, Tremembé, São Paulo e Pindamonhangaba) e os terrenos sedimentares mais recentes, predominantemente aluvionares.

Esta bacia caracteriza-se por apresentar compartimentos litológico-estruturais delimitados por grandes falhamentos transcorrentes, de idade variando do Pré-Cambriano Superior ao Cambro-Ordoviciano, de direção geral NE. Os falhamentos principais são: Jundiuvira, Buquira, Alto da Fartura, Taxaquara e Cubatão (Almeida e Carneiro, 1998).

Estes compartimentos tectônicos possuem características litológicas e estruturais diversas, mas podem ser resumidos da seguinte forma: 1) migmatitos, granitóides, granulitos e dioritos no Compartimento Jundiá; 2) migmatitos, ectinitos e granitóides no Compartimento Monteiro Lobato; 3) migmatitos, ectinitos e granitóides no Compartimento Quebra-Cangalha; 4) migmatitos e granitóides no Compartimento Paranapiacaba; 5) migmatitos, granitos, granulitos e rochas metabásicas localmente seccionados por diques de rochas básicas, de idade Mesozóica (Ponçano *et al.*, 1981).; e 6) Bacia Sedimentar de Taubaté e planícies de sedimentação Quaternária, bordejadas por migmatitos e raros corpos graníticos associados.

Toda esta região pertence ao *Rift* Continental do Sudeste do Brasil, como definido por Riccomini (1989), fazendo parte de um conjunto de bacias tafrogênicas do Sistema de *Rifts* da Serra do Mar, que se desenvolveram a partir do final do período Jurássico (Almeida *et al.*, 1974). O *rift* segue aproximadamente a linha de costa atual, distando em média 70 km e persistindo ao longo de 900 km estendendo-se desde a cidade de Curitiba (PR) até Niterói (RJ). Toda esta estrutura se desenvolveu sobre terrenos policíclicos de idade Pré-Cambriana (>570 M.a.), pertencentes ao Cinturão de Dobramentos Ribeira (Melo *et al.*, 1985).

A sedimentação do *Rift* teve início no fim do Mesozóico e início do Terciário. No Vale do Paraíba foram definidas duas formações geológicas com características litológicas bem definidas: a Formação Resende, na base, e a Formação Pindamonhangaba, no topo.

A classificação aceita e utilizada, relacionada às unidades litoestratigráficas presentes, na bacia do rio Paraíba do Sul, é a proposta por Riccomini (1989) que reconhece cinco sistemas deposicionais:

- Leques aluviais associados à planície fluvial de rios entrelaçados, e estes à Formação Resende;
- Lacustre, representado pela Formação Tremembé;
- Fluvial meandrante das bacias de São Paulo, Resende e porção oeste da Bacia de Taubaté, representado pela Formação São Paulo;
- Fluvial entrelaçado da Formação Itaquaquecetuba; e
- Fluvial meandrante da porção central da Bacia de Taubaté, definido como Formação Pindamonhangaba.

Apenas as Formações Resende, Tremembé, São Paulo e Pindamonhangaba ocorrem na Bacia de Taubaté.

Diversos mapeamentos geológicos, na escala 1:50.000, foram efetuados na década de 80, principalmente por geólogos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), tendo sido mapeadas as Folhas de Jacareí, Tremembé, Taubaté e Pindamonhangaba (Campanha, 1994; Gimenez Filho *et al.*, 1991; Almeida *et al.*, 1991). Estes mapeamentos tiveram como objetivo a definição do contexto geológico regional, das seqüências deposicionais da Bacia de Taubaté, evolução tectono-geológica e definição da datação dos depósitos sedimentares da Bacia de Taubaté.

Na região do Vale do Paraíba ocorre, em linhas gerais, altimetrias que vão desde os 450m, nas margens do rio Paraíba do Sul, a 2400m, nos topos das cristas (pico dos Marins). O leito

meândrico do rio é característica do seu curso médio superior ao atravessar os sedimentos da Bacia de Taubaté; já no seu curso médio inferior o rio possui um padrão mais retilíneo, cortando a área do embasamento entre os alinhamentos serranos.

O rio Paraíba do Sul corre pelo fundo de uma depressão tectônica situada ao longo da base da Mantiqueira, com a qual está geomorfologicamente relacionado. A origem do vale prende-se aos episódios tectônicos que originaram as serras do Mar e da Mantiqueira.

Em conjunto, a serra da Mantiqueira forma o segundo degrau do planalto brasileiro. Caracteriza-se por uma expressiva escarpa voltada para o Vale do Paraíba, cujos desníveis excedem a 2000m. Seu trecho mais contínuo e expressivo é aquele que forma a escarpa situada ao longo do médio Paraíba.

Esta região foi alçada à altitude atual por movimentos epirogenéticos que deram origem a um sistema de falhas na direção ENE-WSW. Os rios locais adaptaram-se à direção geral das falhas e fraturas, erodindo as rochas menos resistentes e atravessando os leitos rochosos mais compactos por gargantas apertadas.

Na região de Campos do Jordão a Mantiqueira apresenta traços peculiares, trata-se de um largo bloco de grandes ondulações maciças, situadas entre 1700 e 2000m constituindo o corpo principal da Mantiqueira, ligeiramente basculado para o norte e nordeste e festonado pelas cabeceiras dos pequenos cursos d'água pertencentes à drenagem dos rios Buquira, Jaguari e Sapucaí-Mirim, adaptados à direção geral dos gnaisses regionais. São vales maduros, dominados por elevações de encostas suaves e vegetação de campos de altitude.

A Serra do Mar tem origem nos arqueamentos que afetaram o escudo brasileiro no pós-cretáceo. O trabalho de erosão diferencial nas rochas do complexo cristalino, aliado aos falhamentos e fraturamentos transversais, contribui para explicitar as diversidades topográficas dos vários blocos que compõem a Serra do Mar.

A diversidade dos solos encontrados no Vale do Paraíba, reflete a complexidade do contexto geológico e geomorfológico. Estes solos provenientes de processos de intemperismo, transporte e deposição, podem ser divididos em três domínios: solos oriundos das rochas pré-Cambrianas, solos oriundos das rochas sedimentares (Terciário) e os solos situados nas planícies aluvionais, das áreas de várzea do rio Paraíba.

O intenso desgaste da cobertura pedológica do Vale do Paraíba, devido a derrubada da mata primitiva e o cultivo intenso e extensivo do café, cana, pastagem provocou a eliminação

da fertilidade na região em curto espaço de tempo. Especialmente nas áreas de declividade acentuada, a erosão foi muito alta, tendo como consequência o empobrecimento do solo e início da atividade agropastoril, em cujo domínio da vegetação de pastagem os processos erosivos se acentuaram.

Em escala regional os solos que ocorrem na região são os latossolos, os argissolos, os cambissolos e os gleissolos melânicos (Oliveira *et al.*, 1999).

Os latossolos apresentam melhor capacidade para uso; esses solos são mais utilizados para pastagem de gado leiteiro, predominando a brachiara, e subordinadamente o capim gordura. Os argissolos são ácidos e encontram-se esgotados, necessitando de correção e adubação; as principais culturas são cana, café e milho além de pastagens e reflorestamentos. Os cambissolos têm grande limitação para o desenvolvimento da agricultura, principalmente devido ao declive do relevo montanhoso, bem como a pouca profundidade dos perfis. Por fim, os gleissolos melânicos (solos de várzeas) que possuem grande valor para agricultura, principalmente rizicultura.

Em relação as águas subterrâneas existem dois sistemas de aquíferos: um composto de sedimentos cenozóicos e quaternários e o outro cristalino. A diversidade dos aquíferos indica a importância de se avaliar a capacidade de armazenamento e transferência na dinâmica dos recursos hídricos na região.

Uma primeira avaliação dos recursos hídricos — superficiais e subterrâneos — da bacia do rio Paraíba do Sul foi realizado por Frangipani e Pannuti (1965), no trabalho intitulado: “Estudos hidrogeológicos da Bacia de Taubaté, entre Jacareí e Quiririm”. Estes autores levantaram dados hidrometeorológicos medidos desde o início do século XX. Além disso, construíram poços de observação e instalaram piezômetros para medições de níveis, onde realizaram uma série de medidas de nível d’água e testes de vazão entre 1962 e 1964, visando a caracterização do aquífero sedimentar entre Jacareí e Quiririm. Este trabalho pioneiro realizou um primeiro levantamento das características hidrogeológicas e do comportamento hidrodinâmico do aquífero sedimentar da Bacia de Taubaté.

O sistema aquífero sedimentar do Vale do Paraíba do Sul é formado pelas rochas do Grupo Taubaté (Formação Resende e Tremembé, IPT, 1981) e da Formação Pindamonhangaba (Riccomini, 1989) de idade terciária, além de sedimentos quaternários. É o mais intensamente explorado, sendo do tipo livre e semi-confinado, de porosidade primária e bastante heterogêneo. Também recebe a denominação de sistema aquífero Taubaté.

As características hidrogeológicas do aquífero sedimentar do Vale do Paraíba, formado pelo Grupo Taubaté e Formação Pindamonhangaba estão intimamente relacionados aos ambientes fluvial e lacustre, respectivamente. Neste sentido, pode-se distinguir, regionalmente, duas unidades com diferentes comportamentos hidráulicos: a primeira encontra-se na porção sudoeste da região e inclui as regiões de Santa Isabel, Jacareí, São José dos Campos e Caçapava, e a região de Lorena e Guaratinguetá na parte nordeste da bacia, estendendo-se até Cruzeiro na margem noroeste da bacia.

Entre as duas áreas existe uma zona bastante extensa que inclui as regiões de Taubaté, Tremembé e Pindamonhangaba, na qual o subsolo está preenchido por sedimentos finos, argilitos e folhelhos, com poucas camadas arenosas. Essa região intermediária forma um aquífero pouco permeável, com vazões da ordem de 20 a 30m³/h quando os poços exploram lentes arenosas interdigitadas no pacote argiloso (DAEE, 1977).

Nas regiões aquíferas, pode-se ver o conteúdo de material arenoso diminuir com a profundidade e após dezenas e até uma centena de metros de material mais arenosos. Poços mostram geralmente uma predominância de material mais fino, e em conseqüência, menos permeável. O aquífero possui um formato alongado na direção ENE-WSW com características heterogêneas devido ao caráter predominantemente lenticular das camadas arenosas e argilosas, ainda que localmente seja contínuo. Em função dos ambientes de sedimentação, o trecho Aparecida-Lorena é mais arenoso, encontrando-se poços com vazão superior a 100m³/h (DAEE, 1977).

Essas diferenças litológicas são causadas por variações do ambiente de deposição. Nesse sentido, a predominância de fácies lacustre é responsável pela ocorrência de preenchimento de material fino, formada por argilito e folhelhos na região de Taubaté e Pindamonhangaba e nas partes mais profundas das regiões com maior disponibilidade do aquífero.

Uma das características marcantes, conseqüente dessas diferenciações litológicas, é a interdigitação entre camadas de diferentes permeabilidades, contendo grande quantidade de cascalhos, de seixos intercalados com leitos de argila, e areias em disposição entrecruzada. Esta composição e estrutura dos sedimentos funcionam como uma bacia de retenção e liberação da água de infiltração, capaz de manter o rio perene durante todo o ano contrabalançando o estreito corredor onde está o rio Paraíba do Sul.

Estudos hidrológicos mais recentes (Hirata, 1994), possibilitaram a definição de um mapa

de vulnerabilidade natural das águas subterrâneas e a avaliação de riscos de contaminação das atividades industriais, da urbanização e deposição de resíduos sólidos. O comportamento observado pelo DAEE (1977), de linhas equipotenciais mais elevadas nas porções mais próximas à serra e diminuindo em direção ao vale do rio Paraíba, foi o mesmo observado por Hirata (1994), onde a principal área de descarga regional é o rio Paraíba, sendo que as denagens secundárias atuam como áreas de descarga local.

Iritani (1998) demonstra a viabilidade da utilização de modelagem matemática tridimensional como metodologia, a ser aplicada para a definição das zonas de contribuição das captações de água subterrânea, no município de Caçapava, principalmente pela possibilidade de considerar as heterogeneidades do meio físico que afetam as direções de fluxo da água subterrânea ou avaliar as mudanças nas zonas de contribuição advindas da variação das taxas de bombeamento. Além de permitir, a identificação de zonas estratégicas na exploração futura de água subterrânea e a adoção do mapeamento de vulnerabilidade para auxiliar no gerenciamento e proteção futura dos aquíferos.

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material

Para a elaboração da base cartográfica presente no banco de dados foram utilizados os seguintes materiais:

a) Mapas Básicos;

- Cartas topográficas do IBGE em escala 1:250.000 (IBGE, 1965);
- Cartas topográficas do IBGE, em escala 1:50.000 (IBGE, 1982).

b) Cartas Temáticas

- Levantamento da Vegetação Natural e Reflorestamento e Constituição de Base Georreferenciada da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul / Mantiqueira - Arquivos Digitais (Instituto Florestal , 2001/ CD);
- Mapa Geológico do Estado de São Paulo em escala 1:250.000, Folha Guaratinguetá (DAEE-UNESP, 1984);
- Governo do Estado de São Paulo. Projeto Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul. Mapa de Isoietas, Mapa Geológico, Mapa Geomorfológico, escala 1:250.000. (Consórcio ICF Kaiser-Logos, 2000);
- Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, escala 1:1.000.000, IPT, 1981 (Ponçano *et al.*, 1981);
- Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000, USP/IPT/Fapesp, 1999. (Ross; Moroz, 1999);
- Mapa Pedológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000, Embrapa/IAC, 1999 (Oliveira *et al.*, 1999).
- Mapeamento de uso do solo da bacia do Ribeirão Guaratinguetá em escala 1:50.000 a partir de imagem Landsat TM e trabalho de campo (SAAEG, 2005).

Para a entrada, organização, manipulação, processamento e saída das informações dos resultados da presente pesquisa, foi utilizada a versão ArcGIS[®], 9.0 da ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc) que conjuga funções de análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais.

A base de dados necessita ser bem documentada e organizada, pois cada tipo de dado tem maneira própria de armazenamento que o identifica e o separa em arquivos de dados espaciais (mapas, figuras em geral). Os produtos gerados pelo SIG, e arquivos de atributos (tabelas) são organizados pelo SGBD (Sistema Gerenciador de Banco de Dados).

As informações relativas aos diferentes elementos da paisagem (rochas e estruturas, elementos do relevo, solos, cobertura vegetal e uso do solo) e a precipitação, foram coletadas através de cartas temáticas nas mais diversas escalas de representação (1:50.000, 1:250.000, 1:500.000).

A escala adotada na elaboração do produto final desse trabalho é 1:250.000 (regional) e 1:50.000 (bacia representativa). A escala dos mapas regionais foi definida em função dos mapas temáticos originais; em função dos objetivos do trabalho, foram gerados a partir das bases cartográfica e temática disponíveis para a bacia representativa, um mapa na escala 1:50.000.

O banco de dados cartográfico deste trabalho contém um conjunto de Planos de Informações (PI), todos georeferenciados, utilizando o mesmo sistema de projeção nas duas escalas de abordagem. A projeção utiliza o sistema UTM, modelo Córrego Alegre, tendo como referência a longitude Oeste 51°00'00".

4.2 Procedimento Metodológico

A estratégia implementada foi estabelecer uma metodologia de abordagem qualitativa para gestão de recursos hídricos a partir da definição de um mapa que integrasse os atributos da paisagem sob a ótica da capacidade de infiltração, em escala regional (1:250.000) e de bacia representativa (1:50.000).

Nesta tese são apresentados e discutidos os conceitos de ciclo hidrológico, monitoramento de bacias hidrográficas, capacidade de infiltração, ecologia da paisagem e a utilização do Sistema de Informações Geo-Referenciadas - SIG. Apresentam-se considerações sobre o tema central do trabalho: a importância de elementos do meio físico natural e modificado na definição de áreas potenciais de infiltração em bacias hidrográficas.

O procedimento metodológico utilizado fundamenta-se no pressuposto de que é possível a identificação e a avaliação da capacidade de infiltração em bacias hidrográficas a partir da integração entre os elementos da paisagem. Com o objetivo de definir os diferentes níveis de

infiltração na área de estudo, foram utilizados materiais bibliográficos e cartográficas pré-existent para análises dos atributos do meio biótico e abiótico (litologia, geomorfologia, pedologia, densidade de drenagem, pluviometria, uso e ocupação do solo), que foram posteriormente cruzados e associados na composição e estruturação das unidades homólogas.

Esta tese apresenta uma proposta de definição e avaliação qualitativa de potencialidades e fragilidades do processo de infiltração em bacias hidrográficas. A pesquisa foi dividida em etapas distintas, no entanto, complementares, conforme descrito a seguir e apresentado na Figura 4.1:

- A primeira etapa da pesquisa corresponde ao *nível compilatório*, em que foi determinada a área de estudo regional e de bacia representativa a ser pesquisada. Em seguida, procedeu-se a uma seleção prévia de conceitos, dados e informações técnicas que foram adequadas e proporcionou o respaldo técnico ao objeto de pesquisa. Foram realizados levantamentos bibliográficos e cartográficos onde foi possível caracterizar a área e fazer a digitalização da base cartográfica regional e da bacia representativa. Corresponde a etapa de concepção, levantamentos e estudos básicos;
- No nível *correlativo*, fase da correlação de dados para posterior interpretação, procurou-se compreender as relações entre a fundamentação teórica da capacidade de infiltração e seu comportamento em cada “tema” que representa as diferentes formas de expressão dos elementos da paisagem na bacia hidrográfica, através de pesos (ponderação) que traduzem a maior ou menor atividade de infiltração da água. É a etapa onde as atividades de fundamentação teórica, hierarquização, correlações e atribuições são de extrema importância na representação conceitual do processo de infiltração na bacia. Operação fundamental em que correlações errôneas levam a resultados distorcidos. Corresponde a etapa de elaboração das cartas temáticas;
- No nível *semântico*, última etapa, é a fase interpretativa, na qual se chegou a resultados conclusivos a partir dos dados selecionados e correlacionados nas etapas anteriores. Reflete a seleção, correlação e ponderação adequada nas etapas anteriores. Corresponde a etapa de estudos integrados – síntese;

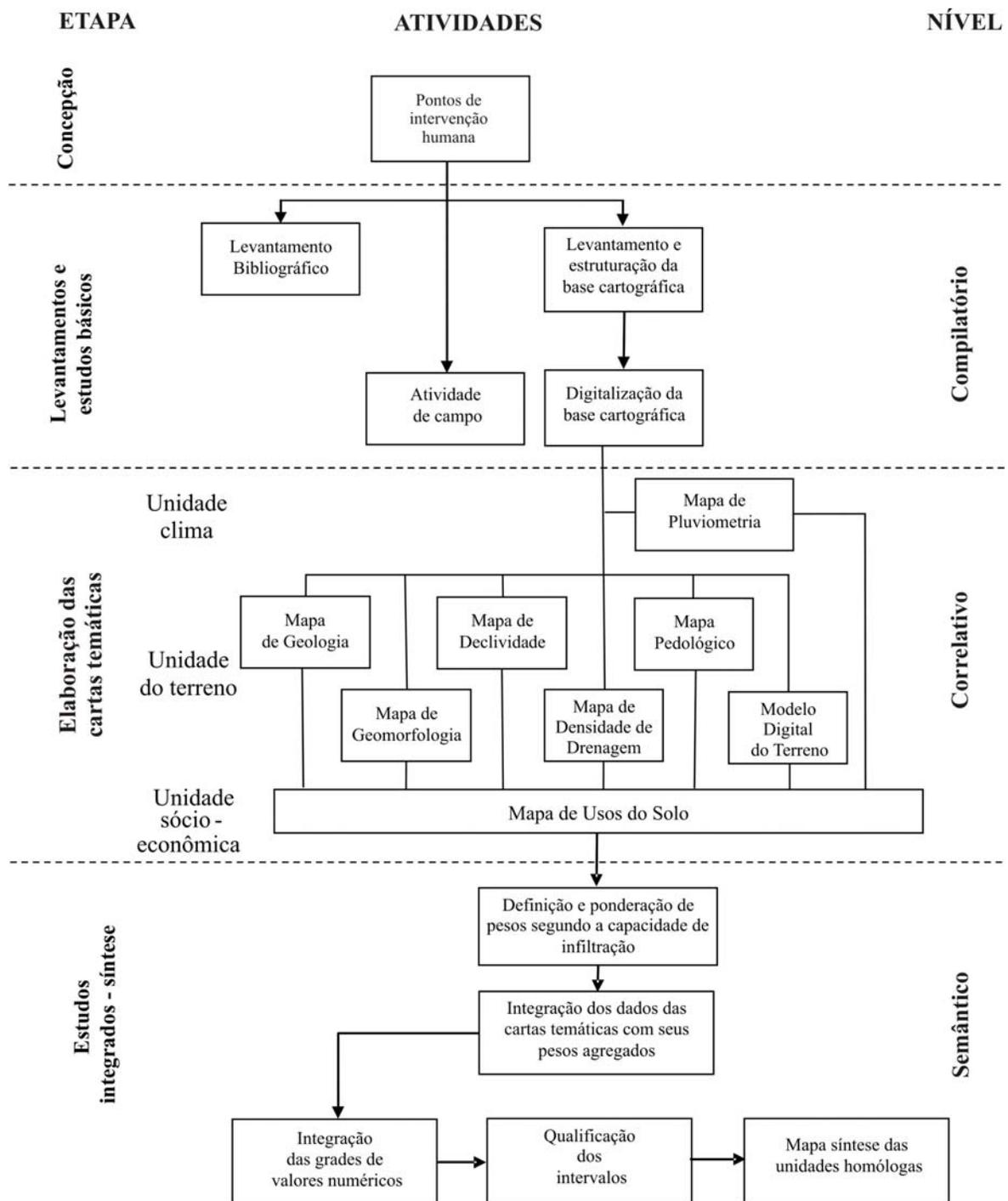


Figura 4.1 - Fluxograma Metodológico

Inicialmente, procedeu-se ao levantamento e estruturação da base cartográfica (cartas topográficas e mapas temáticos) que subsidiaram a elaboração e a composição do banco de dados georreferencial da área de estudo. O levantamento do material analógico, teve como finalidade avaliar e definir a escala de análise, em função das variações escalares encontradas nos diferentes produtos cartográficos adquiridos e orientar na indicação da escala do mapa de áreas homólogas.

A digitalização da base cartográfica compreendeu as informações planimétricas (drenagem, estradas e limites), altimétricas (curva de nível e pontos cotados) e elementos do meio físico.

Os produtos cartográficos básicos gerados foram: mapa geológico, mapa geomorfológico, mapa pedológico, mapa hipsométrico, mapa de declividade, mapa topográfico e rede de drenagem. Estes produtos integram um banco de dados de parâmetros do meio físico que procura dar funcionalidade as consultas e as integrações dos elementos que compõem a paisagem da área estudada.

Devido a grande quantidade de programas de geoprocessamento presentes no mercado é possível encontrar os dados digitais em diversos formatos ou extensões (Ex. *Shapefile*, *Dxf* e *ASCII*). Contudo, ressalta-se a versatilidade do programa ArcGis[®] convertendo-os para um formato interno, o “SPR”, o que permitiu o armazenamento das informações em um banco de dados georeferenciado de forma metodológica e seguindo os critérios recomendados pelo programa em questão.

A verificação dos dados interpretados e extraídos das informações temáticas foi objeto das atividades de campo, realizadas no segundo semestre de 2004 na bacia do ribeirão de Guaratingutá.

A maior parte dos mapas temáticos foram obtidos a partir do projeto CEIVAP (2000), em formato AutoCad, e posteriormente foram compatibilizados e ajustados em ambiente ArcGIS[®]. O mapa Uso do Solo da bacia do Ribeirão Guaratinguetá foi obtido a partir de um levantamento realizado pela GeoAmbiente para o Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Guaratinguetá - SAAEG, em 2005.

Os níveis de agregação dos dados na “pirâmide de informações” (item 2.6.2) possibilitam uma ampla visão e uma hierarquização no equacionamento do problema e ajuda a compreender a importância de se estabelecer indicadores a partir de uma determinada base preliminar de dados.

As inter-relações entre indicadores de sustentabilidade e recursos hídricos foram discutidas tendo como elemento de referência fundamental a atividade de infiltração, que é responsável pela manutenção do solo como reservatório dinâmico de produção e transferência de água.

A definição e ponderação de pesos, variando de um a cinco, segundo a capacidade de infiltração, foram aplicados nos diferentes elementos que compõem a paisagem — geologia, pedologia, geomorfologia, declividade, pluviosidade e uso e ocupação do solo —, no intuito de refletir a complexidade dos processos hidrológicos de infiltração nas diferentes combinações desses elementos na bacia hidrográfica.

Buscou-se adequar índices qualitativos e pesos relativos às características intrínsecas dos diferentes elementos da paisagem à luz dos processos de infiltração. Desta forma, foram associadas a estas informações, classes qualitativas e pesos relativos que representem o grau e a influência da variável no processo e no contexto proposto de disponibilidade de recursos hídricos.

O procedimento para geração das áreas homólogas foi aplicar os pesos de infiltração nos temas. Em seguida foi realizado o cruzamento espacial de todos os temas, utilizando a função UNION do software ArcGIS® Arcview9®.

O “shapefile” final contém todos os cruzamentos espaciais gerados. Neste “shapefile” foi calculada a média dos valores obtidos em todos os polígonos gerados, somando-se para cada polígono os pesos de infiltração dos temas e dividido pelo o número de temas cruzados, gerando áreas contendo os mesmos valores médios de infiltração. Idêntico procedimento foi executado para a escala de bacia representativa.

Em resumo, na definição de áreas homólogas a disponibilidade dos recursos hídricos nas escalas 1:250.000 / 1:50.000. Fica estabelecido um procedimento metodológico:

a) Nível compilatório:

- Identificação de fator de análise;
- identificação e hierarquização de todos os elementos do meio físico que compõem o fator de análise;

b) Nível correlativo

- embasamento técnico-científico que dará suporte as correlações, hierarquizações e seleção de todo ou parte dos elementos do meio físico;
- identificação e correlação dos atributos da paisagem (fase regional);

c) Nível de síntese

- definição de áreas homólogas (regional e bacia representativa);
- indicadores ambientais ao planejamento e gestão de recursos hídricos.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Estruturação Conceitual

A partir da compartimentação utilizada na definição da área de estudo (Figura 3.1), e considerando as interações entre os diferentes elementos do meio físico que compõem a paisagem (geologia, geomorfologia, declividade, densidade de drenagem, pedologia e uso do solo) e a precipitação que variam no tempo e no espaço, procurou-se avaliar em escala regional as possíveis áreas com maior capacidade de infiltração e suas interrelações com a dinâmica regional.

Ao analisar os mapas de elementos do meio físico da área estudada, pode-se constatar a grande variabilidade de índices pluviométricos, interagindo com distintas formas de uso e ocupação de solo – de florestas a áreas urbanizadas; que por sua vez estruturaram suas atividades sobre tipos de solo associados aos relevos diferenciados, suportados por um embasamento geológico muito a medianamente fraturado.

Para que estas diferentes formas e expressões possam ser respeitadas e integradas atribuiu-se pesos que variam de um (1) a cinco (5), onde são analisados os comportamentos individuais de cada elemento do meio físico aos processos de infiltração. Apresenta-se a distribuição espacial e percentual dos atributos de cada elemento do meio físico na área estudada.

Para executar a integração dos elementos do meio físico com seus pesos utilizou-se o software ArcGIS® ArcView9, a função utilizada foi a UNION. O procedimento para a geração das áreas homólogas foi aplicar os pesos de infiltração nos temas, segundo as definições preestabelecidas.

O Shapefile final gerado contém todos os cruzamentos espaciais realizados. Neste Shapefile foi calculada a média dos valores obtidos em todos os polígonos gerados, somando-se para cada polígono, os pesos de infiltração dos temas e dividido pelo número de temas cruzados. Depois, aplicou-se um *dissolve* de polígonos, gerando-se as áreas contendo os mesmos valores médios de infiltração. Estabeleceu-se em seguida, os intervalos entre os valores mínimos e máximos presentes na região de estudo.

Desta forma, foi possível definir áreas homólogas em função da capacidade de infiltração, tornando possível a espacialização e visualização em um mapa temático. A definição de uma

região homóloga, está relacionada com um determinado tipo de comportamento do sistema hídrico, neste caso a capacidade de infiltração.

5.2 Elementos do Meio Físico

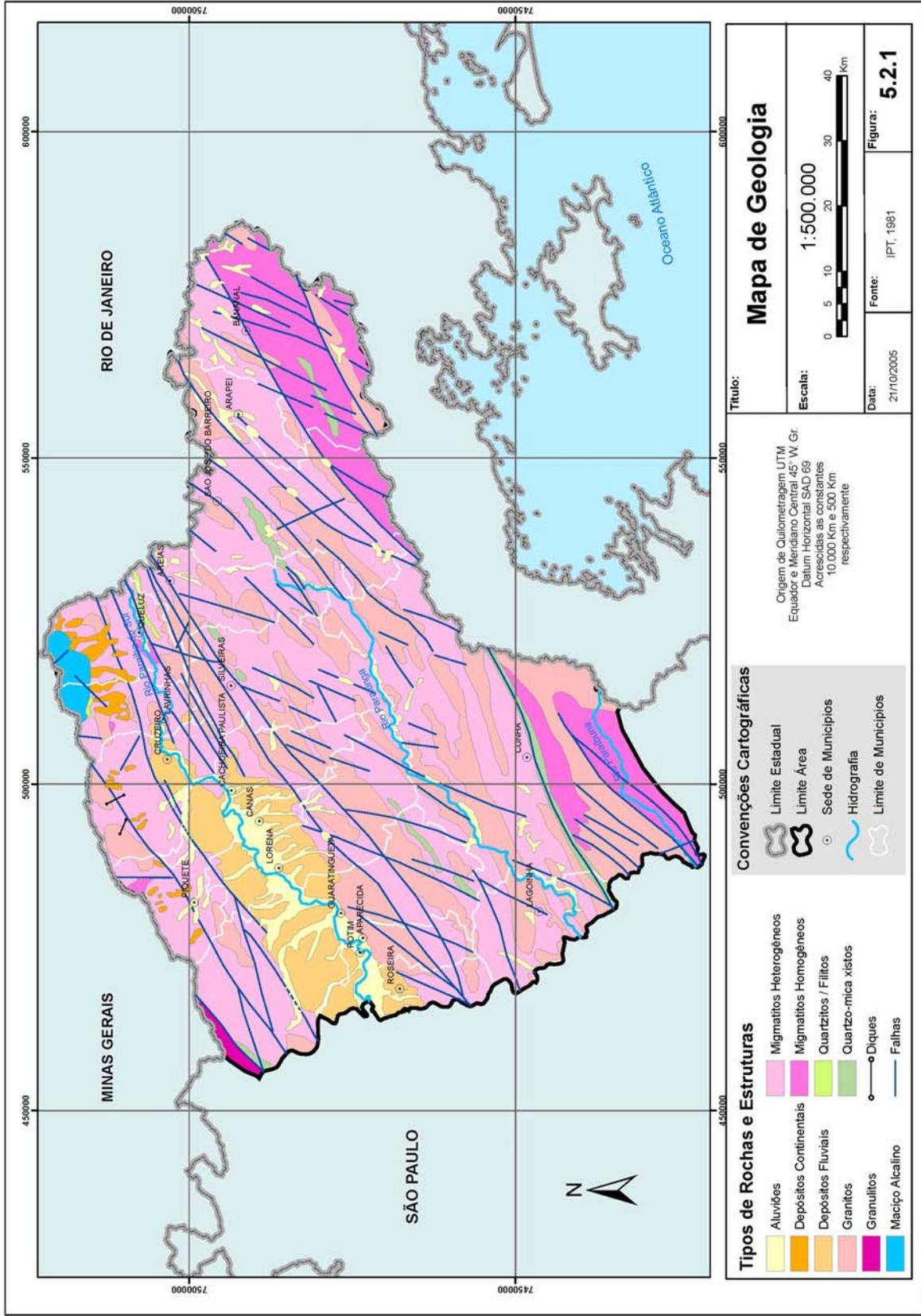
Os mapas temáticos utilizados, referem-se aos elementos do meio físico que são considerados fundamentais para a avaliação da capacidade de infiltração em cada unidade de terreno da área de estudo.

5.2.1 Geologia

Utilizou-se nesta fase o Mapa Geológico em escala regional 1:250.000, produzido pelo IPT (1981), que é mostrado na Figura 5.2.1 O mapa evidencia a significativa diversidade de litotipos presentes na região assim como os principais elementos estruturais (fraturamento) presentes nesta escala de abordagem.

Na área de estudo destacam-se duas grandes unidades geológicas: o embasamento cristalino representado pelos granulitos, maciços alcalinos, granitos, migmatitos homogêneos, quartzitos, filitos, quartzo-mica-xistos (metasedimentos), migmatitos heterogêneos; e a Bacia de Taubaté, totalmente inserida no complexo cristalino pré-cambriano do leste paulista, e compostos regionalmente pelos depósitos continentais fluviais e aluviões.

De forma geral as rochas que compõe o embasamento cristalino são impermeáveis, apresentando elevado conteúdo argiloso. No entanto, a sobreposição de eventos tectônicos nos maciços cristalinos estruturou um sistema de falhas, fraturas e fissuras, normalmente, permeáveis. Como ressalta DAEE (1979), as zonas fraturadas formam praticamente uma rede de canais para as águas infiltrantes provenientes das chuvas; formando um conjunto de reservatórios naturais, que regula a vazão nas cabeceiras dos rios. As falhas alimentam os aquíferos sedimentares da Bacia de Taubaté. Espacialmente as rochas que compõem o embasamento cristalino representam 86,01% da área de estudo.



A Bacia de Taubaté é composta pelas Formações Resende, Tremembé, São Paulo e Pindamonhangaba, da base para o topo. A Formação Resende ocorre predominantemente nas bordas norte e sul da bacia e é constituída por diamictitos e conglomerados com seixos, matacões e blocos com matriz lamítica, e em outra, ocorre fácies arenoso com interdigitações de arenitos.

A Formação Tremembé, representa o sistema lacustre, e ocorre principalmente na porção central da Bacia de Taubaté. Esta formação é constituída por argilas verdes, maciças, de espessura métrica, com intercalações ou associações de calcários dolomíticos e ritmitos formados por folhelhos, arenitos grosseiros, conglomeráticos com espessura decimétrica a métrica (Riccomini, 1989).

Na porção NW e central da Bacia de Taubaté, ocorrem a Formação São Paulo, constituída por arenitos de granulação média a grossa e arenitos grosseiros, conglomeráticos, com grandecrescência ascendente, chegando a siltitos e argilitos.

O sistema fluvial meandrante da porção central da Bacia de Taubaté, é denominado de Formação Pindamonhangaba, é composto por conglomerados de matriz arenosa média a grossa, com expressão espacial ao longo da várzea do Paraíba, na região de Jacareí a Pindamonhangaba. São observados afloramentos compostos por argilitos e siltitos, associados a arenitos finos e lamitos.

Os sedimentos quaternários recentes, depositados principalmente ao longo do vale do rio Paraíba do Sul, são formados por depósitos coluviais e de tálus, argilo-arenosos ou conglomeráticos e por depósitos aluviais arenosos. Os depósitos quaternários e as rochas sedimentares representam 13,99% da área de estudo.

Com base neste mapa foram produzidos qualificadores e pesos relativos atribuídos para cada unidade geológica segundo a capacidade de infiltração relativa as características litológicas e ao grau de fraturamento associado. A Tabela 5.1 apresenta a escala de pesos definida.

Tabela 5.1 – Geologia, peso de infiltração e área

<i>UNIDADE</i>	<i>DESCRIÇÃO</i>	<i>PESO INFILTRAÇÃO</i>	<i>ÁREA (km²)</i>	<i>ÁREA %</i>
Migmatitos Homogêneos	Situam-se nas regiões de relevo intermediário da Serra do Mar. Seu manto de alteração é predominantemente constituído de segmento arenoargilosos. A intensidade de fraturamento nesta unidade é alta.	3	680,14	10,61
Maciço Alcalino	Tem pequena extensão areal. Seu manto de alteração é composto de argilominerais em quantidade maior ou igual a 50%. Grau de fraturamento relativo médio.	2	59,34	0,93
Granitos	É o substrato geológico da serra do Quebra Cangalha, tendo alguns corpos de dimensões significativas no limite da bacia sedimentar, o pré-cambriano e o alto da Serra da Mantiqueira. A composição de seu manto de alteração é predominantemente composto de sedimento areno siltosos (saibro). Grau de fraturamento alto.	4	24,81	0,39
Migmatitos Heterogêneos	Se concentram em regiões de cabeceira, tanto do sistema Serra do Mar quanto do Mantiqueira. Migmatitos heterogêneos estromáticos de paleossoma xistoso, gnáissico ou anfibólico	2	2.910,04	45,45
Quartzitos / Filitos	Se concentram em regiões de cabeceira, tanto do sistema Serra do Mar quanto do Mantiqueira. Seu manto de alteração é composto de sedimentos argiloarenosos, grau de faturamento médio a alto.	3	10,67	0,17
Quartzo-mica xistos	Xistos com composição diversas, com intercalações de filitos, quartzitos, calcossilicáticas e metassiltitos	3	108,39	1,69
Granulitos	Corpos autóctones orientados, de contatos concordantes a transicionais, predominantemente de composição tonalítica a granítica, fácies migmatítica.	2	1.714,04	26,77
Depósitos Quaternários (Aluviões)	Aluviões em geral, incluindo areias inconsolidadas de granulação variável, argilas e cascalheiras fluviais	1	426,66	6,66
Rochas Sedimentares (Depósitos Continentais e Fluviais)	Depósitos fluviais incluindo arenitos com lentes subordinadas de folhelhos, arcósios e conglomerados restritos	5	469,11	7,33
TOTAL			6.403,20	100,00

5.2.2 Geomorfologia

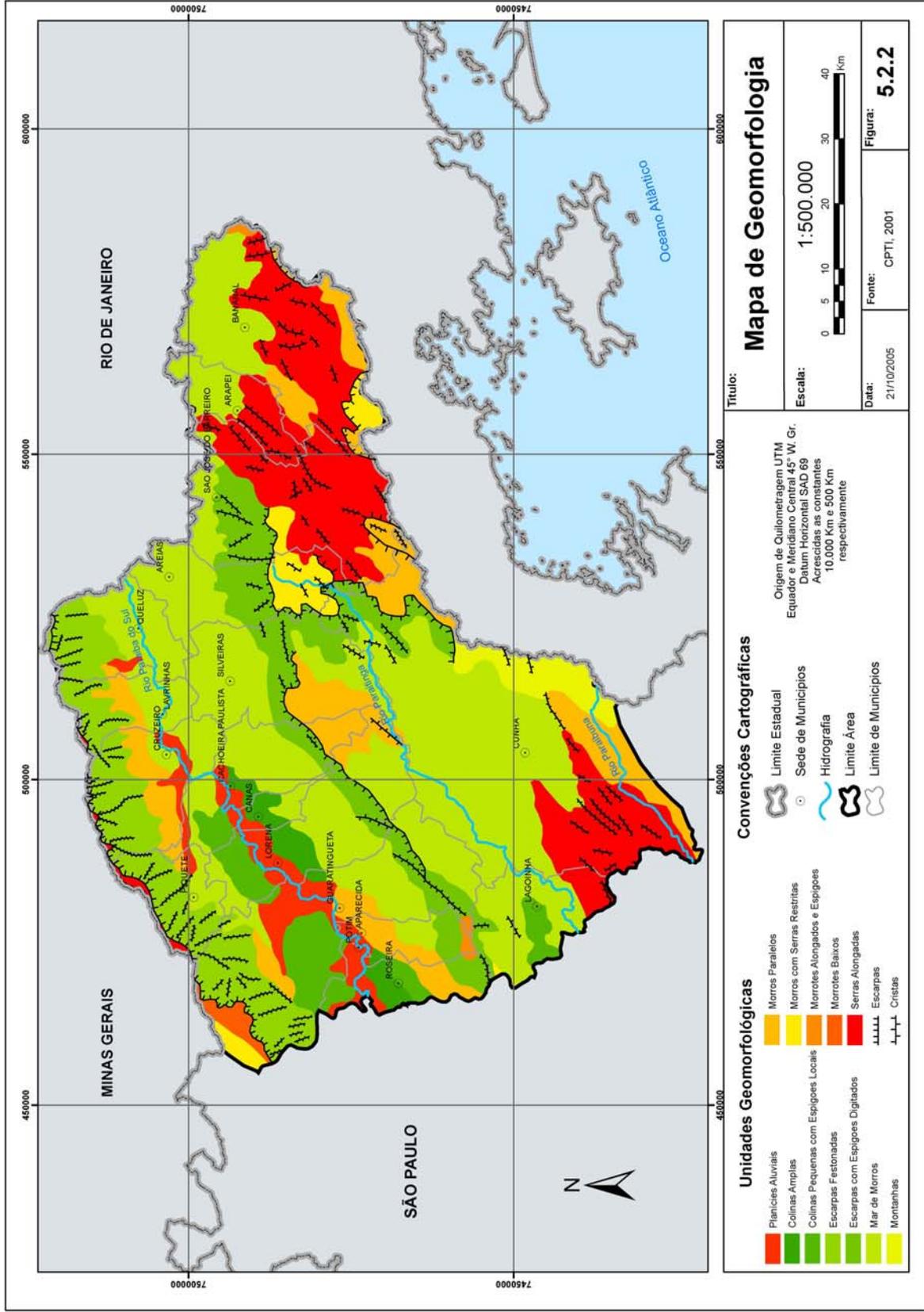
A análise dos elementos do relevo foi realizada tomando-se como base o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo nas escalas 1:1.000.000 (Ponçano *et al.*, 1981) e 1:500.000 (Ross e Moroz, 1997) e (CPTI, 2001). Apesar de serem representações geomorfológicas de pequena escala, estes levantamentos geomorfológicos conseguem expressar bem a diversidade de relevo existente na região. No total foram identificados doze unidades geomorfológicas variando de planícies aluvionares com baixíssima declividade até relevos de serras com declividades superiores a 100% (Figura 5.2.2).

A região de estudo está inserida na Província Geomorfológica do Planalto Atlântico, caracterizando-se pelas zonas do Planalto Paraitinga, Planalto Bocaina, Médio Vale do Paraíba e parte da Serra da Mantiqueira, conforme Ross e Moroz (1997).

Em linhas gerais o Planalto Atlântico caracteriza-se como uma região situada na porção leste/sudeste do Estado de São Paulo, constituída por terras altas, por formas de topos convexos, elevada densidade de canais de drenagem e vales profundos (Ross e Moroz, 1997). Em grande parte o relevo resulta diretamente da erosão fluvial exercida sobre um complexo muito heterogêneo de rochas ígneas e metamórficas. As variações estruturais e diversidades resultantes da evolução histórica do Planalto Atlântico ocasionaram o aparecimento de inúmeras feições geomórficas (planaltos bem compartimentados) e grandes estruturas tectônicas, como o *Riff* por onde corre o rio Paraíba do Sul.

Localizado na porção sudeste da área de estudo, o Planalto Paraitinga, incorpora áreas serranas e áreas de morros, constituindo forma de relevo com alto grau de dissecação e modelado muitas vezes alongado, principalmente na região serrana, de maior resistência aos processos erosivos pela presença de granitóides, que exercem o papel de divisor de águas das bacias hidrográficas dos rios Paraitinga e Paraibuna, diferenciando, com isto, o modelado das bacias.

Na bacia do rio Paraitinga o sistema de mar de morros de formas mais suavizadas e arredondadas, demonstram não guardar herança estrutural marcante e possui menor energia do relevo; já a morraria na bacia do rio Paraibuna é definida por um forte controle estrutural, evidenciado pela rede de drenagem encaixada, possui relevo mais energético; a estrutura tectônica condiciona a rede de drenagem, adaptada aos sistemas de falhas e fraturas existentes.



Embora com diferenças no controle estrutural e no grau de dissecação, os rios estão com suas cabeceiras em altitudes superiores a 1.600m e apresentam orientação NE-SW (Ross e Moroz, 1997).

No extremo leste da área de estudo, encontram-se o Planalto da Bocaina que é um planalto cristalino dissecado. Basicamente, constituído de morros altos e cristas com topos angulosos e/ou topos convexos, explicitando em suas atuais formas os esforços estruturais a que foi submetido, exemplificado pelas cristas simétricas, linhas de cumeadas, e escarpas de falhas. Além disso, entre as serrarias do planalto poderão ser diferenciados compartimentos descritos por Ross e Moroz (1977) como planaltos isolados, resultantes de antigas superfícies de erosão e atualmente dissecadas em mar de morros paralelos.

No médio Vale do Paraíba são identificados morros cristalinos e as colinas sedimentares, em uma região geomorfológica que se estende de sudoeste a leste. O primeiro engloba os arredores da Bacia de Taubaté e parte da porção ocidental da Serra da Mantiqueira, dispondo-se em relevos de morros paralelos. Já o segundo, coincide com as formas existentes na Bacia de Taubaté, com relevo de colinas, tabuleiros e planícies aluviais. A drenagem apresenta de modo geral padrão dendrítico, adaptado às direções das estruturas geológicas da área (Ross e Moroz, op.cit).

Na porção leste/nordeste, encontra-se a Serra da Mantiqueira, que é essencialmente composta por escarpa festonadas, escarpas com espigões, morros paralelos e serras alongadas, relevo de morros e vales profundos. Correspondem a topos angulosos, e vertentes voltadas para o rio Paraíba do Sul, com declividades altas e variando em função das escarpas.

Em face de suas características morfométricas, as unidades geomorfológicas foram reagrupadas em cinco classes de infiltração (Tabela 5.2). As unidades Morrotes Alongados e Espigões, Serras Alongadas e Montanhas foram consideradas como o mesmo peso de infiltração devido as suas características morfométricas serem semelhantes. O mesmo ocorreu com o conjunto formado por Mar de Morros, Morrotes Paralelos, Morros com Serras restritas e Morrotes Baixos.

Tabela 5.2 - Geomorfologia, peso de infiltração e área

UNIDADE	DESCRIÇÃO	PESO DE INFILTRAÇÃO	ÁREA (km ²)	ÁREA %
Planícies Aluviais	Terrenos baixos e planos nas margens dos rios, sujeitos a inundações.	1	244,92	3,82
Colinas Amplas	Topos extensos e aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexos. Drenagem de baixa densidade, vales abertos. Planícies aluviais interiores restritas.	5	110,40	1,72
Colinas Pequenas com Espigões Locais	Topos aplainados a arredondados, vertentes ravinadas com perfis convexos a retilíneos. Drenagem de média a baixa densidade, vales fechados.	5	254,35	3,97
Morrotes Baixos	Relevo ondulado, com amplitudes locais inferiores a 50 metros. Topos arredondados, vertentes com perfis convexos a retilíneos. Drenagem de alta densidade, vales fechados a abertos.	4	36,13	0,56
Morrotes Alongados e Espigões	Topos angulosos e achatados, vertentes ravinadas com perfis retilíneos. Drenagem de média a alta densidade, vales fechados.	3	20,42	0,32
Mar de Morros	Topos arredondados, vertentes com perfis convexos a retilíneos. Drenagem de alta densidade, vales abertos a fechados. Em geral, formas em "meia laranja".	4	2.523,90	39,42
Morros Paralelos	Topos arredondados, vertentes com perfis retilíneos a convexos. Drenagem de alta densidade, vales fechados a abertos.	4	711,38	11,12
Morros com Serras Restritas	Topos arredondados, vertentes com perfis retilíneos, por vezes abruptas, presença de serras restritas. Drenagem de alta densidade, vales fechados.	4	153,24	2,39
Serras Alongadas	Topos angulosos, vertentes ravinadas com perfis retilíneos, por vezes abruptos. Drenagem de alta densidade, vales fechados.	3	1.018,53	15,91
Montanhas	Topos angulosos, vertentes ravinadas com perfis côncavos-convexos. Drenagem de média a alta densidade, padrão dendrítico, vales fechados.	3	133,37	2,08
Escarpas Festonadas	Topos angulosos, vertentes com perfis retilíneos. Drenagem de alta densidade, vales fechados.	2	609,64	9,52
Escarpas com Espigões Digitados	Topos angulosos e vertentes com perfis retilíneos. Drenagem de alta densidade, vales fechados.	2	586,92	9,17
TOTAL			6.403,20	100,00

5.2.3 Declividade

A carta de declividade, representa o melhor instrumento para demonstrar a declividade das vertentes e pode ser expressa de duas maneiras: valores percentuais ou angulares. Neste caso, foram apresentados valores percentuais em faixas, que corresponde a diferença de nível entre os pontos altimétricos considerados na carta topográfica e seu afastamento horizontal. Desta forma, em ambiente ArcGIS[®], construiu-se o mapa (Figura 5.2.3) que permitiu a separação gráfica das diversas classes de declividade.

Quanto menor a distância entre as curvas de nível, maior a declividade e vice-versa. Então para melhor representar a inclinação do terreno, definiu-se o uso de cores claras para as menores declividades e cores escuras para as maiores.

Em seguida, construiu-se a Tabela 5.3 onde foram utilizados no estabelecimento das classes de declividade os limites legais e técnicos para cada faixa.

Para as faixas de declividade de 0 a 3% são considerados principalmente critérios geomorfológicos como a definição de planícies inundacionais (ou aluvionares) e a caracterização de topos de morro. Para a faixa de 3 a 12%, o limite superior é baseado em um critério técnico (mecanização agrícola) segundo De Biasi (1992). Para a faixa de 12 a 30%, o limite superior são as restrições impostas pela legislação federal (Lei Lehman, 6766/79) para o parcelamento do solo urbano. Para a faixa de 30 a 50%, o limite superior é a recomendação da CDHU de não construir casas populares em terrenos com declividades médias ou porções significativas maiores de 50%. Para a faixa de 50 a 100%, se estabelece o limite máximo para as atividades de silvicultura. Acima de 100%, a área deve ser considerada como de Preservação Permanente, segundo o Código Florestal, Lei n.º 4.771 de 15/09/65.

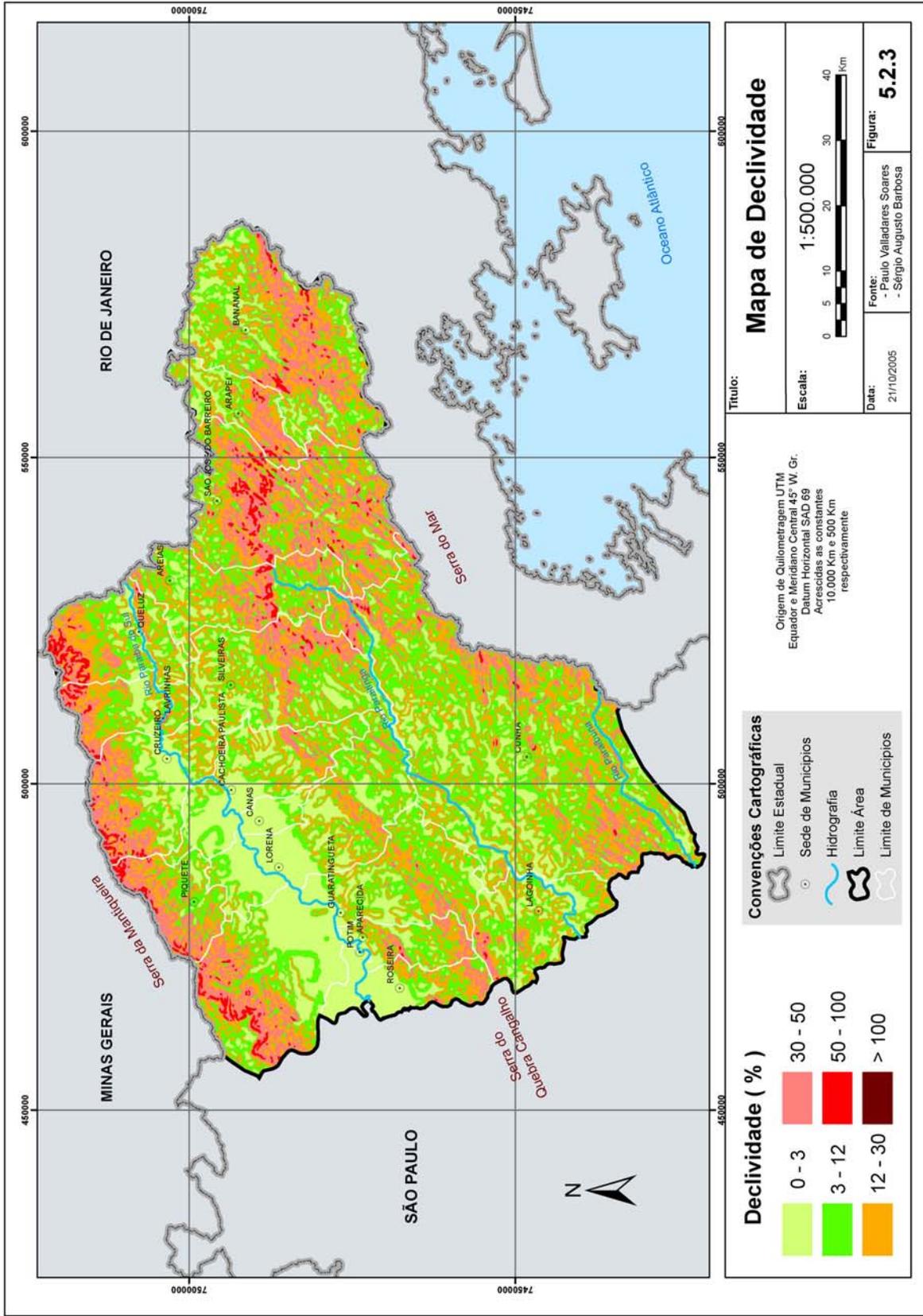


Tabela 5.3. – Declividade, peso de infiltração e área

INTERVALO DECLIVIDADE	DESCRIÇÃO	PESO INFILTRAÇÃO	ÁREA (Km²)	ÁREA %
0 – 3	Planícies Aluvionares	1	531,12	8,29
0 – 3	Topos de Morros	5	764,04	11,93
3 – 12	Limites de Mecanização Agrícola (ref. De Biasi)	5	1.932,84	30,18
12 – 30	Limite Máximo Área Urbana (Lei LEHMAN - 6.766/79)	4	2.339,99	36,54
30 – 50	Limite Máximo Ocupação Urbana para Projetos Especiais (CDHU)	3	745,94	11,65
50 – 100	Limite Máximo Código Florestal	2	89,21	1,39
> 100	Áreas de Preservação Permanentes (APP) - Código Florestal	2	0,04	0,02
			6.403,18	100,00

5.2.4 Densidade de Drenagem

O arranjo da rede de drenagem é o somatório de um conjunto de variáveis físicas como clima, relevo, solos, substrato rochoso e vegetação; e em grande parte função da relação infiltração/escoamento.

Solos relativamente arenosos, devido à textura grosseira favorecem a infiltração em detrimento do deflúvio, mostrando um padrão pouco denso. Solos relativamente argilosos oferecem maior resistência à infiltração, favorecendo o deflúvio e criando um padrão de drenagem mais denso (Marchetti e Garcia, 1977).

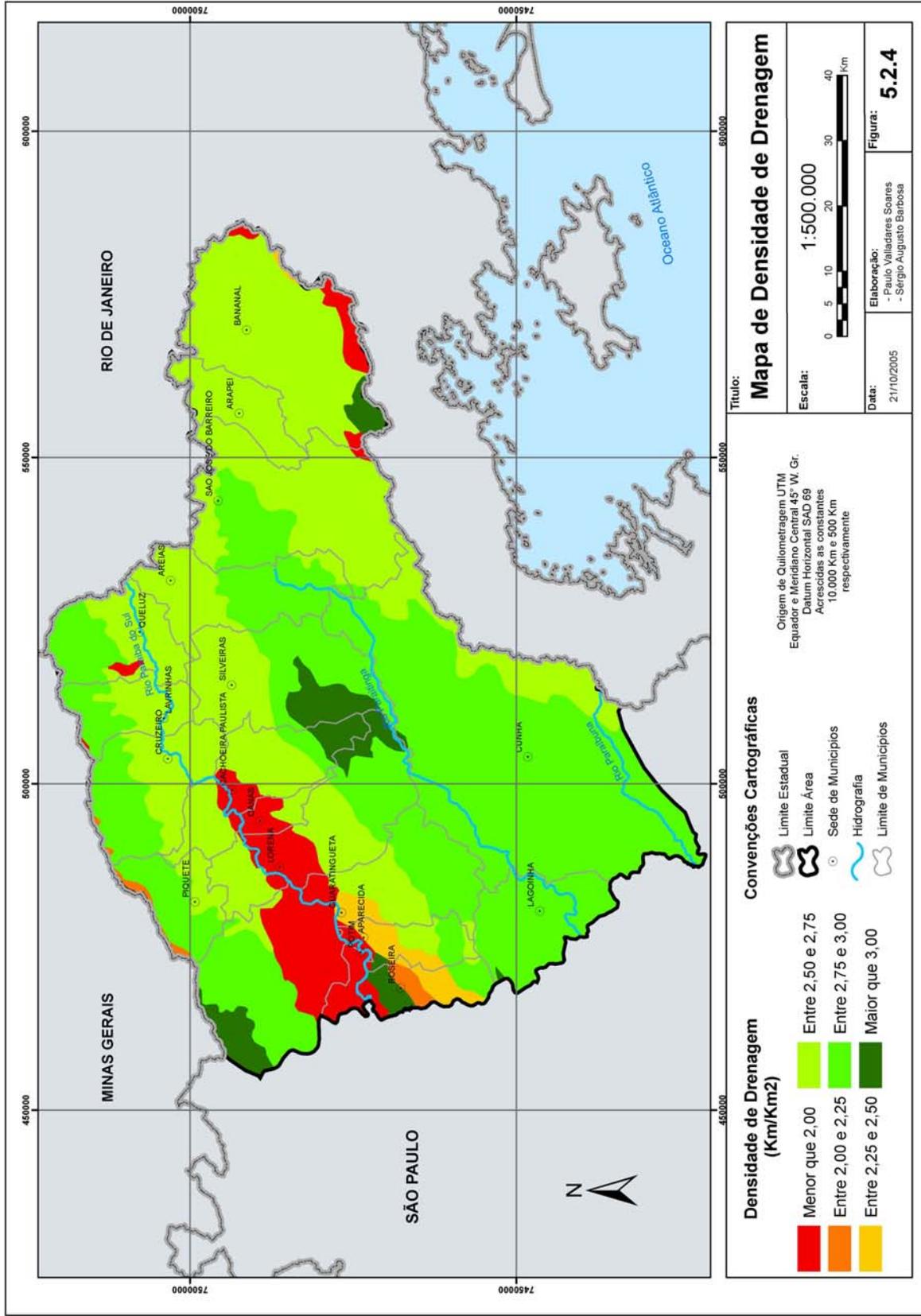
O estudo da rede de drenagem como um indicador ambiental para o planejamento em bacias em diferentes escalas, precisa ainda ser explorado. Para isso, é necessário dispor de um mapa-base detalhado da rede hidrográfica, elaborado a partir de fotos aéreas em grandes escalas, preferencialmente não inferiores a 1:25.000 e onde estejam mapeados todos os cursos d'água, incluindo os de ordem zero e efêmeros. Como está se tratando de áreas de pequenas dimensões, é possível que a diferença na distribuição da drenagem sejam bastante sutis e, portanto, difíceis de serem interpretadas. No entanto, trabalhos sobre o comportamento da densidade de drenagem

(Demattê e Demétrio, 1996a e 1996b; Rossi e Queiroz Neto, 1996; Meirelles e Botelho, 1997 e 1998) revelam que este pode ser um parâmetro eficiente na verificação e avaliação de distintos ambientes.

A densidade de drenagem foi gerada, enquanto Plano de Informação, no entanto, não foi considerada nos cruzamentos para definição de áreas homólogas, por dois motivos: escala de abordagem utilizada neste trabalho — esse tipo de informação pode ser melhor explorado e potencializado em levantamentos detalhados ($\leq 1:25.000$) —, e as características físicas como solo, substrato rochoso, clima, relevo e cobertura vegetal, também devem ser melhor detalhados e avaliados quanto a sua influência na estruturação e arranjo da rede de drenagem.

A densidade de drenagem estabelece a relação entre o somatório dos canais dividido pela área da bacia. A densidade de drenagem é um dos elementos mais importantes para a representação morfométrica de uma bacia hidrográfica, sendo um dos critérios que permite avaliar a velocidade com que a água deixa a bacia. A extensão e a densidade de drenagem refletem controles topográficos, litológicos, pedológicos e de vegetação.

É apresentada na Figura 5.2.4 a densidade de drenagem por unidade geomorfológica.



5.2.5 Pedologia

Em linhas gerais, os solos podem ser divididos em três domínios: solos de formação Pré-cambriana, solos de formação de idade Terciária e os solos existentes nas áreas de várzea do rio Paraíba.

Os solos de formação Pré-cambriana correspondem aos terrenos montanhosos, de altitudes mais elevadas, presentes nas encostas e interior dos planaltos. Originam-se em sua maioria das rochas metamórficas, tais como gnaisses, micaxistos, xistos. Predominam os argissolos vermelho-amarelos, os cambissolos háplicos e os latossolos vermelho-amarelos. Estes apresentam geralmente desenvolvimento variado (de raso a profundo), com texturas médias e argilosas e más condições de drenagem, podendo chegar à condição moderada.

Os solos de formação de idade Terciária têm sua melhor expressão na Bacia de Taubaté, caracterizando os latossolos ali presentes. São originados de sedimentos argilo-arenoso/areno-argiloso e ocorrem em relevos ondulados/fortemente ondulados, possuindo boas condições de drenagem. Também existem associações com argissolos, dada a contribuição dos terrenos cristalinos.

As várzeas do rio Paraíba, no trecho de Jacareí até São José dos Campos, apresentam bacias de solos orgânicos (turfas), indicando pequena contribuição de sedimentos minerais na época das enchentes. Tais turfeiras são formações alongadas, cujo eixo maior é paralelo ao eixo do rio; situam-se em ambas as margens e são separadas entre si pelas oscilações do leito do rio Paraíba, para ambos os lados da formação de idade Terciária. Após o município de São José dos Campos, predominam sedimentos argilosos, com bacias orgânicas ocasionais, e abaixo de Guaratinguetá, começam a dominar sedimentações superficiais de textura mais grossa.

O desgaste dos solos do Vale do Paraíba, devido à derrubada de mata primitiva e cultivo intenso de café, causou eliminação da fertilidade na região em espaço de tempo relativamente curto. Especialmente nas áreas de declividade acentuada, a erosão foi ativíssima, tendo como consequência o empobrecimento do solo e início da exploração pecuária, cujo domínio da vegetação de pastagens acentuou os processos erosivos.

Atualmente, os latossolos apresentam melhor capacidade para o uso da terra, apesar de serem mais sujeitos à erosão. Sua utilização é mais voltada para pastagem de gado leiteiro,

predominando nos pastos o capim gordura (*Melinis minutiflora*). Também são solos propensos ao cultivo de banana e milho, devido à relativa capacidade de troca catiônica.

Os argissolos são ácidos e encontram-se esgotados, necessitando de correção e adubação. Quando comparados aos latossolos são mais produtivos porque possuem maior retenção de bases. A presença de minerais primários nos horizontes B e C relativamente ao alcance das raízes das plantas podem ser indicações de maior riqueza potencial destes solos; em contrapartida, a baixa porosidade no Horizonte B dificulta o bom desenvolvimento do sistema radicular. As principais culturas são: café, milho, cana-de-açúcar e citrus, além de pastagens e reflorestamento com eucaliptos.

No tocante aos cambissolos, estes têm grande limitação para desenvolvimento da agricultura, em especial devido ao declive do relevo montanhoso, bem como a pouca profundidade dos perfis.

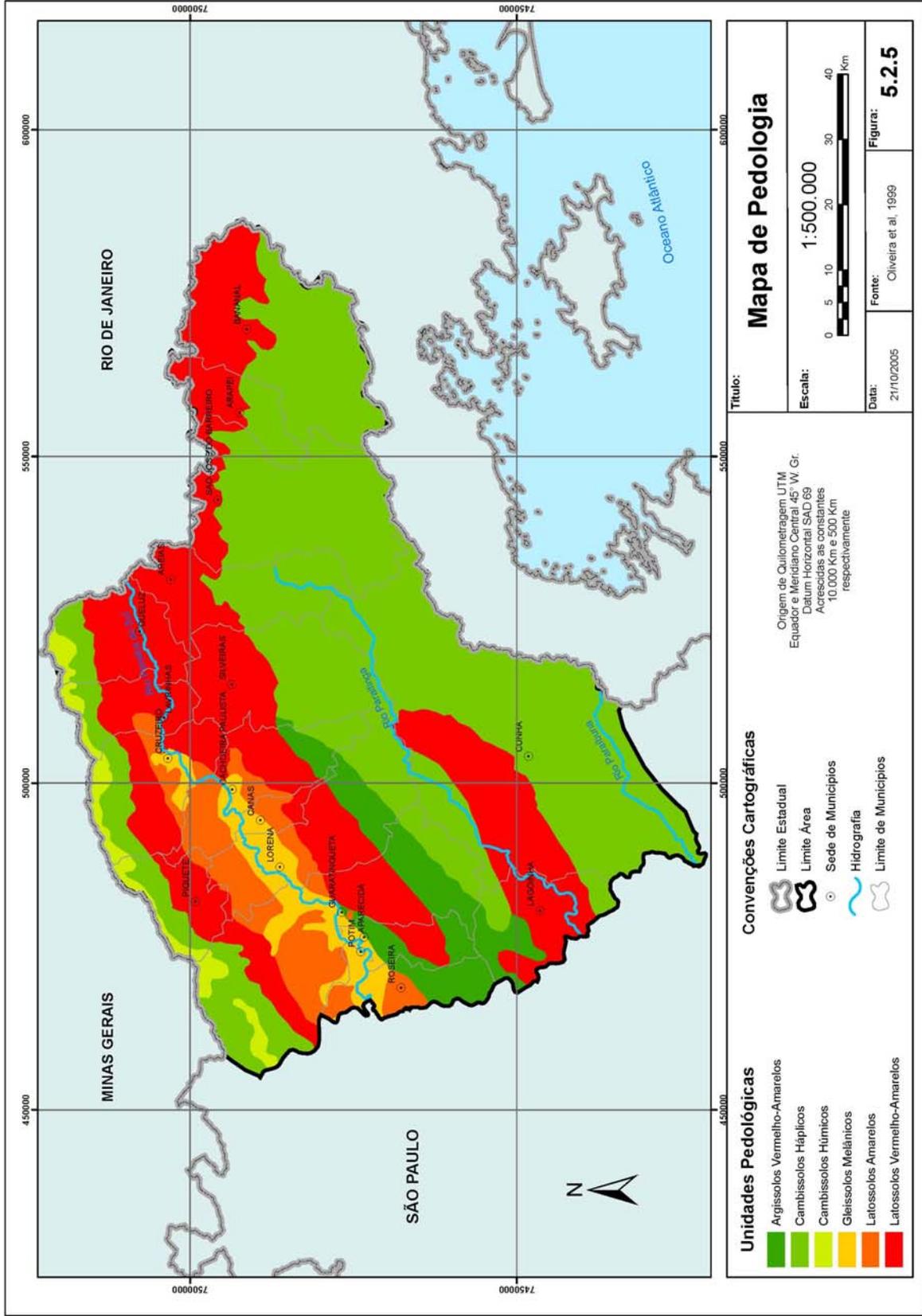
Por fim, os solos de várzeas possuem grande valor para a agricultura, principalmente para a horticultura e rizicultura. O maior problema para o plantio é a decomposição do material orgânico, quando são solos bem drenados.

De forma a corroborar as considerações realizadas anteriormente, utilizou-se a caracterização da cobertura pedológica da bacia hidrográfica, segundo classificação da USDA, (1972). Esta classificação é composta pelas características do meio permeável (meio onde ocorre a infiltração) que são comandadas pelo tipo de solo, textura e estrutura; a quantidade e o tipo de argila que esta contém; a espessura e a profundidade de suas camadas mais permeáveis e o uso ao qual foi submetido no passado.

De acordo com as diferenças encontradas no que se refere a infiltração, os solos podem ser classificados em quatro principais grupos: solos com alta capacidade de infiltração (potencial baixo de *runoff* quando totalmente molhado, consistindo de camadas de areia e cascalhos profundos, de drenagem boa a excessiva. Tais solos apresentam a alta taxa de transmissão de água que correspondem na área aos latossolos amarelos e latossolos vermelho-amarelos. Solos com capacidade de infiltração moderada quando totalmente molhado, consistindo de solo de profundidade moderada a alta, drenagem moderada a alta, textura moderadamente fina a moderadamente grosseira. Tais solos apresentam taxas moderadas de transmissão de água e correspondem aos cambissolos háplicos. Solos com baixa capacidade de infiltração quando totalmente molhados, consistindo de solos contendo camadas impermeáveis que impedem o

movimento descendente da água, ou solo de textura moderadamente fina a fina. Tais solos apresentam baixas taxas de transmissão de água e correspondem aos argissolos vermelho-amarelos. Solos com capacidade de infiltração muito baixa (alto potencial de *runoff*) quando totalmente molhados, consistindo de solos argilosos com alto potencial de intumescimento, ou com nível freático permanentemente superficial, ou com camada de impedimento superficial, ou solos rasos assentados sobre extrato impermeável. Tais solos apresentam taxa de transmissão de água muito baixa e corresponde ao cambissolos húmicos e gleissolos melânicos.

O mapa de solos utilizado foi elaborado a partir do levantamento realizado por Oliveira *et al.* (1999) tendo sido elaborado com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa. O mapa da Figura 5.2.5 mostra a distribuição das unidades pedológicas na área com uma nítida predominância de Cambissolos e Latossolos sobre os demais. Os Cambissolos estão associados com os relevos de serras, morros e escarpas enquanto os Latossolos estão associados aos relevos de colinas e de morros. Os Argissolos (antigos Podzólicos) ocorrem em uma pequena faixa de transição entre os Latossolos e os Cambissolos. Destaca-se, ainda, uma faixa de Gleissolos Melânicos relacionado à planície aluvionar do rio Paraíba do Sul.



Com base na definição e nas características das classes de solo, foram estabelecidos os pesos em função das características de infiltração conforme apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Pedologia, peso de infiltração e área

<i>UNIDADE</i>	<i>DESCRIÇÃO</i>	<i>PESO INFILTRAÇÃO</i>	<i>ÁREA (km²)</i>	<i>ÁREA %</i>
Argilossolos vermelho- amarelos	Solos com horizonte B textural, heterogêneo, enriquecido em argila no horizonte B. Possuem, em geral, elevada erodibilidade.	2	410,19	6,40
Cambissolos Háplicos	Solos com horizonte B pouco evoluído. Presença de minerais primários facilmente alteráveis.	4	3.059,99	47,79
Cambissolos Húmicos	Solos com horizonte B pouco evoluído com elevado teor de matéria orgânica. Presença de minerais primários facilmente alteráveis.	3	156,91	2,45
Gleissolos Melânicos	Solos hidromórficos, ricos em matéria orgânica e com elevada acidez. O nível do lençol freático fica próximo a superfície na maior parte do ano.	1	262,38	4,10
Latossolos Amarelos	Solos com horizonte B bem desenvolvido sem a presença de minerais primários. Possuem, em geral, baixa erodibilidade.	5	428,81	6,70
Latossolos Vermelho- Amarelos	Solos com horizonte B bem desenvolvido sem a presença de minerais primários. Possuem, em geral, baixa erodibilidade.	5	2.084,92	32,56
TOTAL			6.403,20	100,00

5.2.6 Pluviometria

A região Sudeste é aquela que, em todo o Brasil, se destaca por apresentar maior diversidade climática, considerando-se o regime das temperaturas. Estando localizada na zona tropical, a região está submetida a forte radiação solar, o que, por sua vez, favorece a evaporação das enormes massas líquidas presentes. A evaporação acentuada e a posterior condensação provocam chuvas mais ou menos freqüentes.

Por outro lado, o relevo local apresenta os maiores contrastes morfológicos do Brasil:

entre altas superfícies cristalinas e sedimentares, ocorre o amplo vale do rio Paraíba. Este é um fator que favorece as precipitações, uma vez que ele atua no sentido de aumentar a turbulência do ar.

Na maior parte da região, o clima pode ser considerado subtropical quente, com verões chuvosos e invernos secos. A temperatura média anual situa-se acima de 21°C, sendo a média anual de umidade relativa do ar superior a 70%.

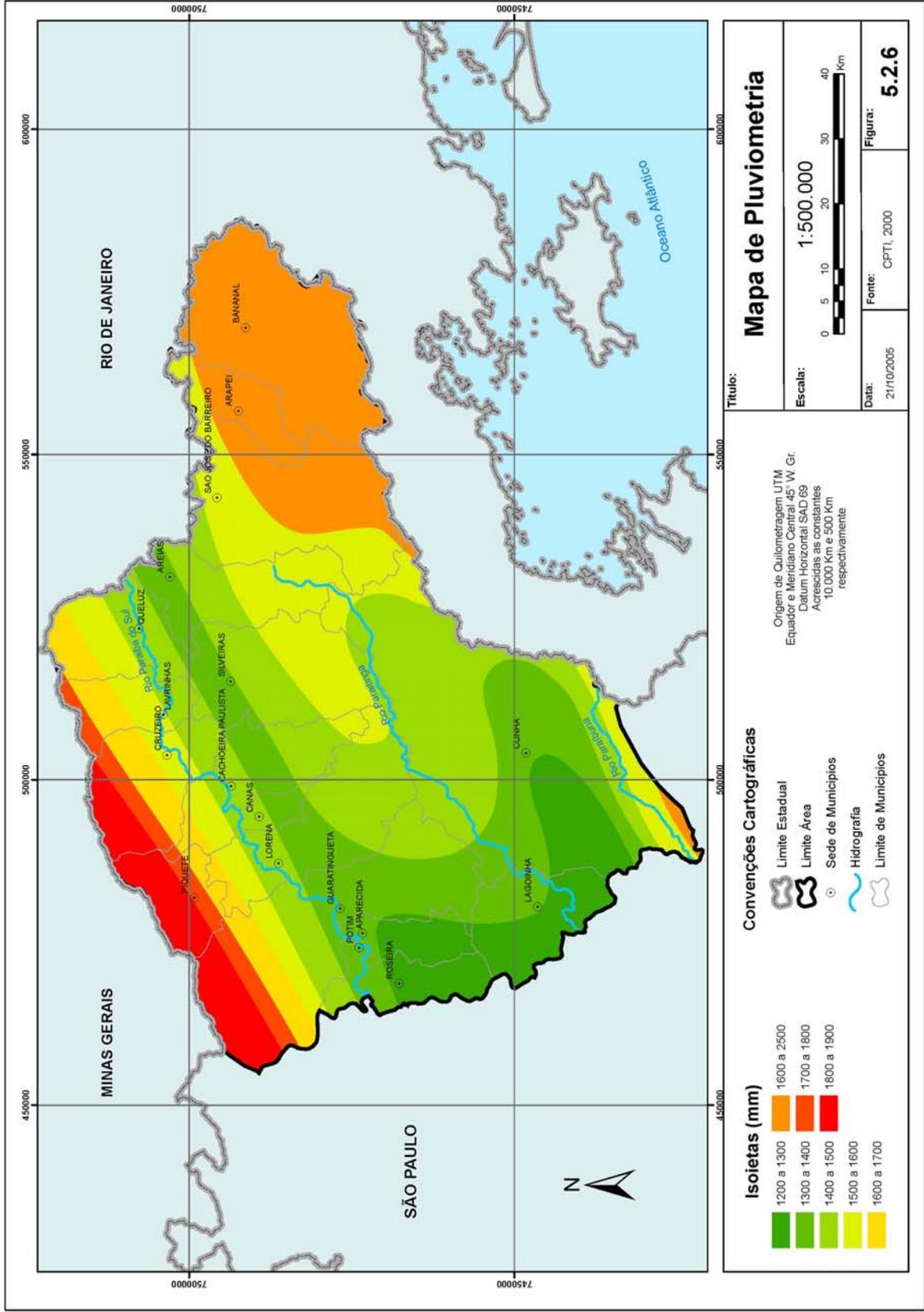
A configuração das isoietas anuais médias no trecho paulista da bacia, mostrada na Figura 5.2.6 (Isoietas Anuais Médias), indica que as precipitações mais elevadas, bem como as maiores diferenças de precipitação, estão associadas às serras da Mantiqueira (1.300 a 2.200mm) e do Mar (1.300 a 2.800mm).

A confirmação espacial das isoietas mostra que elas acompanham o relevo indicando que o efeito orográfico é determinante para a gênese das chuvas na região. A razão para a ocorrência de maiores valores e maiores diferenças na região Serra do Mar, é que, além do efeito orográfico, há a penetração do ar úmido proveniente do oceano.

A região plana situada entre as duas serras, e conhecida como Vale do Paraíba, possui os mais baixos índices de precipitação da bacia, oscilando entre 1.200 e 1.300mm, apresentando distribuição bastante uniforme. Nas proximidades das cidades de Paraibuna e Santa Branca, encontram-se os menores valores de totais anuais (1.200mm).

Em direção à Serra da Bocaina, já nas proximidades da divisa com o Estado do Rio de Janeiro, observa-se um aumento dos totais médios anuais, ocorrendo valores superiores a 500mm. Contudo, a ausência de dados nessa região impossibilita a identificação precisa de um provável núcleo de chuva, associado a esta serra.

A utilização da pluviosidade média anual como entrada de água no sistema de bacias hidrográficas, está associada à idéia que maiores alturas de precipitação possuem maior probabilidade de infiltração. Desta maneira foram estabelecidas oito faixas de pluviosidade para a região considerada. Entre os maiores e menores valores de precipitação média estabeleceram-se faixas intermediárias, as quais foram definidas de forma arbitrária (Figura 5.2.6). O Mapa de Isoietas utilizado neste trabalho foi produzido pelo CPTI (2000).



Foram considerados valores de precipitação média anual assumindo-se que o padrão de chuvas é homogêneo favorecendo assim, uma correlação positiva entre as condições de infiltração e a altura de precipitação. Os valores dos pesos por faixas de precipitação estão apresentados na Tabela 5.5

TABELA 5.5 – Isoietas, peso de infiltração e área

<i>PRECIPITAÇÃO</i>	<i>PESO INFILTRAÇÃO</i>	<i>ÁREA (km²)</i>	<i>ÁREA %</i>
1200 a 1300mm	1	548.58	8,57
1300 a 1400mm	1	1.142.69	17,85
1400 a 1500mm	2	1.681.89	26,27
1500 a 1600mm	3	1.132.35	17,68
1600 a 1700mm	4	346.17	5,40
1600 a 2500mm	5	1.043.71	16,30
1700 a 1800mm	4	178.07	2,78
1800 a 1900mm	4	329.74	5,15
TOTAL		6.403.20	100,00

Como era de se esperar, a distribuição do percentual de cada classe é a mais homogênea entre todos os critérios considerados. Entretanto, as regiões com maiores ponderações (4 e 5) possuem distribuição espacial um pouco menor. A região com maiores precipitações (Ponderação 5) se localiza no extremo leste da área (região da Serra da Bocaina) seguido da faixa de Ponderação 4 que corresponde a uma faixa longitudinal bem definida associada à Serra da Mantiqueira.

5.2.7 Uso do Solo

Na elaboração deste critério se buscou padronizar a metodologia utilizada pelo Instituto Florestal (para o ano de 2000), onde o Mapa de Uso e Cobertura Vegetal Natural das Terras foi elaborado através da interpretação visual de imagem do satélite LANDSAT 7.

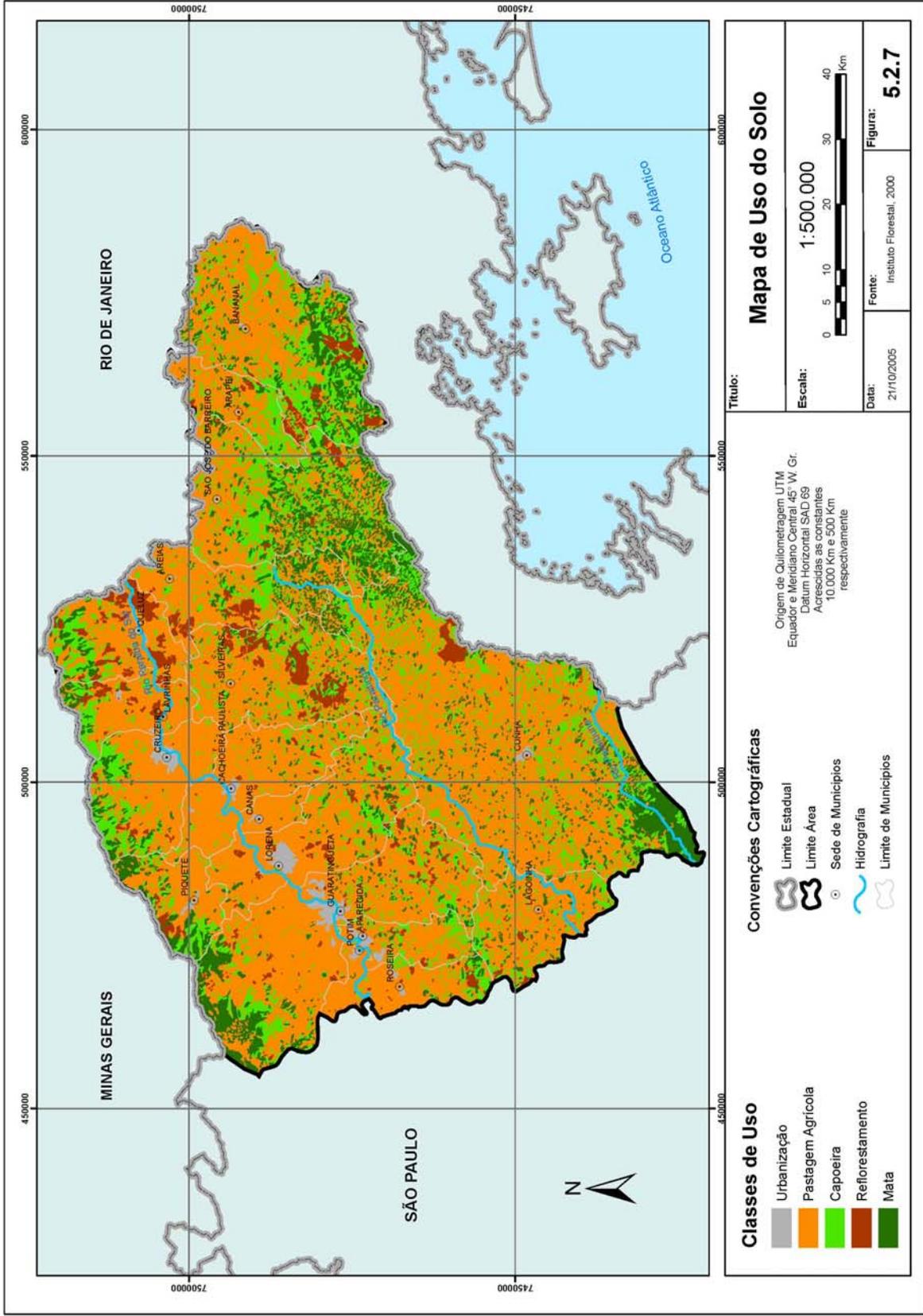
A definição de cinco classes de Uso e Cobertura Vegetal Natural das Terras se baseou na escala de análise e de uma melhor representação das características da área estudada. Assim, utilizou-se como base, as classes propostas por Pereira *et al.* (1988) para análise do uso e cobertura vegetal natural das terras, sendo elas: Urbanização, Pastagem, Capoeiras/Campos, Reflorestamento, Mata.

Por representarem capacidades semelhantes de infiltração algumas classes foram agrupadas. Abaixo, são definidas e descritas as classes consideradas:

- Mata – formação vegetal inteiramente dominada por árvores de estrutura complexa, apresentando grandes riquezas de espécies, em três estratos distintos: estrato superior, relativamente pouco denso, formado por indivíduos de 15 a 20 metros de altura, de troncos cilíndricos com esgalhamentos médio a alto; estrato intermediário, com alta densidade, constituído por indivíduos de 10 a 15 metros, com copas mais fechadas, e estrato inferior constituído por ervas e arbustos de até três metros de altura.
- Capoeira – vegetação secundária que sucede a derrubada das florestas, constituída, principalmente, por indivíduos lenhosos de segundo crescimento, na maioria da floresta anterior e por espécies espontâneas que invadem as áreas devastadas, apresentando porte desde arbustivo até arbóreo, porém com árvores finas e compactamente dispostas.
- Campo – tipo de vegetação que se caracteriza por uma cobertura graminóide e herbácea, observando-se a ausência de árvores. No Estado de São Paulo, segundo o Levantamento de Reconhecimento de Solo, este tipo de vegetação apresenta dois subtipos: os campos limpos e os campos de altitude. Os campos de altitude estão restritos, no Vale do Paraíba, a pequenas áreas nas altitudes superiores a 1200m, nos altos das serras da Bocaína e da Mantiqueira.
- Pastagem – tipo de paisagem ligada às atividades agropastoris extensivas e de uso intensivo e é estabelecida de forma precária no que diz respeito às medidas de conservação de solo, favorecendo os processos erosivos superficiais e subsuperficiais.

- Reflorestamento – plantio homogêneo de espécies exóticas (*pinnus* e/ou *eucalíptus*), floresta plantada.
- Urbanização – corresponde aos núcleos urbanos, incluindo as áreas de expansão urbana. São caracterizadas pela presença de muitos lotes e impermeabilização da estrutura urbana.

O mapa apresentado na Figura 5.2.7 mostra os diferentes usos da terra onde se observa claramente o predomínio de pastagens sobre os demais usos. As áreas de mata natural se concentram em pequenos fragmentos descontínuos concentrados nos dois sistemas de serras regionais: Mantiqueira e Serra do Mar. O Sistema Serras do Quebra Cangalha de direção NE-SW – dividindo a área em duas porções - possui poucos fragmentos de matas naturais. A maior parte das áreas de capoeira se concentra na Serra do Quebra Cangalha, na região do Bananal e na região que compõe as cidades do “Vale Histórico” (leste da área).



Os pesos relativos para infiltração em relação ao uso da terra podem ser observados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Uso do solo, peso de infiltração e área

<i>DESCRIÇÃO</i>	<i>PESO INFILTRAÇÃO</i>	<i>ÁREA (km²)</i>	<i>ÁREA %</i>
Floresta em estágio inicial de recuperação	3	910.33	14,22
Formação vegetal complexa com elevada biodiversidade	5	642.40	10,02
Atividade agrícola extensiva e mal manejada	2	4.538.37	70,89
Plantios homogêneos de espécies exóticas / florestas plantadas	4	240.29	3,75
Áreas urbanas de diferentes portes, conurbadas e impermeabilizadas	1	71.81	1,12
TOTAL		6.403.20	100,00

A classe de infiltração pelo mapa da Figura 5.2.7 apresenta áreas mais favoráveis que (Ponderações 4 e 5) são percentualmente pequenas quando comparadas com as áreas de pastagem que possuem condições inadequadas de infiltração. Deve-se destacar que as condições de degradação e baixas práticas conservacionistas das áreas de pastagem limitam ainda mais as condições de infiltração desta classe de uso da terra. As áreas de reflorestamento foram consideradas como tendo uma ponderação 4 em função da homogeneidade de sua estrutura arbórea.

5.2.8. Áreas Homólogas

5.2.8.1. Integração das Grades de Valores Numéricos – Escala Regional

O conjunto de 6 (seis) grades numéricas descrevendo os planos de informação foi integrado somando-se no contexto vertical os valores ponderados pré-estabelecidos para cada classe.

No intuito de melhor expressar o comportamento das áreas segundo sua capacidade de infiltração e também tornar possível a visualização em um mapa temático estabeleceu-se uma linguagem de qualificadores a cada um destes intervalos (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 – Intervalos propostos para o fatiamento da grade numérica e seus respectivos qualificadores.

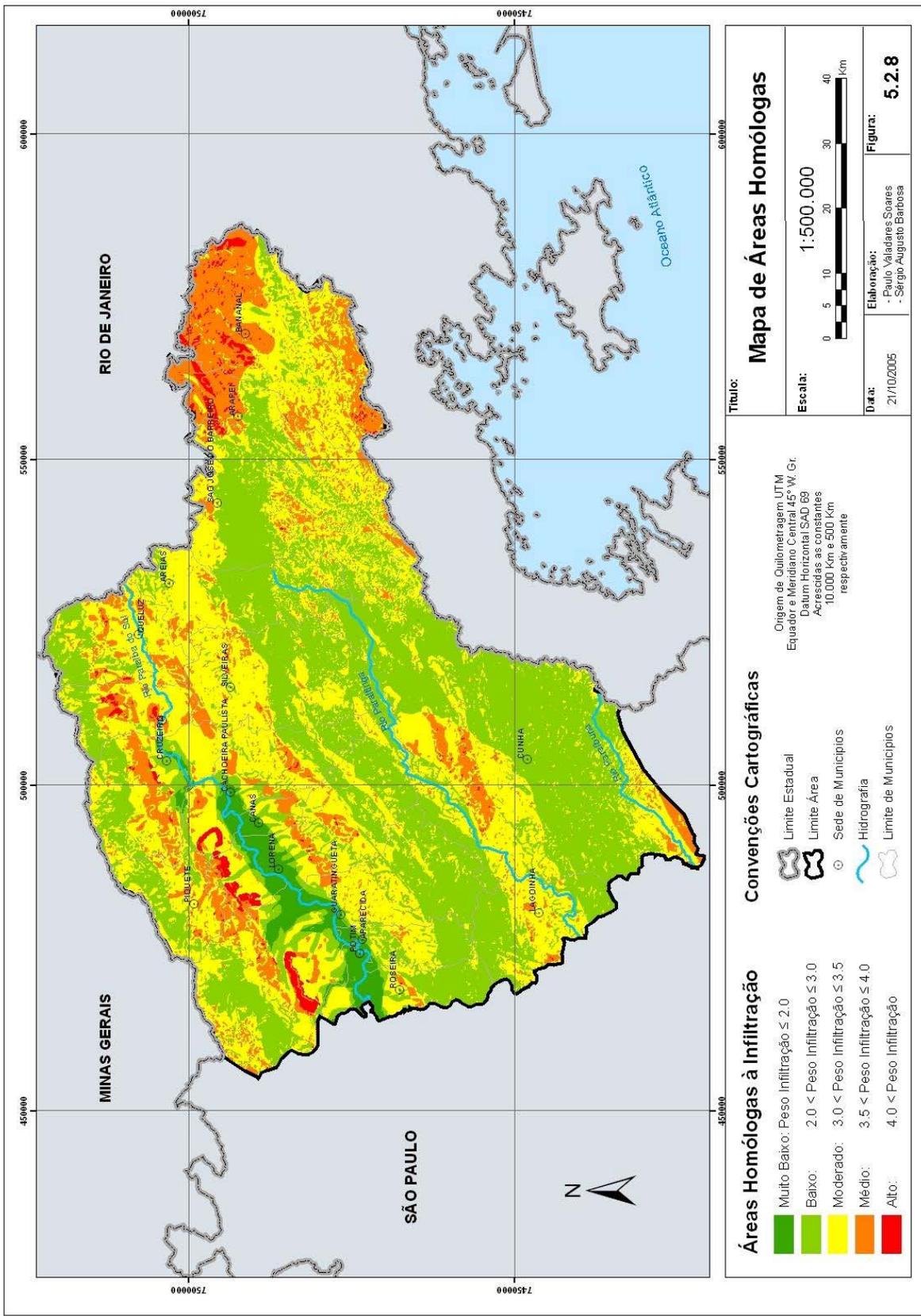
<i>INTERVALOS</i>	<i>QUALIFICADORES</i>	<i>ÁREA (km²)</i>	<i>% ÁREA</i>
Peso Infiltração $\leq 2,00$	Muito Baixo	206.17	3,23
2,00 < Peso Infiltração $\leq 3,00$	Baixo	2.663.06	41,58
3,00 < Peso Infiltração $\leq 3,50$	Moderado	2.517.32	39,33
3,50 < Peso Infiltração $\leq 4,00$	Médio	919.42	14,36
4,00 < Peso Infiltração	Alto	97.23	1,50
TOTAL		6.403.20	100,00

Tabela 5.8 – Intervalos propostos e cores associadas as área homólogas

INTERVALOS	QUALIFICADORES	CORES
Peso Infiltração $\leq 2,00$	Muito Baixo	Verde escuro
2,00 < Peso Infiltração $\leq 3,00$	Baixo	Verde claro
3,00 < Peso Infiltração $\leq 3,50$	Moderado	Amarelo
3,50 < Peso Infiltração $\leq 4,00$	Médio	Marrom
4,00 < Peso Infiltração	Alto	Vermelho

O resultado da soma das grades gerou uma outra grade contendo os valores integrados de todas as grades de variáveis e também uma imagem representando todas as áreas homólogas segundo os valores resultantes (Figuras 5.2.8).

Enquanto procedimento metodológico, a identificação de regiões com boa capacidade de infiltração (vermelho) representam aquelas que tem a melhor conjugação de possibilidades para que a água permaneça e se infiltre no perfil de solo. Nas condições de infiltração regulares (amarelo) representam as regiões em que estes fatores apresentam condicionantes (elementos da paisagem) que inviabilizam, em parte, a infiltração de água no solo. A condição menos favorável aparece na cor verde.



Desta forma, procurou-se ver a região estudada como uma área sistêmica de produção, armazenamento e disponibilização de água pela conjugação dos elementos da paisagem.

Considerando a precipitação como elemento de entrada de água no sistema, as áreas homólogas da Figura 5.2.8 representam as regiões com maior ou menor facilidade de infiltração. Embora as classes dentro dos planos de informação possam responder de forma individual, suas características quanto à capacidade de infiltração está ligada a integração dos elementos da paisagem e se constitui em uma interessante forma de análise na distribuição espacial das condições de infiltração.

Em escala regional, observa-se pela Figura 5.2.8 que o extremo nordeste da área, correspondendo a Serra da Bocaina, apresenta a maior área contínua com boa capacidade de infiltração. Isto pode ser explicado por um conjunto de fatores positivos como elevadas precipitações médias anuais (1800 a 1900mm), relevos predominantes tipo Mar de Morros, declividades médias baixas (3 a 12%), predominância de Latossolos Vermelho-Amarelos e alto grau de fraturamento.

Áreas expressivas com boas condições de infiltração ainda ocorrem nos contrafortes da Serra do Mar, na região entre Cunha e Lagoinha e em parte dos terrenos colinosos que acompanham o rio Paraíba do Sul na porção norte da área.

Nos contrafortes da Serra do Mar, as áreas de boa infiltração englobam as nascentes dos rios Paraibuna e Paraitinga. As áreas com boa capacidade de infiltração ocorrem de forma fragmentada e são caracterizadas por fatores como pluviometria média (1400 a 1600mm) e relevos predominantemente constituídos de serras e solos de B textural incipiente (Cambissolos). De uma maneira geral, estas condições não seriam muito favoráveis à infiltração. Entretanto as condições de uso da terra são muito favoráveis, pois nesta região se concentra a maior parte dos fragmentos de mata da área de estudo.

Na região entre Cunha e Lagoinha (centro-sul da área), existe uma “mancha” que apresenta uma boa capacidade de infiltração. Nesta região as precipitações são relativamente baixas (1400 a 1500mm). Entretanto, diversos condicionantes da paisagem são favoráveis à infiltração (Ponderações 4 e 5) tais como: o predomínio de Mar de Morros, as baixas declividades (3-12%), a presença de Granitóides muito fraturados e a presença de Latossolos Vermelho-Amarelo.

Na porção norte da área ocorre uma estreita faixa de terrenos com boa infiltração. Esta área está inserida em elementos da paisagem com condições favoráveis de infiltração (Ponderação 5) tais como: relevos colinosos, baixas declividades (3-12%) e latossolos vermelho-amarelos.

As condições menos favoráveis de infiltração ocorrem em diversas áreas no interior da região estudada tais como: no extremo sul (região entre Cunha e São Luis do Paraitinga), na porção noroeste (planície aluvionar do rio Paraíba do Sul), no extremo norte (Serra da Mantiqueira) e em uma longa faixa SW-NE dividindo a área ao meio (Serra do Quebra Cangalha).

Na região entre Cunha e São Luis do Paraitinga ocorrem as menores médias anuais de precipitação (1200 a 1400mm). Na sua maioria, os condicionantes da paisagem também não são muito desfavoráveis (predomínio de ponderações 1 e 2). Entre estes se destaca o relevo de Serras, declividades elevadas (30 a 100%) e cambissolos háplicos. A vegetação na região está representada por pequenos fragmentos de capoeira sem expressão espacial.

Na planície aluvionar do Rio Paraíba as condições de infiltração são muito reduzidas principalmente devido às condições dos solos predominantes (Gleissolos Melânicos). Estes solos estão, na sua maioria, em condições próximas à saturação (solos hidromórficos) e são ricos em matéria orgânica o que propiciam condições pouco favoráveis à infiltração. Um outro aspecto importante para reduzir a capacidade de infiltração destes solos é a elevada quantidade de área impermeabilizada fruto do processo de conurbação das cidades próximas ao rio Paraíba do Sul.

Na região da Serra do Quebra Cangalha a precipitação média anual é relativamente baixa (1200 a 1400mm). O relevo é formado predominantemente por uma escarpa estabelecendo um divisor de águas entre a região compreendida entre a Serra do Mar e a Serra do Quebra Cangalha e entre a Serra da Mantiqueira e a Serra do Quebra Cangalha. As declividades são relativamente elevadas (30 a 100%) e os relevos estão em uma zona de transição entre os Latossolos e os Cambissolos. A vegetação é constituída de fragmentos de capoeira e algumas áreas descontínuas de reflorestamento.

No extremo norte e nordeste ocorrem faixas contínuas com infiltração menos favoráveis (regular). Ainda que nestas áreas ocorra uma quantidade relativamente significativa de vegetação — principalmente capoeira — as condições de relevo (escarpas), de várias classes com

declividades médias elevadas (12 a 30, 30 a 50 e 50 a 100%) e de solo (Cambissolos Húmicos) não favorecem, no contexto regional, as condições de infiltração.

De uma maneira geral a região entre a Serra do Quebra Cangalha e a Serra do Mar apresenta condições de infiltração variando de boa a moderada. O mapa da Figura 5.2.9 mostra claramente a importância desta faixa — ou compartimento — como área de produção e disponibilização de água para o sistema Paraíba do Sul.

A região que compreende o Vale do Paraíba - região entre as Serras do Quebra Cangalha e a Serra da Mantiqueira — apresenta as maiores expressões espaciais em áreas com capacidade regular de infiltração. Parte disso se deve as condições de solos hidromórficos representados pela várzea do rio Paraíba do Sul.

5.3 Abordagem em Bacia Representativa

Na definição da bacia do ribeirão Guaratinguetá, como bacia representativa, foram considerados os seguintes pontos:

- todos os elementos da paisagem que compõe os planos de informação presentes na área de estudo regional, estão representados na bacia hidrográfica do ribeirão Guaratinguetá;
- toda as análises, correlações e cruzamentos desenvolvidos no âmbito regional, podem ser realizados no ribeirão Guaratinguetá, guardadas as adequações de escalas;
- existe uma coerência nos temas, ponderações e representação espacial das unidades homólogas, tanto no regional como na bacia representativa;
- o Comitê das Bacias Hidrográficas do rio Paraíba do Sul – CBH-PS, ao elaborar o Plano de Bacia 2001-2003 definiu e priorizou, em segundo lugar, dentre as bacias de afluentes que compõe a porção paulista da bacia, a bacia do ribeirão Guaratinguetá, com objetivo de desenvolver ações de gestão com vistas a implantação do plano.

A partir da definição e delimitação das regiões homólogas à infiltração, em escala regional, e com a sobreposição da bacia do ribeirão Guaratinguetá à área de estudo foi possível contextualizar a bacia segundo a região que pertence.

As características de homogeneidade em pequenas bacias fazem com que elas muitas vezes sejam utilizadas em pesquisas objetivando a obtenção de um melhor entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos, que interferem no ciclo hidrológico. O conceito de

pequenas bacias, desta maneira, está associado ao tipo de estudo que é desenvolvido e à aplicação e interpretação efetuada a partir dos dados coletados.

Tomando como base os processos envolvidos, uma bacia hidrográfica é considerada pequena quando apresentar alguma ou todas as propriedades abaixo (Ponce, 1989):

- A precipitação pode ser considerada como uniformemente distribuída no espaço, sobre a bacia;
- A precipitação pode ser considerada como uniformemente distribuída no tempo;
- A duração das tormentas geralmente excede o tempo de concentração da bacia;
- A geração de água e sedimentos se dá principalmente pelo escoamento nas vertentes;
- Os processos de armazenamento e fluxo concentrado na calha dos cursos d'água são pouco importantes.

Assim, pequenas bacias podem ser caracterizadas como bacias representativas, bacias experimentais ou bacias elementares. Neste estudo estaremos trabalhando com bacia representativa, a partir da definição estabelecida por Goldenfun (2001).

Bacias representativas são bacias instrumentadas com aparelhos de observação e registro de fenômenos hidrológicos e climatológicos e que representam bacias situadas em uma mesma região homóloga. Elas são utilizadas para pesquisas intensivas de detalhes específicos do ciclo hidrológico de condições naturais relativamente estáveis (Toebe e Oryvaev, 1970). Conforme Lanna (1983), o objetivo de instrumentação de bacias representativas é a obtenção de dados típicos de região homóloga a que pertencem, permitindo a fundamentação de estudos que resultam em um melhor conhecimento dos processos hidrológicos atuantes.

As observações em bacias representativas devem ser efetuadas durante longos períodos de tempo e em combinação com estudos climáticos, pedológicos, geológicos e hidrológicos. Elas devem ser implantadas visando:

- Pesquisas básicas – estudos detalhados de processos físicos, químicos e/ou biológicos dentro do ciclo hidrológico;
- Determinação dos efeitos de mudanças naturais (ou eventualmente, mudanças nas práticas de cultivo e uso do solo) no regime hidrológico – mudanças no clima, na vegetação ou no solo;
- Predição hidrológica - desenvolvimento e adaptação de modelos para estimativa da disponibilidade de recursos hídricos em uma região;

- Formação de uma rede básica de estações hidrológicas - em muitos locais, devido à carência de dados hidrológicos, as bacias representativas podem cumprir o papel de uma rede básica de estações hidrológicas;
- Extensão de séries históricas – as séries de dados observados em bacias representativas, por serem de longa duração e boa qualidade, permitem sua utilização para complementar séries existentes na mesma região homóloga.

Para atender estas necessidades, as bacias representativas devem apresentar mudanças naturais ou culturais mínimas durante o período de estudo. Se houver mudanças, elas devem ser registradas em detalhe, para permitir uma correta avaliação de sua influência.

5.4 A Compartimentação Física da Bacia do Ribeirão Guaratinguetá

O ribeirão Guaratinguetá, afluente da margem esquerda do rio Paraíba do Sul, nasce nos contrafortes da Serra da Mantiqueira e tem todo o seu trajeto contido no município de Guaratinguetá. Ele passa a ficar caudaloso quando recebe as águas do ribeirão Taquaral que por sua vez já recebeu a contribuição do ribeirão do Guameral (Figura 5.3.1).

Geograficamente a sub-bacia do ribeirão Guaratinguetá encontra-se no norte do município fazendo divisa com os municípios de Campos do Jordão, São José dos Campos e Lorena. A bacia compreende parcialmente as cartas topográficas Guaratinguetá (SF.23-Y-B-VI-4), Delfim Moreira (SF.23-Y-B-VI-1), Lorena (SF.23-Y-B_VI-2), produzidos pelo IBGE, na escala 1:50.000.

A bacia possui uma área em torno de 164,0km², o que corresponde a cerca de 22% da área total do município de Guaratinguetá (734km²). Os seus principais afluentes na sua porção à montante (áreas de cabeceiras e médio curso superior) são: o ribeirão do Taquaral, o ribeirão do Guameral e o ribeirão do Sino. Na sua porção à jusante (área de várzea) o ribeirão Guaratinguetá não recebe contribuições expressivas.

Do ponto de vista do meio físico a bacia do Guaratinguetá é caracterizada por apresentar uma grande diversidade de relevos variando entre 550 e 2000m. Esta diversidade de relevos propicia uma grande heterogeneidade quanto à sua geologia, hidrografia, hidrologia, solos, vegetação e ocupação humana os quais serão discutidos a seguir.



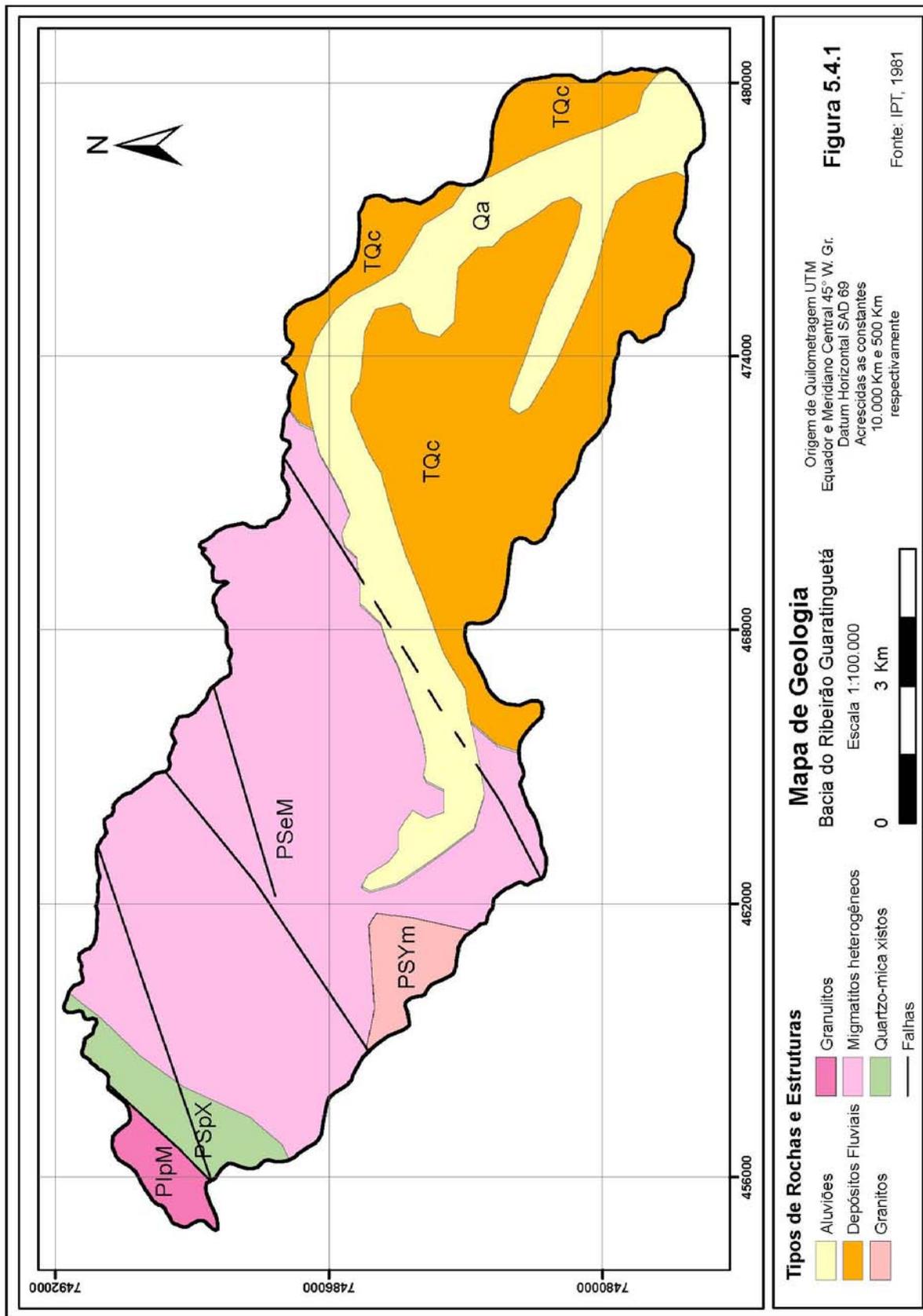
5.4.1. Geologia

Embora a bacia do ribeirão Guaratinguetá possua um tamanho relativamente pequeno, ela apresenta uma diversidade geológica significativa em face de se encontrar no limite entre as rochas cristalinas de idade pré-cambriana que formam o arcabouço estrutural da Serra da Mantiqueira e a bacia sedimentar de Taubaté, de idade Cenozóica (Figura 5.4.1). Neste sentido, a bacia do Guaratinguetá pode ser considerada como representativa desta condição limite no qual cerca de 50% de sua área é constituída por rochas cristalinas e cerca de 50% é constituída por rochas sedimentares.

Para a descrição das unidades geológicas presentes na área de estudo e para a confecção do mapa geológico foram utilizados as bases e o material bibliográfico disponíveis em Hasui *et al.* (1978), Almeida *et al.* (1991) e Landim *et al.* (1984).

As rochas cristalinas na região possuem uma idade Proterozóico Inferior (entre 2,5 a 1,7 bilhões de anos) e Proterozóico Superior (em torno de 600 milhões de anos) com base no Mapa Geológico do Estado de São Paulo, produzido em escala 1:250.000. As rochas principais encontradas nos domínios cristalinos são migmatitos, gnaisses, xistos e granitos.

As rochas sedimentares da região possuem idade Cenozóica (inferior a 60 milhões de anos) e são representadas na área da bacia por rochas consolidadas como arenitos e argilitos e por sedimentos inconsolidados como areias e argilas, depositados próximos aos principais cursos de água, que ocorrem na bacia.



Abaixo são descritas, da base para o topo, as unidades geológicas que constam no Mapa Geológico da bacia:

- Unidade Proterozóica Inferior com Migmatitos (PIpM) – Esta unidade ocorre em uma pequena porção no limite oeste da região sendo constituída por migmatitos estromáticos com paleossoma xistoso. Estas rochas não diferem muito daquelas encontradas na unidade (PSpM) descrita mais adiante. A principal diferença seria a idade Proterozóico Inferior para estas rochas em contraste com a idade Proterozóica Superior da unidade PSpM.
- Proterozóico Superior (PSpX) – Esta unidade também corresponde a uma pequena faixa aflorante na região oeste da bacia. Na unidade predominam micaxistos, quartzo micaxistos e gnaisses. Em face de sua composição micácea e da presença marcante de estruturas metamórficas, as rochas desta unidade estão associadas principalmente a um relevo colinoso formado por encostas relativamente suaves contrastando com os demais relevos encontrados na região.
- Proterozóico Superior (PSeM) – Esta unidade é formada por migmatitos heterogêneos com o paleossoma (porção mais antiga) constituído por litotipos como biotita gnaisse, xistos e anfibolitos. Em quantidade menor ocorrem migmatitos homogêneos que apresentam estruturas variadas. Em termos espaciais esta unidade representa o substrato geológico que ocupa 45% da bacia.
- Proterozóico Superior (PS γ m) – Esta unidade corresponde aos únicos corpos granitóides encontrados na área da bacia e possui composição tonalítica a granítica. Parte destes corpos foi afetada pelo metamorfismo regional que é evidenciado pela presença de estruturas foliadas em seu interior. Ocorrem em uma pequena faixa na porção sudoeste da bacia estando associados, do ponto de vista geomorfológico, a um relevo de escarpas.
- Formação Caçapava (TQc) – Esta formação de idade Terciário/Quaternário é constituída por arenitos, argilitos e, subordinadamente, folhelhos e conglomerados. Esta seqüência de rochas ocorre no terço inferior da bacia e corresponde aos relevos colinosos encontrados na área, são depósitos continentais e fluviais.
- Depósitos Quaternários (aluviais - Qa) – Os depósitos inconsolidados aluvionares aparecem ocupando as calhas fluviais, planícies de inundações e terraços. Estes depósitos são constituídos de areias e argilas e desenvolvem-se ao longo dos principais cursos de água da

bacia. Porém, é relacionado ao ribeirão Guaratinguetá que os sedimentos aluvionares estão mais desenvolvidos possuindo uma largura variando entre 500 e 1000m.

Com base no mapa de geologia foram estruturados os qualificadores e atribuído pesos para cada unidade geológica, segundo a capacidade de infiltração considerando as características litológicas e o grau de fraturamento associado. É apresentada a distribuição em área (Km²) e em percentagem dos litotipos identificados na bacia.

Tabela 5.9 – Geologia, peso de infiltração e área

<i>GEOLOGIA CLASSES</i>	<i>PESO INFILTRAÇÃO</i>	<i>ÁREA (km²)</i>	<i>ÁREA %</i>
Granulitos	2	2,93	1,79
Migmatitos heterogêneos	2	74,68	45,68
Quartzo-mica xistos	3	5,63	3,45
Granitos	4	3,71	2,27
Depósitos Quaternários (Aluviões)	1	29,32	17,93
Rochas Sedimentares (Depósitos Continentais e Fluviais)	5	47,22	28,88
TOTAL		163,49	100,00

Pela distribuição apresentada na Tabela 5.9, pode se observar que embora apresente a maior distribuição areal (45,68%), os migmatitos heterogêneos, contribuem com peso 2 para o processo de infiltração na bacia em função da sua estrutura, constituições mineralógica/geoquímica e ao grau de fraturamento (médio). Refletindo suas propriedades geológicas em relação à capacidade de infiltração, podemos dizer que as rochas granulíticas possuem alto grau de coesão entre seus constituintes e uma composição granulométrica fina, com isto, mais resistente à decomposição e apresentando baixo grau de permeabilidade, grau de heterogeneidade média a baixa e presença discreta até a ausência de planos de descontinuidade o que não favorece a desagregação mecânica e por conseguinte a penetração de água.

As rochas sedimentares da Formação Caçapava (depósitos fluviais), segunda em expressão areal na bacia (28,88%) reflete propriedades geológicas em relação a capacidade de infiltração mais favoráveis como por exemplo: grau de permeabilidade, grau de heterogeneidade, e ocorrência de planos de descontinuidade. Composto de arenitos, argilitos e subordinadamente

folhelhos e conglomerados, embora apresente composição heterogênea, são bons “produtores” de água, conforme relatório do DAEE (1977), citado no capítulo 3.

As aluviões apresentam boas condições de infiltração no que se refere as propriedades geológicas, no entanto, quando consideramos uma de suas principais características: posição do nível do freático próximo a superfície, a ponderação para infiltração é a mais baixa.

Os migmatitos heterogêneos e o quartzo-mica-tito representam condição intermediária, em função basicamente do seu manto de alteração que é arenoargiloso.

5.4.2. Geomorfologia

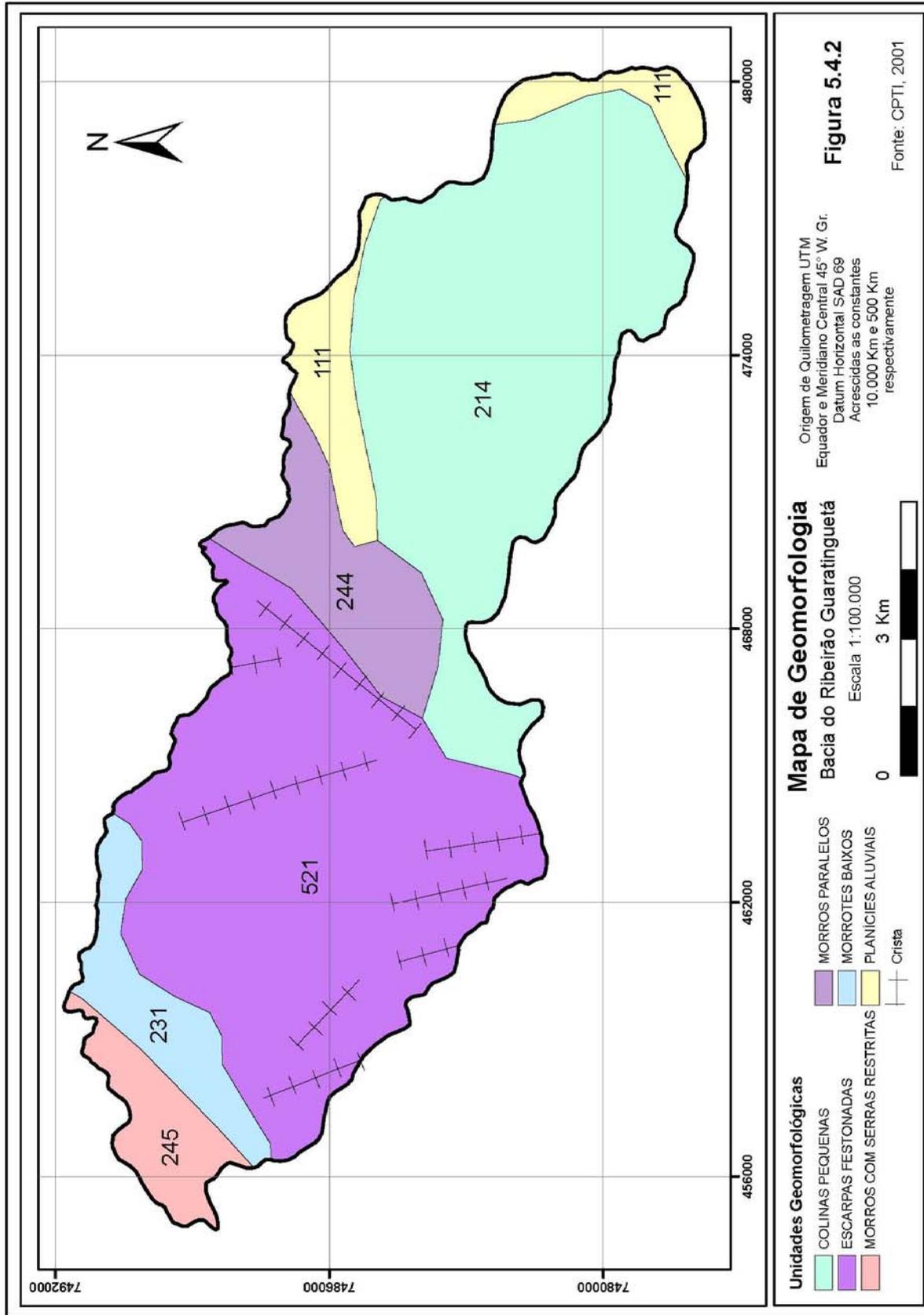
Com base em Ponçano *et al.* (1981), reconhecem-se na bacia do Guaratinguetá as seguintes unidades: Planícies Aluviais, Colinas Pequenas com Espigões Locais, Morrotes Baixos, Morros Paralelos, Morros com Serras Restritas, Escarpas Festonadas. Estas unidades serão descritas em seguida e podem ser visualizadas no mapa geomorfológico da bacia (Figura 5.4.2).

Relevo de agradação

- Planícies Aluviais – Áreas com declividades inferiores a 5% sendo parte delas sujeitas periodicamente à inundações. As maiores áreas de planície aluvionar são aquelas acompanhando o curso principal do ribeirão Guaratinguetá chegando a atingir em torno de 1000 metros de largura. Faixas mais estreitas são encontradas acompanhando os principais afluentes. Estas áreas tem sido sujeitas periodicamente à inundações localizadas.

Relevos de degradação

- Colinas Pequenas com Espigões Locais – possuem topos amplos e arredondados com declividades de até 20%, raramente atingindo 30%. Este tipo de relevo está mais associado às seqüências de rochas sedimentares. Predominam interflúvios sem orientação, topos aplainados e arredondados, vertentes ravinadas com perfis convexos a retilíneos, drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-paralelo a dendrítico, vales fechados, planícies aluviais interiores, restritas.



- Morrotes Baixos – correspondem a relevos ondulados onde predominam amplitudes menores que 50 metros. Os topos são arredondados e as vertentes apresentam perfis convexos a retilíneos. A drenagem possui alta densidade e os vales apresentam-se tanto fechados quanto abertos. Na área da bacia este padrão de drenagem ocorre em uma pequena faixa na sua região norte. Os morrotes baixos ocupam uma pequena faixa associada às cotas mais elevadas da bacia em sua porção noroeste.
- Morros Paralelos – nesta unidade predominam relevos com topos arredondados e vertentes com perfis retilíneos a convexo. A drenagem possui alta densidade, os vales são fechados a abertos e ocorrem planícies aluvionares interiores restritas. Os morros paralelos ocupam uma pequena faixa no centro da bacia.
- Morros com Serras Restritas – nesta unidade os morros são arredondados, as vertentes possuem perfis retilíneos e ocorrem localmente serras restritas. A drenagem é de alta densidade, os vales são fechados e as planícies aluvionares interiores restritas. Da mesma maneira que os morrotes baixos, esta unidade ocupa as porções mais elevadas na região noroeste da bacia.
- Escarpas Festonadas – os topos são angulosos e as vertentes apresentam perfis retilíneos. A drenagem possui média densidade e vales fechados. O relevo de escarpas festonadas ocupa uma porção bastante expressiva em termos espaciais sendo a principal unidade associada as rochas pré-cambrianas.

Com base no mapa geomorfológico e em face de suas características morfométricas, as unidades geomorfológicas foram reagrupadas em seis classes e atribuídos pesos para cada classe, segundo a capacidade de infiltração considerando as diferentes expressões e configurações da paisagem morfológica (altitude, amplitude e comprimento de rampa). É apresentada a distribuição em área (km²) e em percentagem das morfoestruturas indentificadas na bacia.

Tabela 5.10 – Geomorfologia, peso de infiltração e área

<i>SIGLA</i>	<i>FORMA</i>	<i>UNIDADE</i>	<i>PESO INFILTRAÇÃO</i>	<i>ÁREA (km²)</i>	<i>ÁREA %</i>
111	Continentais	Planícies aluviais	1	10,58	6,47
214	Relevo Colinoso	Colinas pequenas com espigões locais	5	59,45	36,36
231	Relevo de Morrotes	Morrotes baixos	4	8,92	5,45
244	Relevo de Morros	Morros paralelos	4	12,28	7,52
245	Relevo de Morros	Morros c/ serras restritas	4	7,16	4,38
521	Escarpas	Escarpas festonadas	2	65,10	39,82
TOTAL				163,49	100,00

Pela distribuição apresentada na Tabela 5.10 observa-se que o relevo dominante na bacia são as escarpas festonadas e as colinas pequenas com espigões locais, e de forma subordinada morros, morrotes e planícies aluviais; juntos estes últimos representam, aproximadamente dois terços de um dos relevos dominantes da bacia.

O relevo colinoso (colinas pequenas com espigões locais) apresenta a segunda maior expressão areal contribuindo com peso 5 para o processo de infiltração na bacia em função de suas propriedades geomorfológicas ou padrões morfológicos que facilitam os processos de interação água-vertente, favorecendo os processos de infiltração e percolação.

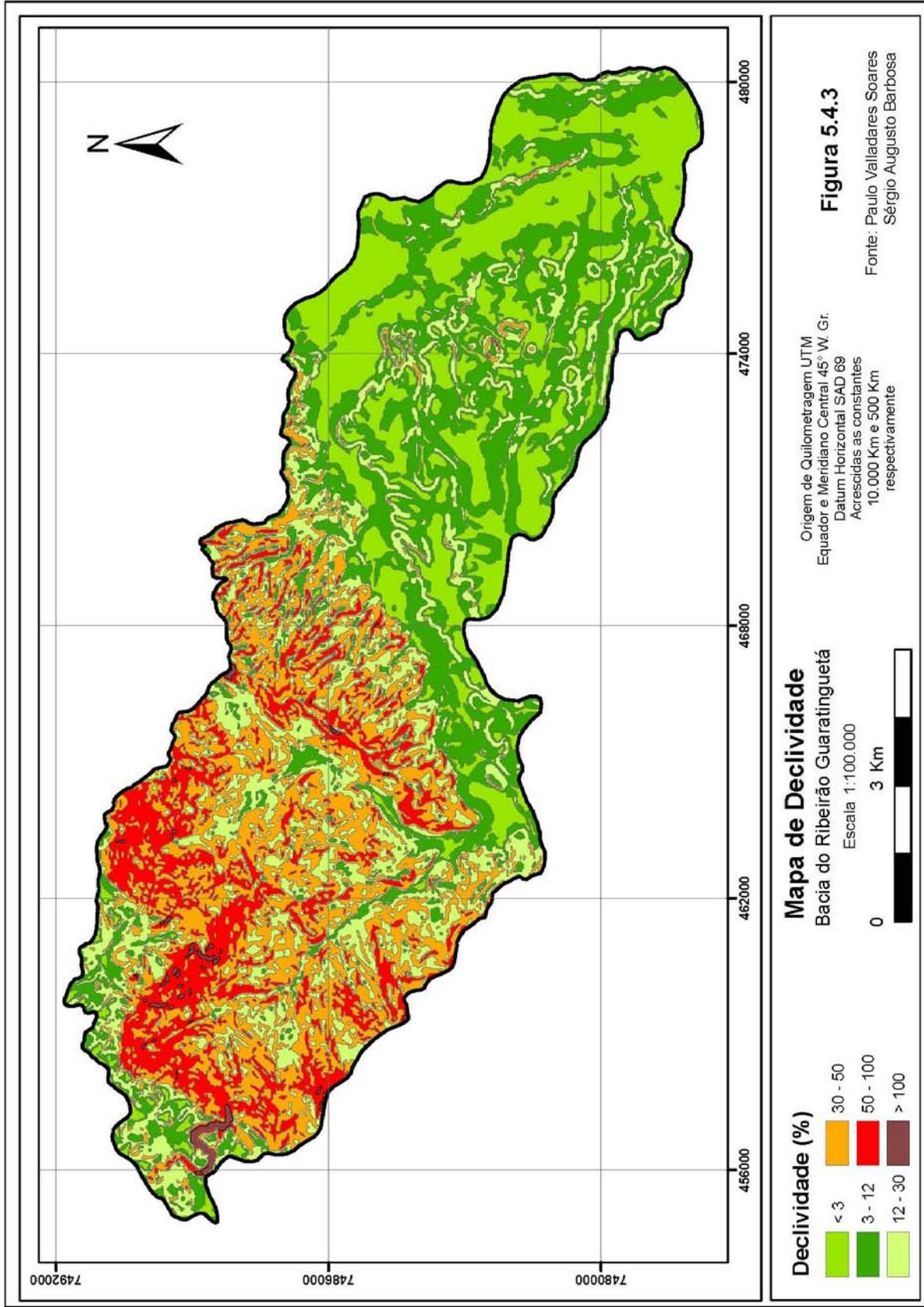
Esta região representa um relevo com suave desnivelamento altimétrico, constituindo de morrotes e colinas alongados, vertentes ravinadas com perfis convexos a retilíneos, topos aplainados ou arredondados e fundos de vale abertos e planos. Trata-se de um relevo que tem origem em rochas cristalinas de diversificada litologia retrabalhadas intensamente por paleoclimas.

Embora com uma expressão areal maior que o relevo colinoso, as escarpas contribuem com peso 2 para o processo de infiltração em função de apresentarem encostas bastante entalhadas, com perfis predominantemente retilíneos, vales profundos com drenagens encaixados, e paredões rochosos, topos estreitos e alongados e os vales fechados e abruptos, sendo freqüente a ocorrência de cabeceiras de drenagem superficial e com isto menor retenção de água na superfície do terreno e, portanto menores montantes disponíveis para a infiltração e percolação no abastecimento da água subterrânea.

5.4.3 Declividade

A declividade se refere ao espaçamento entre as curvas de nível de valores consecutivos ou entre curvas e pontos cotados em uma determinada superfície tomada perpendicularmente. Em ambiente GIS, a declividade pode ser calculada para cada triângulo de um TIN (Triangulated Irregular Network) ou para cada célula de um arquivo raster.

No caso deste trabalho, a declividade foi gerada a partir do DEM, pelo comando slope do Arc-GIS® cujo cálculo foi baseado em porcentagem. Os valores “default” gerados pelo software foram reclassificados nas seguintes faixas: 0-3%, 3-12%, 12-30%, 30-50%, 50-100% e > 100%. O mapa de declividade apresentado na Figura 5.4.3 mostra estas faixas e sua distribuição espacial.



Os valores das faixas de declividade foram estabelecidos considerando as formas de usos existentes na bacia conforme o procedimento efetuado na abordagem regional. Neste sentido, os valores limites de cada faixa de declividade têm um significado para as diversas formas de uso conforme a Tabela 5.11.

Pelo mapa de declividade se pode observar que os relevos com menores declividades (< 30%) correspondem aos terrenos colinosos situados na porção média inferior da bacia e aos terrenos amorreados correspondendo as unidades “Morros com Serras Restritas” e “Morrotes Baixos” situados no extremo oeste da bacia. As regiões com declividades entre 50 e 100% estão associadas quase que exclusivamente com a unidade de relevo “Escarpas Festonadas”. Os setores com declividades superiores a 100% são espacialmente pouco expressivos ocorrendo em pequenos trechos de encostas encontrados também na unidade “Escarpas Festonadas”.

Com base nas faixas de declividade e em face de suas características e aptidões foi feita uma classificação baseada na declividade das vertentes que foram reagrupadas em sete classes e atribuídos pesos para cada classe, segundo a capacidade de infiltração considerando as diferentes classes e aptidões de uso. É apresentada a distribuição em área (km²) e em percentagem das classes identificadas na bacia.

Tabela 5.11 – Declividade, peso de infiltração e área

FAIXA DECLIVIDADE	DESCRIÇÃO DECLIVIDADE	PESO INFILTRAÇÃO	ÁREA (km²)	ÁREA %
0 – 3	Planícies Inundacionais	1	27,58	16,87
0 – 3	Topos de Morros	5	6,04	3,70
3 – 12	Limites de Mecanização Agrícola (ref. De Biasi)	5	41,60	25,44
12 – 30	Limite Máximo Área Urbana (Lei LEHMAN – 6.766/79)	4	32,98	20,17
30 – 50	Limite Máximo – Ocupação Urbana p/ projetos Especiais (CDHU)	3	35,41	21,66
50 – 100	Limite Máximo Código Florestal	2	19,20	11,74
100 - 700	Área de Preservação Permanentes (APP) – Código Florestal	2	0,68	0,42
		TOTAL	163,49	100,00

A análise da Tabela 5.11 mostra que em mais de 66% da bacia (faixa de declividade de 3-50%) as condições de infiltração são de médias a boa (peso de infiltração de 3 a 5). Outro fator que merece destaque é que um quarto da área tem peso máximo de infiltração.

As classes de declividade de 50-100 e 100-700 fundamentaram sua definição no Código Florestal, Lei 4771/65 em seu artigo 2.º (alterado pela Lei n.º 7803/89) item e “*nas encostas ou parte destas com declividade superior a 45°, equivalente a 100% na linha de maior declive*”. Nestas situações a alta declividade privilegia os processos de escoamento superficial em detrimento da infiltração.

Na faixa de 12 a 50 – pesos de infiltração 4 e 3, as faixas de declividade são de média à intermediária, favorecendo os processos de infiltração em detrimento do escoamento superficial.

Considerando a dimensão espacial na escala de análise utilizada e a representação de todas as diferentes classes existentes na bacia é que identificamos duas faixas de declividades de 0 a 3% representando dois ambientes distintos: planícies inundacionais e topos de morros. Embora constituam a mesma faixa de declividade, os contextos frente ao processo de infiltração têm ponderações opostas. As planícies inundacionais são áreas com solos saturados, com ocorrência de terrenos alagadiços devido ao nível freático próximo à superfície, dificultando a drenagem e o escoamento das águas, área de deposição (agradiação), logo o peso de infiltração é o mais baixo (1). Em situação oposta, representando os relevos de topos de morros, embora estejam inseridos em uma região com encostas bastante íngremes e entalhadas, são largos de feições convexas/côncavas e alongados constituindo uma área plana em meio a um regime pluviométrico alto da ordem de 2000mm/ano associado ao nível freático profundo são condições que permitem uma maior interação água e o terreno favorecendo os processos de infiltração e percolação. Logo o peso de infiltração é o mais alto (5).

5.4.4 Densidade de Drenagem

O arranjo da rede de drenagem é o somatório de um conjunto de variáveis físicas como clima, relevo, solos, substrato rochoso e vegetação; e em grande parte função da relação infiltração/escoamento.

Solos relativamente arenosos, devido à textura grosseira favorecem a infiltração em detrimento do deflúvio, mostrando um padrão pouco denso. Solos relativamente argilosos

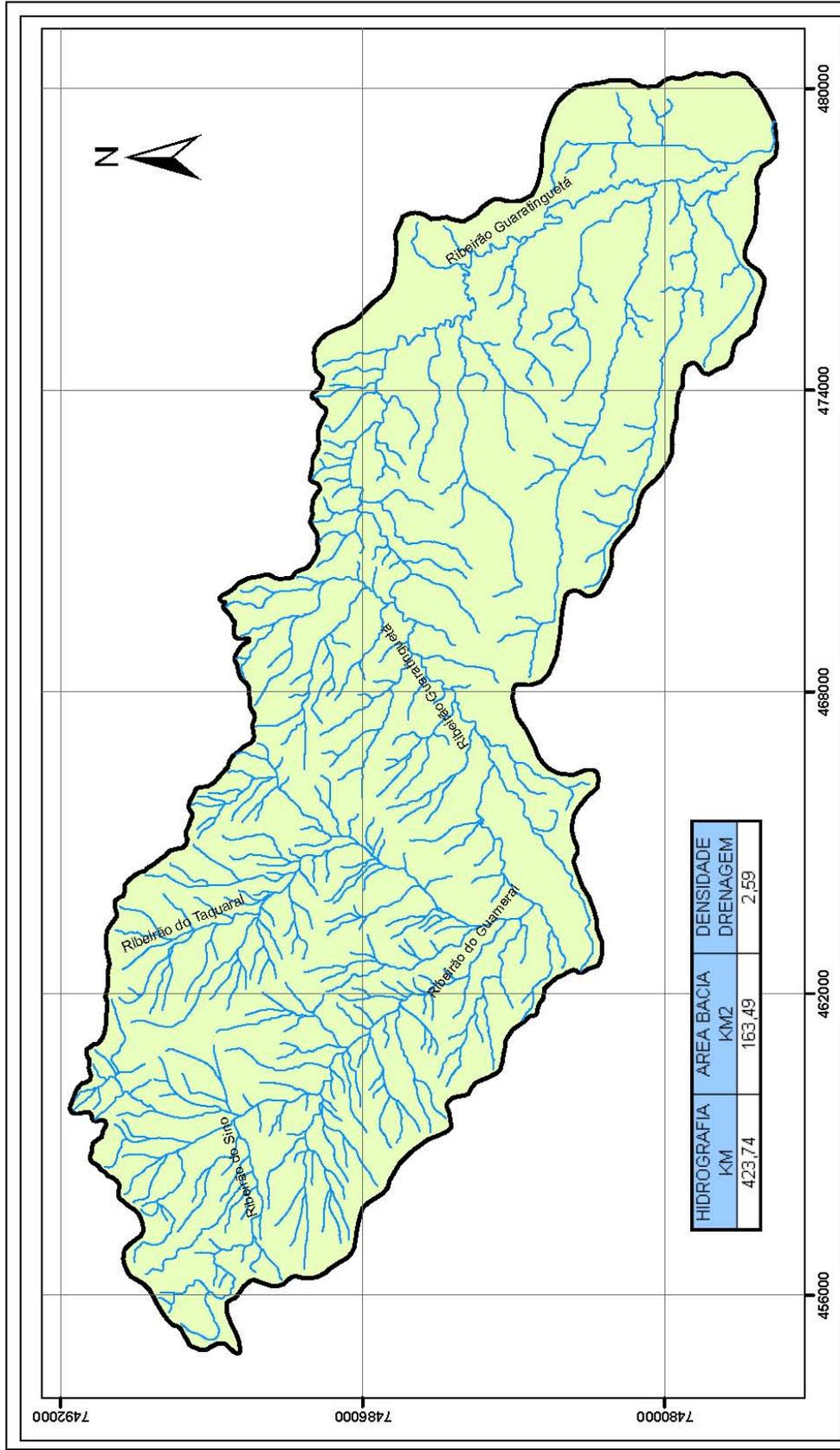
oferecem maior resistência à infiltração, favorecendo o deflúvio e criando um padrão de drenagem mais denso (Marchetti e Garcia, 1977).

O estudo da rede de drenagem como um indicador ambiental para o planejamento em bacias em diferentes escalas, precisa ainda ser explorado. Para isso, é necessário dispor de um mapa-base detalhado da rede hidrográfica, elaborado a partir de fotos aéreas em grandes escalas, preferencialmente não inferiores a 1:25.000 e onde estejam mapeados todos os cursos d'água, incluindo os de ordem zero e efêmeros. Como está se tratando de áreas de pequenas dimensões, é possível que a diferença na distribuição da drenagem sejam bastante sutis e, portanto, difíceis de serem interpretadas. No entanto, trabalhos sobre o comportamento da densidade de drenagem (Demattê e Demétrio, 1996; Rossi e Queiroz Neto, 1996; Meirelles e Botelho, 1997 e 1998) revelam que este pode ser um parâmetro eficiente na verificação e avaliação de distintos ambientes.

A densidade de drenagem foi gerada, enquanto Plano de Informação, no entanto, não foi considerada nos cruzamentos para definição de áreas homólogas, por dois motivos: escala de abordagem utilizada neste trabalho — esse tipo de informação pode ser melhor explorada e potencializada em levantamentos detalhados ($\leq 1:25.000$) —, e as características físicas como solo, substrato rochoso, clima, relevo e cobertura vegetal, também devem ser melhor detalhados e avaliados quanto a sua influência na estruturação e arranjo da rede de drenagem.

A densidade de drenagem estabelece a relação entre o somatório dos canais dividido pela área da bacia. A densidade de drenagem é um dos elementos mais importantes para a representação morfométrica de uma bacia hidrográfica sendo um dos critérios que permite avaliar a velocidade com que a água deixa a bacia. A extensão e a densidade de drenagem refletem controles topográficos, litológicos, pedológicos e de vegetação.

Na bacia do Guaratinguetá foi calculada a densidade de drenagem conforme se observa no mapa hidrográfico da bacia na Figura 5.4.4. O somatório do comprimento dos canais (423,74km) foi dividido pela área da bacia (163,49km²), o valor obtido foi de 2,59.



**Densidade de Drenagem
(Km/Km²)**

- Hidrografia
- Bacia Ribeirão Guaratingueta

Mapa de Densidade de Drenagem

Bacia do Ribeirão Guaratingueta

Escala 1:100.000
0 3 Km

Origem de Quilometragem UTM
Equador e Meridiano Central 45° W. Gr.
Datum Horizontal SAD 69
Acréscidas as constantes
10.000 Km e 500 Km
respectivamente

Figura 5.4.4

Fonte: Paulo Valladares Soares
Sérgio Augusto Barbosa

Entretanto, este valor “médio” total não representa a diversidade das sub-bacias que compõe a bacia como um todo. Conforme se vê na Figura 5.4.4, os ribeirões formadores do Guaratinguetá como os ribeirões do Sino, Taquaral e o Guameral situam-se no contexto de rochas cristalinas (porção oeste) e sua densidade de drenagem difere substancialmente daquela relacionada ao ribeirão Guaratinguetá (porção leste) que teve todo o seu traçado esculpido no ambiente de rochas sedimentares.

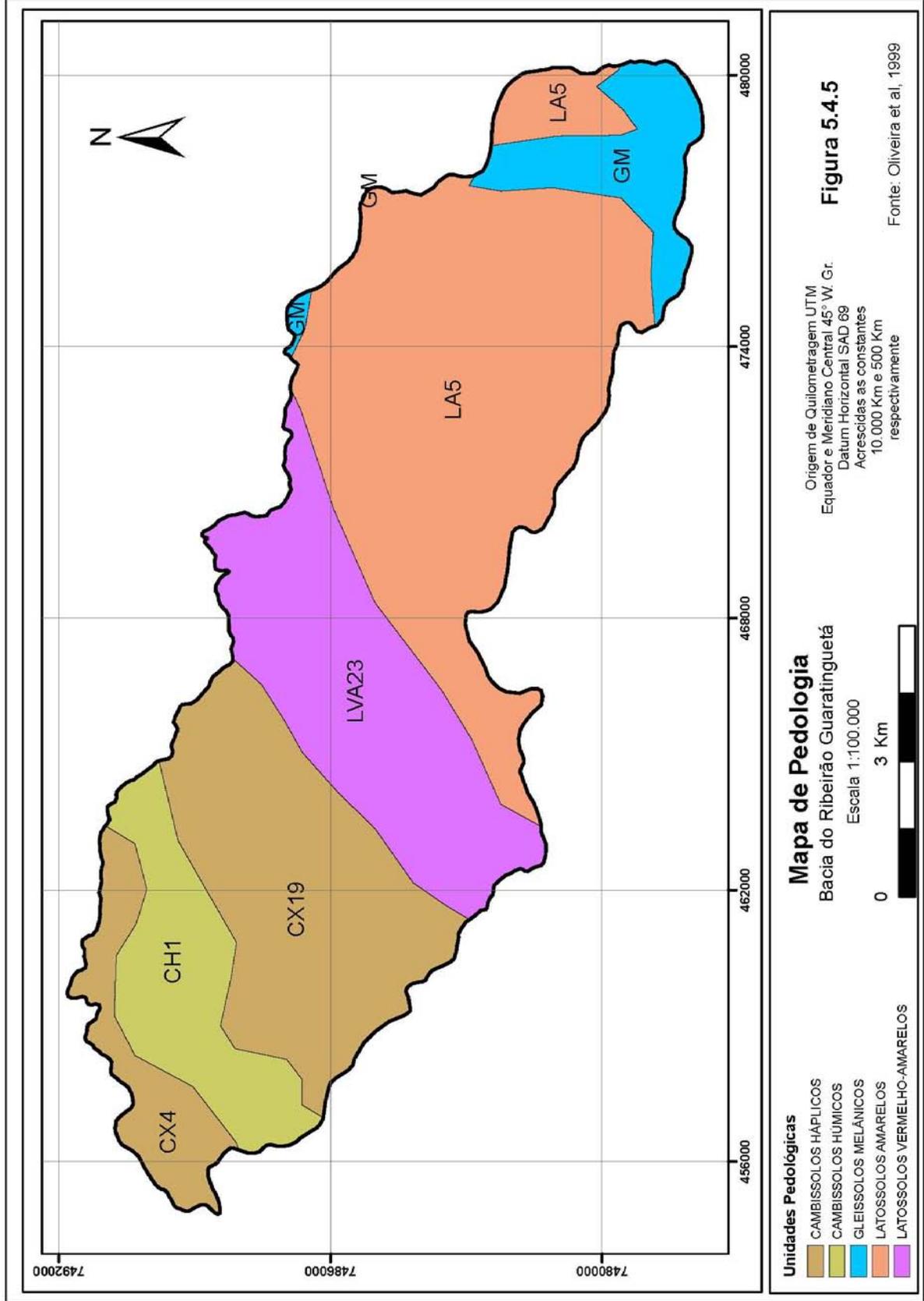
Vazão média das drenagens, pH, qualidade da água, granulometria dos sedimentos transportados são algumas das medidas hidrológicas exigidas em pesquisas de campo, coleta de amostras e análises laboratoriais específicas, e, devem estar ajustadas às finalidades da análise e as características de uso e ocupação da área. Por exemplo: agricultura-uso de agrotóxico, industriais-resíduos sólidos e urbanos-esgotos, podendo assumir papel fundamental no planejamento dos recursos hídricos. O geo-referenciamento das nascentes de primeira e segunda ordem e sua variação ou não ao longo do perfil da vertente nos períodos chuvosos e secos, pode ser considerado um geoindicador que reflete a variação do nível freático, de acordo com as considerações estabelecidas no item 2.6.7.

5.4.5 Pedologia

As características geológicas, a diversidade do relevo, as elevadas taxas de pluviosidade são alguns dos principais fatores que influenciaram nas características dos solos encontrados na região.

A representação cartográfica dos solos para fins de gestão e monitoramento de bacias hidrográficas é um importante documento na orientação e no planejamento das atividades agro-silvo-pastoris de uma bacia, pois representa as diversificadas classes pedológicas e seu grau de evolução, possibilitando relacionar a evolução pedogenética ao modelo do terreno, além de outras características, que também fundamentam informações importantes, quanto ao grau de fragilidade potencial.

Neste trabalho a abordagem pedológica tem como base o levantamento de Oliveira *et al.*, (1999). No Mapa Pedológico produzido (Figura 5.4.5) são representadas cinco unidades pedológicas as quais são descritas a seguir:



- Latossolos Amarelos e Latossolos Vermelho-Amarelo (LA, LVA) – Representam duas unidades pedológicas que foram agrupadas devido as suas semelhanças. Estes solos mostram um horizonte B homogêneo e possuem boa drenagem interna mesmo aqueles mais argilosos. Na maioria dos casos, os latossolos estão associados aos relevos mais suaves como os relevos colinosos. Isto é o que ocorre na bacia do Guaratinguetá, onde os Latossolos Amarelos (LA) ocupam os terrenos colinosos com declividades médias inferiores a 30%. A sub-ordem Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA) ocupa uma faixa expressiva no meio da bacia associada a um relevo mais íngreme com setores de vertentes possuindo declividades que podem alcançar 50%. De modo geral, são solos profundos, ácidos a fortemente ácidos, bastante porosos e permeáveis.
- Cambissolos (CX, CH) – Representam duas unidades pedológicas que foram agrupadas devido as suas semelhanças. Estes solos são caracterizados por possuírem o horizonte B pouco desenvolvido e normalmente estão relacionados aos relevos mais íngremes do embasamento cristalino. Na área da bacia ocorrem duas sub-ordens: cambissolos háplicos (CX) e cambissolos húmicos (CH). Possuem um horizonte mais arenoso e um horizonte subsuperficial mais argiloso; apresentam certas suscetibilidades a processos erosivos.
- Gleissolos Melânicos (GM) – Estes solos estão relacionados às planícies aluvionares dos principais cursos de água da bacia. Estes solos possuem teores de argila em torno de 50% por todo o perfil superficial (até profundidades em torno de 1,50 metros). Os gleissolos são solos mal drenados apresentando sérias limitações impostas pela presença do lençol freático a pouca profundidade. Estes solos são normalmente ácidos requerendo a aplicação de corretivos para a sua aplicação.

Com base nos tipos pedológicos e em face de suas características foi feita uma classificação em que os solos foram reagrupados em cinco classes e atribuídos pesos para cada classe, segundo a capacidade de infiltração considerando as suas diferenças. É apresentada a distribuição em área (km²) e em percentagem das classes pedológicas identificadas na bacia

Tabela 5.12 – Pedologia, peso de infiltração e área

DESCRIÇÃO	PESO INFILTRAÇÃO	ÁREA (km²)	ÁREA %
Cambissolos Háplicos	2	42,40	25,93
Cambissolos Húmicos	3	16,01	9,80
Gleissolos Melânicos	1	10,64	6,50
Latossolos Amarelos	5	63,40	38,78
Latossolos Vermelho-Amarelos	5	31,04	18,99
TOTAL		163,49	100,00

A análise da Tabela 5.12 mostra que a maioria (> 50%) dos solos da bacia (latossolos amarelos e latossolos vermelho-amarelos) tem peso de infiltração máximo (5).

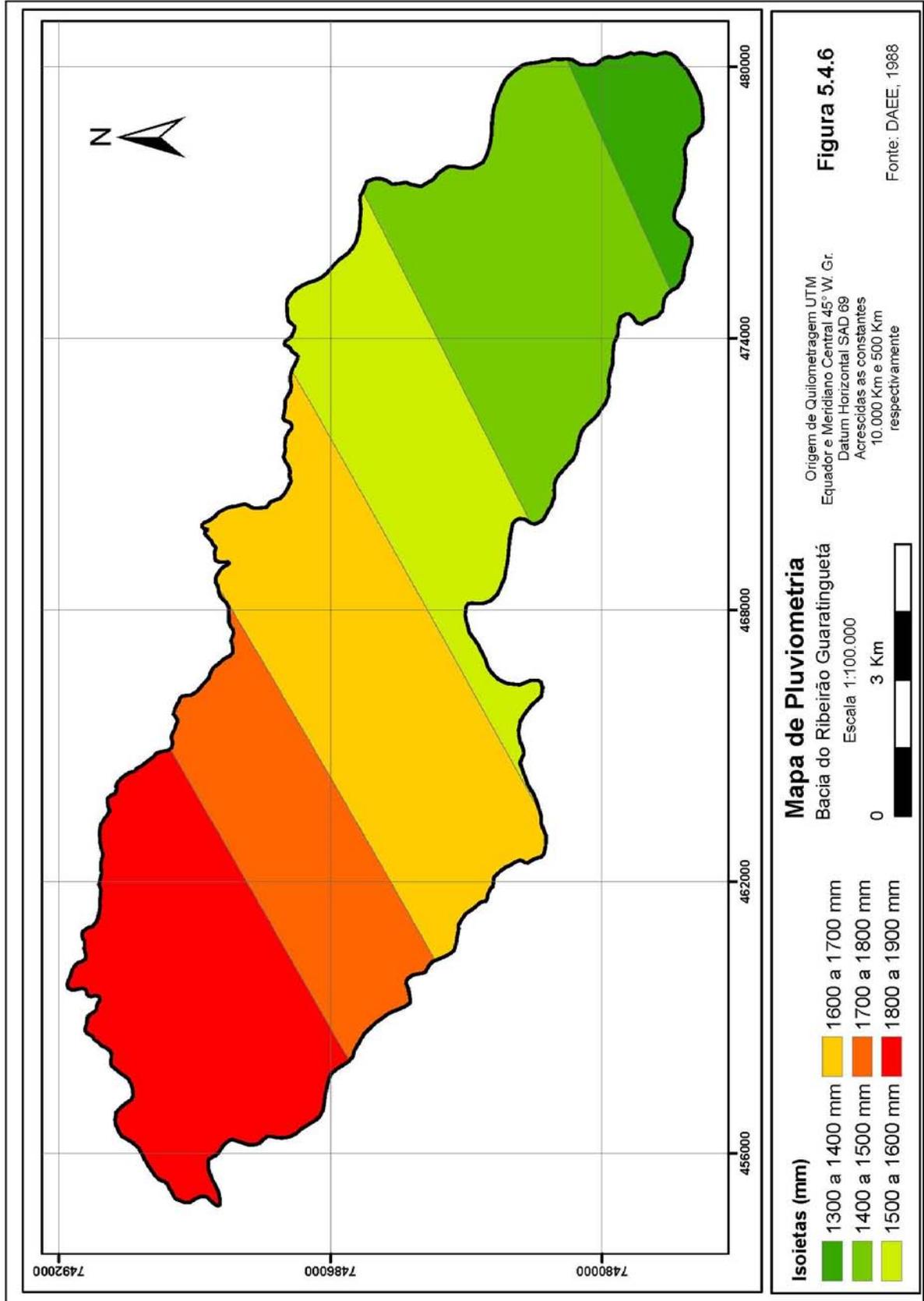
5.4.6 Pluviometria

Os dados quantitativos de pluviosidade média anual foram obtidos no Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE, 1988 e CPTI, 2000. Dos dois postos pluviométricos em Guaratinguetá, que apresentam séries históricas de até 30 anos (1962/1991), apenas um encontra-se na área da bacia; no entanto, sua localização é próxima ao exutório, na área de várzea do rio Paraíba do Sul.

Em função do seu tamanho relativamente pequeno, a bacia do ribeirão Guaratinguetá, apresenta uma pluviosidade internamente bem distribuída (Figura 5.4.6). Apesar disto, foi possível identificar variações climáticas devido as diferenças altimétricas que ocorreram entre o alto e o baixo curso do ribeirão Guaratinguetá, a forma e o comprimento da bacia.

Nesta região, o paredão abrupto voltado para S/SE, festonado por vales e esporões, provoca significativas conseqüências no que diz respeito à distribuição da pluviosidade. Na região são comuns as “trombas d’água” podendo chegar a precipitações de até 80mm em uma hora.

Ainda como conseqüência do relevo acidentado, os dois ribeirões principais (Taquaral e Grameral) apresentam escoamentos muito energéticos devido ao desnível entre suas áreas de nascentes (Planato Mantiqueira) e a planície aluvionar do rio Paraíba do Sul.



Com base nas faixas de pluviosidade média anual identificadas na bacia e em função da quantidade de chuva, foram estabelecidas seis faixas e atribuídos pesos para cada classe, segundo a qual às maiores precipitações, acima da média da região — 1.600mm, corresponderam pesos de infiltração maiores, pois teriam maiores quantidades de água disponível para infiltração.

Optou-se pela pluviosidade média anual, em função da escala de trabalho (1:50.000), assumindo uma distribuição uniforme da precipitação ao longo do ano. Na tabela 5.13 é apresentada a distribuição em área (km²) e em percentagem das faixas de precipitação identificadas na bacia.

Tabela 5.13 – Pluviosidade, peso de infiltração e área

<i>PRECIPITAÇÃO</i>	<i>PESO INFILTRAÇÃO</i>	<i>ÁREA (km²)</i>	<i>ÁREA %</i>
1300 a 1400 mm	1	7,90	4,83
1400 a 1500 mm	2	34,12	20,87
1500 a 1600 mm	3	26,12	15,98
1600 a 1700 mm	4	38,55	23,58
1700 a 1800 mm	4	23,00	14,07
1800 a 1900 mm	4	33,80	20,67
	TOTAL	163,49	100,00

A análise da Tabela 5.13 mostra valores crescentes de precipitação em direção a Serra da Mantiqueira, confirmando que o relevo tanto pela sua altitude, mas principalmente pela sua disposição em relação à direção predominante dos sistemas atmosféricos provenientes do quadrante sul, assume um importante papel na gênese pluvial, acentuadamente nas chuvas orográficas.

5.4.7 Uso do Solo

No processo de ocupação da bacia do ribeirão Guaratinguetá, assim como na maior parte da bacia do rio Paraíba do Sul, as florestas naturais, que originalmente cobriam toda a região, foram sendo substituídas pelas lavouras de cana inicialmente (no período colonial) e de café, no século XIX. A falta de critérios adequados de conservação de solo e de mananciais, caracterizada

pelo desmatamento indiscriminado e pelos plantios em linha de maior declive da encosta, levaram à decadência da cafeicultura, com um saldo negativo de grandes extensões de terras degradadas pela erosão, perda da biodiversidade, poluição e assoreamento dos cursos d'água e redução na quantidade e disponibilidade de mananciais hídricos.

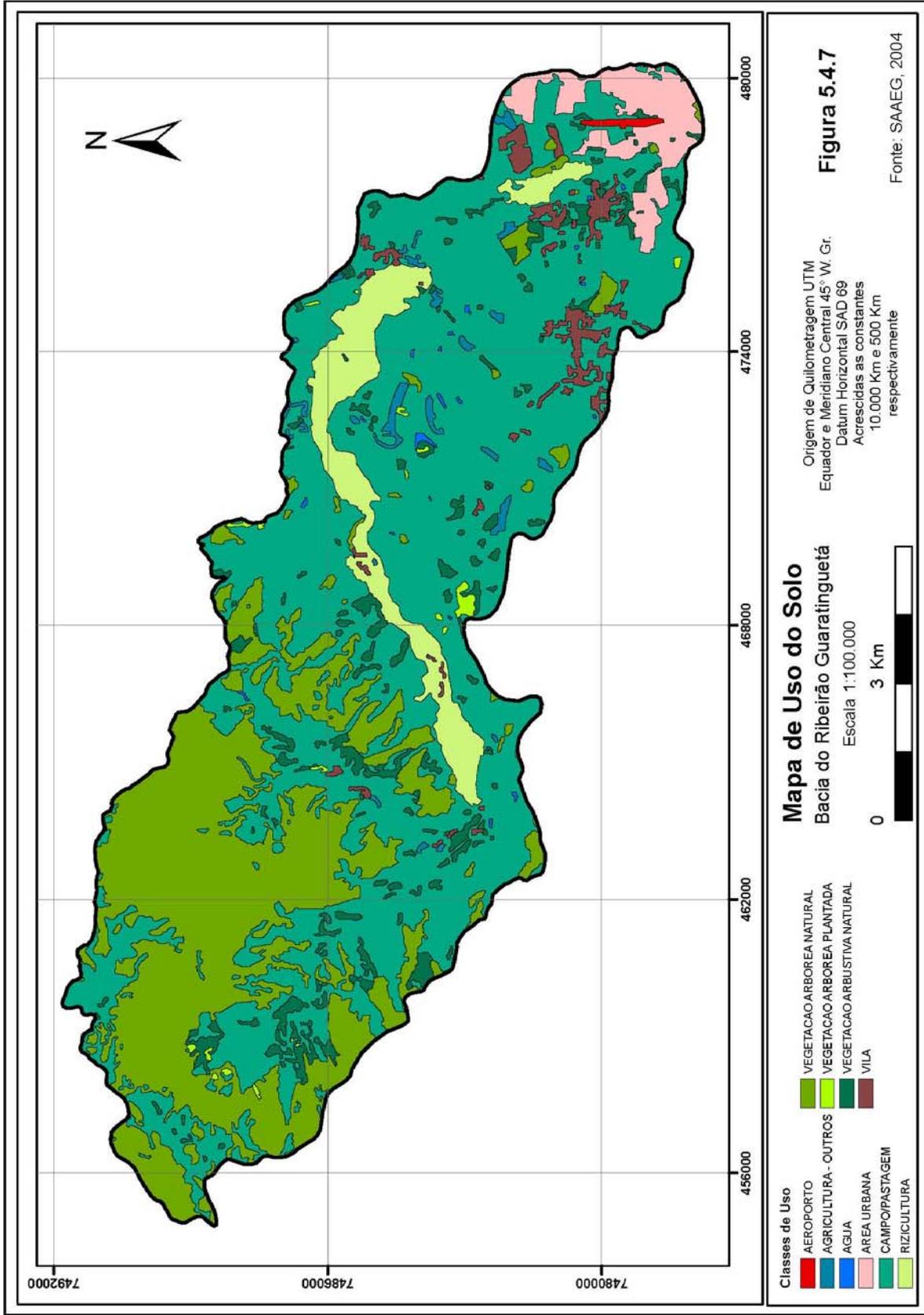
Após a decadência da cafeicultura, as terras foram sendo ocupadas pelas pastagens extensivas em maior parte e por lavouras agrícolas de subsistência, praticadas com uso freqüente de queimadas e ausência de técnicas de conservação de solo, resultando no empobrecimento contínuo do solo, aumento dos processos erosivos e conseqüentemente o assoreamento das drenagens.

O mapa de uso do solo da bacia do Guaratinguetá, apresentado na Figura 5.4.7, foi obtido a partir de um esforço conjunto de técnicos da SAAEG (Superintendência de Água e Esgoto de Guaratinguetá). O mapa foi gerado a partir de técnicas de sensoriamento remoto e interpretação de fotografias aéreas digitalizadas.

O mapeamento de uso do solo designa qualquer forma de ocupação, tanto pela cobertura vegetal, quanto pelas diversas atividades humanas como áreas urbanas, atividades agropecuárias e extrativistas.

A partir da escala utilizada para a interpretação (1:25.000) foram definidos 10 “tipos” de uso do solo ou “classes” de uso do solo, a saber:

1. Aeroporto
2. Agricultura
3. Água
4. Área urbana
5. Campo de pastagem
6. Rizicultura
7. Vegetação arbórea natural
8. Vegetação arbórea plantada
9. Vegetação arbustiva natural
10. Vila



Analisando-se o mapa de uso do solo se pode constatar uma paisagem com elevado grau de fragmentação onde os campos de pastagem representam a matriz com cerca de 56% do total da área. De certa forma as áreas de pastos indicam o elevado grau de degradação da paisagem no interior da bacia. Como era de se esperar, as áreas de pastos são mais expressivas na região mais colinosa (porção leste da bacia) onde a ocupação humana foi mais intensa. Uma parte expressiva destas áreas de pastos está comprometida com alimentação para a criação de gado leiteiro da região.

Além da pastagem, se destacam, em termos percentuais, os seguintes usos do solo: áreas de mata nativa (26,92%), agricultura (0,91%), rizicultura (5,56%), área urbana (3,22%).

A rizicultura se constitui em uma atividade histórica não apenas na bacia como em todo o Médio Vale do Paraíba do Sul. Tradicionalmente a irrigação nas áreas de arroz de várzea tem sido executada pelo método de inundação permanente na qual a água utilizada para a irrigação é captada, principalmente de rios e córregos, sendo tal processo feito por gravidade na maioria das propriedades.

Além de sua importância rural, a bacia do ribeirão Guaratinguetá desempenha uma importante função para a cidade do ponto de vista urbano. No território sob o domínio do ribeirão Guaratinguetá cerca de 3% dos 165 km² estão sendo comprometidos com a ocupação urbana mais consolidada. Esta mancha urbana ocupa as várzeas da margem esquerda do rio Paraíba do Sul e do próprio ribeirão Guaratinguetá. Sua formação teve como estruturação estes dois cursos de água além das estradas municipais que permitem a ligação do centro de Guaratinguetá com a colônia do Piaguí e com o bairro dos Lemes ambos externos ao perímetro da sub-bacia.

Desta forma, a área urbana mais consolidada da bacia trata-se da ampliação dos bairros mais próximos ao centro do município entre os quais se pode destacar: Pedregulho, Santa Edwirges, Bela Vista e Aeronáutica.

Com base no mapa de uso do solo foram (estruturados os qualificadores e) atribuídos pesos para cada unidade que representa o mosaico das classes de uso presentes na bacia, segundo a capacidade de infiltração, considerada as características específicas de cada classe. É apresentada a distribuição em área (Km²) e em percentagem dos usos identificados na bacia

Tabela 5.14 – Uso do Solo, peso de infiltração e área

<i>CLASSE DE USO</i>	<i>PESO DE INFILTRAÇÃO</i>	<i>ÁREA (km²)</i>	<i>ÁREA %</i>
Aeroporto	1	0,27	0,16
Agricultura – Outros	3	1,48	0,91
Água	1	0,26	0,15
Área Urbana	1	5,26	3,22
Campo/Pastagem	2	91,80	56,15
Rizicultura	1	9,08	5,56
Vegetação Arbórea Natural	5	44,01	26,92
Vegetação Arbórea Plantada	4	0,61	0,37
Vegetação Arbustiva Natural	3	7,39	4,52
Vila	1	3,33	2,04
TOTAL		163,49	100,00

A distribuição espacial dos usos apresentadas na Tabela 5.14 reflete e confirma que o padrão de uso do solo é o produto da ação do sistema sócio-econômico sobre o sistema natural.

A ocupação da microbacia do ribeirão Guaratinguetá é influenciada pelas características geomorfológicas, predominando nas áreas mais planas as atividades agropastoris intensivas e mecanizadas (rizicultura e pecuária leiteira) nas planícies aluviais com um baixo índice de cobertura vegetal (nascente e mata ciliar). Os usos rizicultura e agricultura/outros totalizam mais de 6%.

A medida que aumenta a declividade e as rupturas no relevo, aumentam as áreas com atividades agrícolas extensivas e com solo exposto, pastagem subutilizada e degradada e uma atividade subcultural com baixo conteúdo tecnológico. O uso campo/pastagem totaliza mais de 56%.

A urbanização é condicionada por alguns critérios geomorfológicos, mas também por fatores ligados a interesses econômicos, ausência de planejamento territorial urbano (plano diretor), decisões políticas e ao seu próprio condicionante histórico.

A ocupação das áreas de preservação permanente, deve-se, basicamente à expansão do cultivo de pastagens e lavouras e a do perímetro urbano. O uso vila/área urbana representa mais de 5%.

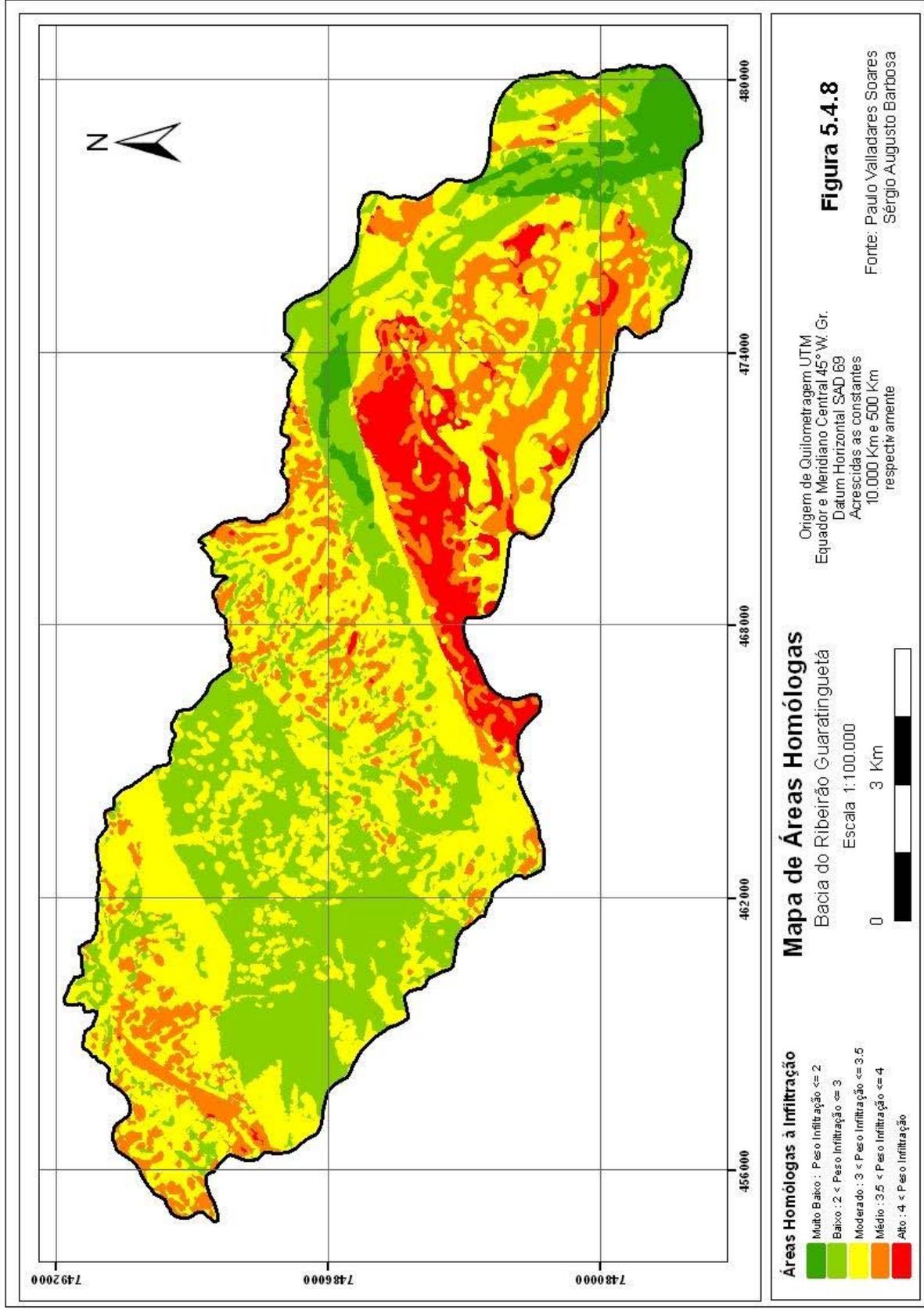
Quantitativamente e qualitativamente a vegetação interfere no ciclo hidrológico, conforme seu grau de proteção ao solo, quantidade de serrapilheira (manta orgânica) e sua composição química. A maneira como é feita a interceptação altera o tempo de residência da água no sistema, diminuindo o escoamento superficial e a quantidade de energia solar que limita a evapotranspiração. Isso significa regularização de vazão e alteração da quantidade de chuva – duração, frequência e intensidade.

As áreas com vegetação arbórea natural representam aproximadamente 27% da área total da bacia hidrográfica. Este percentual parece ser elevado; no entanto, considerando-se as características topográficas/geomorfológicas da área, percebe-se que este percentual decorre, basicamente, do fato de serem essas áreas declivosas e de difícil acesso, o que dificulta a ocupação do espaço. Com o crescimento demográfico de Guaratinguetá e conseqüente incremento dos vetores de expressão urbana, a tendência é que a cidade cresça sobre as áreas mais planas da bacia, aumentando os problemas ambientais, não só nos locais de ocupação, mas em toda a bacia hidrográfica, visto que 80% da água que abastece o município, hoje, provém única e exclusivamente do ribeirão Guaratinguetá. A tendência é que o nível de comprometimento aumente, nos próximos três anos para 92% (SAAEG, informação verbal).

5.4.8. Unidades Homólogas

O mapa das áreas homólogas, apresentado da Figura 5.4.8, foi obtido pela integração dos elementos da paisagem com suas respectivas classes e ponderações na escala de 1:250.000 conforme descritas no item 5.2.8.1. O mapa representa as características de infiltração da bacia do ribeirão Guaratinguetá com a escala reduzida de 1:250.000 para 1:100.000, com o intuito de analisar, embora com limitações, a disposição espacial das áreas homólogas à infiltração, em escala de bacia de afluente.

As áreas potencialmente mais favoráveis à infiltração (em vermelho) localizam-se no extremo noroeste da bacia e na sua porção central ocupando uma faixa de direção NE-SW.



A faixa no extremo noroeste corresponde ao Planalto Mantiqueira e regiões locais de escarpas. As condições de baixas declividades — contrastando com as elevadíssimas declividades das encostas nas proximidades — e a presença de vegetação arbórea natural estabelecem as condições necessárias para uma boa infiltração nesta região.

O fato da porção central ser também, favorável a infiltração possui razões mais complexas. Esta região de boas condições de infiltração ocupa uma zona de contato entre o Terciário e o Pré-cambriano. Pelo mapa da rede de drenagem, Figura 5.4.4, pode-se observar que existe um número pouco significativo de nascentes nesta região que podem estar relacionadas com as boas características de infiltração obtidas no processo de integração dos elementos da paisagem. Um fato interessante é que no ambiente geológico de rochas terciárias, as nascentes encontram-se em uma região de relevos colinosos que poderiam, a princípio, serem mais favoráveis à infiltração do que os terrenos de várzea que predominam nesta região.

Outro aspecto que pode ser ressaltado nessa área é a maior facilidade da infiltração da água no material retrabalhado do cristalino proporcionando uma gênese de solos caracterizada por intenso processo de perda (lixiviação), associada à composição da matriz (pobre em ferro e bases) e acúmulo diferencial de minerais ricos em alumínio com baixa relação Si/Al, resultando em solos profundos e de baixíssima fertilidade. Por conta da baixa fertilidade esses solos são ocupados por culturas de subsistência (mandioca) e pastagens pouco produtivas. Até alguns anos esses solos também eram ocupados por eucalipto, num período em que essa cultura era relegada às piores terras. Apesar disso, são solos com potencial de uso bastante elevado, desde que melhorada sua fertilidade, dado que o relevo permite a mecanização da agricultura. Tratam-se de solos profundos, com nível freático distante da superfície. Este fato, aliado à composição química ao longo do perfil, com um balanço de cargas negativas na porção superior do solo, decorrente principalmente da matéria orgânica e o aparecimento de cargas positivas em profundidade, devido a predominância de argilas de estrutura 1:1 e oxídicas, características de solos tropicais, conferem uma extraordinária capacidade de reter moléculas de qualquer natureza em seu perfil, minimizando o riscos de contaminação das águas profundas, o que permite concluir trata-se de solos bastante seguros quanto à sua utilização, do ponto de vista da qualidade ambiental das águas interiores da bacia.⁵

⁵ Marcos Martinelli, 2005 [informação verbal]

Entretanto, são necessários estudos mais detalhados para avaliar o real potencial de infiltração desta porção da bacia.

No tocante as áreas de menores condições de infiltração (verde claro e escuro), estas se encontram na região próxima ao exutório da bacia e em uma pequena porção no limite noroeste da bacia. A região do exutório corresponde a uma área intensamente modificada e parcialmente urbanizada. A porção noroeste está relacionada aos sedimentos aluvionares associados ao ribeirão Guaratinguetá que podem ser bem caracterizados no Mapa Geomorfológico da Bacia (Figura 5.4.2).

As duas regiões que apresentaram uma capacidade de infiltração moderada (amarelo e marrom) encontram-se em dois contextos geológicos diferentes (Figura 5.4.1.) No Pré-cambriano (porção a oeste), esta região representa os anfiteatros dos ribeirões Guameral e Taquaral formadores do ribeirão Guaratinguetá. Esta região apresenta uma geomorfologia onde predominam as escarpas festonadas. O outro compartimento (porção a leste) esta inserida no Terciário, que forma a bacia aluvionar do rio Paraíba do Sul.

A Tabela 5.15 apresenta o comportamento da área, da bacia do ribeirão Guaratinguetá, segundo sua capacidade de infiltração tornando possível a visualização em um mapa temático dos qualificadores para cada um dos intervalos. Destaca-se que 77% da área da bacia apresenta condições de infiltração de moderada a muito baixa. As áreas de médio a alta condição de infiltração correspondem a 23% e devem ser objeto de ações preferenciais de gestão e manejo dos recursos naturais visando manter a “saúde hídrica” da bacia.

Tabela 5.15 - Áreas Homólogas, peso de infiltração e área

<i>INTERVALOS</i>	<i>QUALIFICADORES</i>	<i>ÁREA (km²)</i>	<i>ÁREA %</i>
Peso Infiltração $\leq 2,00$	Muito Baixo	6,45	3,88
2,00 < Peso Infiltração $\leq 3,00$	Baixo	53,81	32,96
3,00 < Peso Infiltração $\leq 3,50$	Moderado	65,34	40,02
3,50 < Peso Infiltração $\leq 4,00$	Médio	25,95	15,86
4,00 < Peso Infiltração	Alto	11,94	7,28
TOTAL ÁREA		163,49	100,00

CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O presente trabalho se insere em uma proposta de avaliação e definição de áreas com comportamento hidrológico semelhante ao processo de infiltração (áreas homólogas), em duas escalas de abordagem: regional e bacia representativa.

É apresentado de maneira que as interações entre a precipitação e os diferentes elementos da paisagem podem ser estabelecidas, entendidas e representadas. Sendo assim é uma ferramenta fundamental na avaliação da disponibilidade hídrica em bacia hidrográfica.

A disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas é função de duas variáveis: quantidade e qualidade de água. Sendo assim, a gestão e o planejamento quali e quantitativo da água é fundamental para garantir, a manutenção e a disponibilidade adequadas para os múltiplos usos previstos dos corpos d'água numa bacia em processo de ocupação, ou já ocupada. Reconhece-se que todos os usos antrópicos a água levam a algum tipo de efeito residual em quantidade e qualidade. Usuários de jusante serão sempre submetidos aos efeitos provocados pelos usuários de montante.

Desta forma, a água não é apenas um recurso, mas parte essencial de um geossistema que considera os compartimentos, os fluxos e as interações entre a entrada de água (precipitação) os elementos do meio físico e a saída (vazão) em uma bacia hidrográfica.

O uso e ocupação do solo é o fator que mais interfere na capacidade de infiltração em uma bacia hidrográfica. A capacidade de uso das terras (que indica a vocação) e o uso e ocupação (que indica a utilização dada às terras) apresentam uma relação que pode ser expressa da seguinte forma: quanto mais o uso tender ou se aproximar da capacidade de uso, maior esta situação favorecerá os processos de escoamento subsuperficial e a percolação, com diminuição do escoamento superficial e manutenção da capacidade de infiltração; no entanto, se a tendência for de incompatibilização de usos, o escoamento predominante será o superficial e apresentará a diminuição da capacidade de infiltração.

Este estudo interdisciplinar é pouco explorado na bibliografia e parte da identificação de compartimentos morfodinâmicos de elementos do meio físico de diferentes naturezas e/ou

dinâmica superficial, constituição e forma passíveis de serem caracterizados por desenvolver respostas diferenciadas ao processo de infiltração.

Em função das peculiaridades de cada um dos elementos do meio físico considerado no estudo, foram atribuídos valores que subsidiaram as análises qualitativas de geologia, padrões de relevo, do solo, declividade, uso e ocupação do solo, elaborados com número que distinguiram as variações / comportamento para cada elemento e suas classes.

O uso do sistema de informações georeferenciadas possibilitou de forma rápida, a obtenção de dados precisos apresentando os resultados na forma gráfica (mapas).

Em escala regional, os resultados apontaram que as melhores áreas de infiltração situam-se na região da Bocaina, nos contrafortes da Serra do Mar, na região entre Cunha e Lagoinha e em parte dos terrenos colinosos relacionados a Bacia Sedimentar de Taubaté. Estas são potencialmente as áreas de recarga da região de estudo.

Na região da Bocaina, os dados confirmam e indicam que esta região exerce um importante papel como reservatório de água no solo, estocagem esta proporcionada pela presença da cobertura florestal. Estes recursos hídricos abastecem, tanto a rede de drenagem voltada para o litoral da Baía da Ilha Grande, como o alto vale do rio Paraitinga e outros pequenos afluentes e tributários do médio vale do rio Paraíba do Sul. Devido em grande parte pela intensa precipitação na estação chuvosa (verão), gerando os maiores excedentes hídricos que são decorrentes do impacto causado pela entrada de frentes frias (sistemas frontais) durante o período mais quente, somado ao efeito orográfico das chuvas, gerados pelo relevo montanhoso.

Deve-se atentar para a definição e o pertencimento dos elementos da paisagem e seus atributos na identificação de áreas homólogas. Com isto apresentamos os seguintes elementos da paisagem em escala regional: feições estruturais (fraturas e lineamentos), pedologia, declividade e uso e ocupação do solo. Na escala de bacia representativa deve-se utilizar também a rede de drenagem, principalmente as de 1.^a e 2.^a ordem.

Alguns geoindicadores e índices de sustentabilidade são apresentados:

- Variação na posição da nascente ao longo do perfil de relevo (espaço) e identificação do nível de intermitência (tempo).
- Dinâmica do uso e ocupação do solo e vazão mínima (ecológica).

Como primeira aproximação, a definição de um conjunto de geoindicadores relacionados às vazões mínimas, ao rebaixamento do nível do aquífero, a dinâmica do uso da terra e ao grau de

evolução dos processos erosivos, permitiu avaliar como esta definição poderia ser aplicada e utilizada por tomadores de decisão e órgãos gestores de recursos hídricos.

Os mesmos elementos do meio físico da escala regional e as ponderações foram aplicados, no ribeirão Guaratinguetá, com objetivo de compatibilizar e avaliar a disposição espacial das áreas homólogas à infiltração, para uma bacia representativa.

Desta forma, os procedimentos metodológicos para identificação de áreas mais favoráveis ao processo de infiltração, em escala regional e de bacias representativas, estão coerentes tanto em uma escala como em outra, indicando uma boa correspondência e representação.

Na região do ribeirão Guaratinguetá, as áreas com valores de médio a alto peso de infiltração e que constituem as áreas homólogas estão localizadas na transição entre a área sedimentar e a área de pré-cambriano, em regiões de colinas pequenas.

Nas áreas homólogas, do ribeirão Guaratinguetá, a maior facilidade de infiltração da água deve-se ao retrabalhamento do material do cristalino proporcionando uma gênese de solo caracterizada por intenso processo de lixiviação, associado à composição da matriz (pobre em ferro e bases) e acúmulo diferencial de minerais ricos em alumínio com baixa relação Si/Al, resultando em solos profundos, de baixíssima fertilidade, com nível freático distante da superfície e baixa densidade de drenagem.

Os mesmos níveis de informação foram aplicados no ribeirão Guaratinguetá com o intuito de analisar, ainda que com limitações, a disposição espacial das áreas homólogas à infiltração em uma bacia de afluente. Entretanto, um trabalho em escala de detalhe, compatível com a dimensão desta bacia de afluente, necessita ser realizado considerando-se o que normalmente ocorre em diversas áreas das geociências: uma relativa simplicidade nas escalas menores e uma maior complexidade dos processos em escalas maiores.

Este trabalho utiliza a abordagem de elementos da paisagem, precipitações e sua interconectividade para a definição de áreas com maior capacidade de infiltração, transmissão e armazenamento d'água (áreas homólogas). Recomenda-se uma utilização mais restrita destas áreas em função da importância delas, para a dinâmica geohidrológica da bacia.

Isto é particularmente verdadeiro na bacia do ribeirão Guaratinguetá a qual possui grande diversidade do meio físico, e também grande fragmentação do uso da terra tratando-se de uma região que evolui de um misto de “paisagem natural e cultivada” para uma “paisagem de franjas urbanas”.

Com base na análise dos elementos da paisagem, este trabalho procurou ainda apontar geoindicadores que possam ser utilizados para avaliar a sustentabilidade hídrica da bacia na inter-relação águas superficiais – águas subterrâneas. São eles: vazões mínimas, rebaixamento dos níveis freáticos, dinâmica do uso da terra e grau de evolução dos processos erosivos.

Desta maneira, este estudo procurou contribuir na compreensão da dinâmica dos processos naturais e antrópicos e como estes influenciam na disponibilidade hídrica. Em uma realidade de recursos escassos tanto para ações não-estruturais (conservação do solo, reflorestamento) quanto para ações estruturais (estações de tratamento de água e esgoto, programas de redução de perda), a indicação de áreas homólogas a infiltração se constitui em uma importante ferramenta de gestão e planejamento de recursos hídricos.

A estruturação da pesquisa visou o estabelecimento de um novo procedimento que pode servir como ferramenta aos tomadores de decisão.

Os pressupostos conceituais que fundamentaram a análise é que ela deve ser sistêmica, o objeto de análise deve ser possível de ser cartografado e georeferenciado e que, em nível de análise regional e de bacia representativa, as ponderações possam expressar o comportamento da bacia diante da disponibilidade em qualidade e quantidade do recurso hídrico.

Foi observado: após quase uma década de atuação junto ao Comitê de Bacias (CBH-PS), a fragilidade e pouca confiabilidade dos critérios para alocação de recursos oriundos do Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO) para investimentos em ações não-estruturais. As questões ligadas a essas ações estão voltadas originalmente à aplicação do Código Florestal nas Áreas de Preservação Permanente, estabelecidas nesse código, para as nascentes e matas ciliares.

O processo de diminuição de água em uma bacia é lento e gradual e por sua vez o incremento na disponibilização em qualidade e quantidade da água (renovabilidade), talvez seja mais lento e progressivo para os padrões de utilização da sociedade; e que a “produtividade hídrica” em uma bacia, não está ligada somente a uma faixa estabelecida por lei, mas sim a uma região ou conjunto de sub-regiões que em função da construção geológica-geomorfológica apresenta características que potencializam ou não o processo de infiltração.

Desta maneira, temos as áreas favoráveis ao processo de infiltração em nível regional e em escala de bacia representativa orientando a aplicação de recursos e tornando claro para os municípios e para o Comitê de Bacias quais as áreas que tem papel fundamental no processo de “produção” de água.

Estudos futuros devem ser desenvolvidos a partir do ferramental metodológico proposto no presente trabalho, visando seu aprimoramento, bem como a identificação de novos atributos da paisagem que possam ser necessários para o mapeamento de áreas homólogas à infiltração em escala de intervenção (1:1000 e 1:5000).

Para as áreas homólogas determinadas para o ribeirão Guaratinguetá são necessários levantamentos de campo e ensaios de infiltração para comprovação e refinamento dos dados.

A dinâmica que envolve o uso e ocupação do solo é a que interfere diretamente no processo de infiltração da água. Desta forma, é possível estabelecer cenários de alternativas de uso e ocupação, visando estabelecer diretrizes que ajudem na construção de relações sustentáveis entre os recursos naturais presentes na bacia hidrográfica e as atividades antrópicas.

No atual contexto, onde cada vez é mais clara a dicotomia entre as disponibilidades em relação às necessidades por recursos e espaços a serem ocupados, evidencia-se a importância em se aprimorar e desenvolver novas técnicas voltadas à definição das capacidades de suporte de sistemas ambientais.

Para organizar e estruturar um banco de dados, as características dos fenômenos e elementos formadores dos sistemas ambientais e suas necessidades de recursos e espaços, as geotecnologias cumprem o papel de representar de maneira apropriada o comportamento e possíveis modificações dos sistemas que possam ser desencadeadas em função da apropriação e construção dos espaços geográficos.

Cabe ressaltar a importância da avaliação e compreensão dos aspectos geológicos, pedológico, geomorfológico e de uso do solo, ao se estabelecer relações com os sistemas hidrogeológico com competência para o abastecimento público, como é o caso específico da Bacia do Ribeirão Guaratinguetá, a qual vem ao longo dos anos sofrendo fortes pressões silvo-agrícola-pastoris e demográfica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A. N. *Novos conhecimentos sobre os depósitos da Bacia de Taubaté. Notícia Geomorfológica*, Campinas: 1958. v. 1, n. 1, p. 1-13.
- ALL, G. J. H.; COLTRINARI, L. *Workshop internacional sobre geoindicadores de mudanças rápidas*. Noticiário ABEQUA. 1994. n. 4, p. 3-4.
- ALMEIDA, F. F. M. *Fundamentos geológicos do relevo paulista*. São Paulo: Bol. Inst. Geogr. Geol., 1964. n. 41, p. 169-263.
- _____. et al. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1981. Escala: 1:500.000.
- _____. *Fundamentos geológicos do relevo paulista*. São Paulo: Bol. IGEOG-USP, série Teses e Monografias, 1974. n. 14.
- _____. *Vale do Paraíba*. In: Relatório Anual do Diretor do ano de 1957. Rio de Janeiro: DNPM. Geol. Miner., 1958. p. 90-91.
- _____.; CARNEIRO, C. dal Ré. *Origem e evolução da Serra do Mar*. Rev. Bras. de Geociências. 1998. v. 28, n. 2, p. 135-150.
- ALMEIDA, J. C. H.; SILVA, L. G. A. E.; AVELAR, A. S. *Coluna tectono-estratigráfica de parte do complexo Paraíba do Sul, na região de Bananal-SP*. Atas... II Simp. Geol. Sudeste. SBG/SP-RJ. São Paulo, 1991. p. 509-517.
- ARAÚJO, R. C. *Estudo da erodibilidade de um solo da Formação Barreiras*. Dissertação de Mestrado. Depto. de Engenharia Civil. PUC-Rio, 2000. 147p.
- BENETTI, A. D.; LANNA, E. A.; COBALCHINI, N. S. *Metodologia para determinação de vazões ecológicas em rios*. RBRH- Rev. Bras. de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 2003. v. 8, n. 2, p. 149-160.
- BERGER, A. *Geoindicators: tools for assessing rapid change in earth systems*. In: WORKSHOP ESPROMUD, Bogotá: Relatório Interno, 1996. 9p.
- _____.; Iam, W. J. *Geoindicators: assessing rapid environmental changes in earth systems*. Rotterdam, A. A. Balkema: 1996.
- BERTRAND, G. *"Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Quest"* Toulouse: 1968 - traduzido por Cruz, O. Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. São Paulo: 1971.

BEZERRIL, C. R. S.; TOSIN, P. C.; PRIMO, P. B. S. *A bacia do Rio Paraíba do Sul: uma análise do meio físico e da paisagem fluvial*. In: C.R.S.F. BEZERRIL; L.M.N. ARAÚJO & P.C. TOSIN (orgs.). *CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL*. Coletânea de Estudos. Brasília: ANEEL, 1998. p. 1-13.

BISTRICHI, C. A. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. Escala 1:500.000. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1981.

BITTAR, O. Y., et al. *A abordagem do meio físico em EIA através do estudo de processos. Um método recomendado para empreendimentos em ambientes tropicais*. Avaliação de impactos. Rio de Janeiro, 1996. v. 1, n. 2, p. 33-45.

BORMANN, F. H.; LIKENS, G. E. *Nutrient cycling*. *Science*, 1967. n. 155, p. 424-29.

BRUNIJNZEEL, L. A. *Hydrology of Moist tropical forests and effects of conversion: state of knowledge review*. Amsterdam: Free University Amsterdam/UNESCO, Humid Tropics Programme. Publications, Free University, 1990. 224p.

BRYCE, S. A.; CLARKE, S. F. *Landscape – level ecological regions: linking state – level ecoregion frameworks with stream habitat classification*. *Environmental Management*, 1996. v. 20, n. 3, p. 297-311.

CAMPANHA, V. A. *A arquitetura deposicional da bacia sedimentar de Taubaté, SP, como subsídio à delimitação das zonas de produção mineral*. Tese de doutoramento apresentada ao Instituto de Geociências UNESP, Rio Claro: 1994.

CAMPANHA, V. A.; SAAD, A. R.; ALMEIDA, M. A.; BISTRICH, C. A.; BARBOUR Jr., E.; ETCHEBEHERE, M. L. De C. *Geologia das folhas Jacareí, Tremembé, Taubaté e Pindamonhangaba-SP. Parte 3: Bacia de Taubaté*. Atas... II Simp. Geol. Sudeste. SBG/SP-RJ, São Paulo. 1991. p. 455-466.

CARNEIRO, C. D. R.; HASUI, Y.; GIANCURSI, F. D. *Estruturas da Bacia do Taubaté na região de São José dos Campos*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29, Ouro Preto, 1976. *Anais...* SBG, Belo Horizonte, v.4, p. 247-256.

CASTRO, P. S.; BORGES, S. J.; CORREA, J. L. P. *Aumento da produção de água das nascentes para fins de abastecimento e áreas ocupadas por vegetação freatófita*. In: EXPERIÊNCIAS MUNICIPAIS EM SANEAMENTO, Belém: 2000.

_____.; GOMES, M. A. *Técnicas de conservação de nascentes*. Revista Ação Ambiental, Viçosa: 2001. v. 4, n. 20.

CBH – PSM. *Comitê das Bacias Hidrográficas do Rio Paraíba do Sul e Serra da Mantiqueira*. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas do rio Paraíba do Sul e Serra da Mantiqueira: 1995.

CEIVAP – *Projeto qualidade das águas e controle da poluição hídrica na bacia do rio Paraíba do Sul*. Governo do Estado de São Paulo/Secretaria dos Recursos Hídricos, Saneamento e Obras. 2000. (CD-ROM)

CEPAL. *Informe del seminario Indicadores del Desarrollo Sostenible en America Latina e el Caribe*. Santiago, Chile, novembro, 2001.

CHARLEY, R. J. E KENNEDY, B. A. *Physical geography: a systems approach*. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1971.

CHORLEY, R. J. *The drainage basin as a fundamental geomorphic unit*. In: Water, Earth and Mar. Ed.: R.J. Chorley. London: Methuen, 1969. p. 77-99.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blucher, 1974. 149p.

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

COELHO NETO, A.L. Hidrologia de encostas na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. N. (ed.) *Geomorfologia uma revisão de conceitos e bases*. Ed. Bertrand, 1998. p. 93-147.

COLTRINARI, L. Z. D. *Contribuição a geomorfologia da região de Guaratinguetá – Aparecida*. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo: 1974.

_____. *Geoindicadores de mudanças globais*. In: Seminário “Atividade em mudanças globais na USP, 1. São Paulo:, 1995.

_____. *Geoindicadores de mudanças rápidas e sua aplicação nos trópicos úmidos: considerações sobre exemplos brasileiros*. Encontro Nacional da ANAPEGLE “Território Brasileiro e Globalização”, 1, Aracaju. Resumos. Aracaju: ANPEGUE/UFS, 1995. v. 1, p. 197-8.

_____. *Natural and anthropageme interactions in the Braziliam tropics*. In: A. R. BERGER e W. J. IAM (eds). *Geoindicators, Assessing Rapid Environmental Charges in Earth Sysstes* Rotterdam, A. A. Balkema, 1996. p. 295-310.

COOKE, R.V.; DOORNKAMP, J. C. *Geomorphology in environmental manegement: a new indtroduction*. 2.^a ed. New York: Oxford University Press, 1990. 410p.

COOPER, S. D.; DIEHL, S.; KRATZ, K.; SARNELLE, O. Implications of scale for patterns and process in stream ecology. *Australian Journal of Ecology*. 1998. v. 23, p. 27-40.

COOPERATIVA DE SERVIÇO, PESQUISA TECNOLÓGICA E INDUSTRIAIS (CPTI). *Planos de Bacia UGRHI1 - Serra da Mantiqueira, UGRHI2 – Paraíba do Sul*. São Paulo, 2001.

CONYERS, D.; HILLS, P. *An introduction to development planning in the third world*. CHICHESTER, WILEY, JOHN; SONS. 1984. 271p.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO - DAEE. *Estudo de águas subterrâneas*. Região Administrativa 3 – São José dos Campos: DAEE, 1977. v. 5.

_____. *Estudo de águas subterrâneas*. Região Administrativa 3 – São José dos Campos: DAEE, São Paulo, 1979. v. 3.

_____. *Mapas Geológicos do Estado de São Paulo, Folha São Paulo, Guaratinguetá e Santos*. Departamento de Águas e Energia Elétrica; Universidade Estadual Paulista. 1984. Escala 1:250.000.

_____. *Regionalização hidrológica do Estado de São Paulo*. Rev. Águas. São Paulo, 1988. n. 14, p. 4-10.

DE BIASI, M. *A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção*. São Paulo: EDUSP, 1992.

DELCOURT, H. R.; DELCOURT, P. A. *Quaternary landscape ecology: relevant scales in space and time*. Landscape Ecology, 1988, v. 2, n. 1, p. 23-44.

DEMATTÊ, J. A. M.; DEMÉTRIO, V. A. Fotointerpretação de padrões de drenagem em amostras circulares na caracterização de solos basálticos do estado do Paraná. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, 20: 109-115, 1996a.

_____.; _____. Padrões de drenagem em áreas de solos desenvolvidos de rochas vulcânicas ácidas na região Guarapuava (PR). *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, 20: 305-311, 1996b.

DESCROIX, L.; GUATIER, E. *Water erosion in the southern French alps: climatic and human mechanisms*. Orlando, 2002. v. 50, p. 53-85.

DREW, D. *Processos interativos homem-meio ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand, 1994. 3.^a ed. 224p.

EDMUNDS, M. Indicators in the groundwater environment of rapid environmental Change. In: BERGER R.; IAMS, W. J. (eds.) *Geoindicators. Assessing Rapid Environmental in Earth Systems*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1996. p. 135-150.

ENVIRONMENT CANADA. *A report on Canada's progress towards a national set of environmental indicators*. SOE Report, 1991. p. 91-1.

FAO, Planificações y Ordenación de ciencias hidrográficas com ajuda de computadora. Tecnologia para planificación nacional. *Cuadernos Técnicos de la FAO. Guias, FAO: Conservación*. 1996. v. 28, n. 1, p. 1-94.

- FARINA, A. *Principles and methods in landscape ecology*. London: Chapman & Hall, 1998. 235p.
- FEDOROFF, N.; COURTY, M.A. *Indicateurs pédologiques d'aridification. Exemples du Sahara*. Bull. Soc. Géol. France, 1989. v. 8, n. 1, p. 43-53.
- FERNANDES, F. L. *Arcabouço estrutural e evolução da bacia de Taubaté-SP*. Dissertação de Mestrado. UFOP – Departamento de Geologia. Minas Gerais: 1993.
- FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 3rd.
- FORMAN, R. T. T. *Land mosaics. The ecology of landscapes and regions*. Nova York: Cambridge University Press, 1995. 632p.
- _____. ; GODRON, M. Nova York: John Willey, 1986. 619p.
- FRANGIPANI, A.; PANNUTI, E. L. *Estudos Hidrogeológicos na bacia de Taubaté entre Jacareí e Quiririm*. Instituto Geográfico e Geológico. IGC/Secr. da Agricultura do Estado de São Paulo. São Paulo. 1965. Boletim n. 42, 126p.
- FREITAS, P. L.; KERR, J. C. As pesquisas em microbacias hidrográficas: situação atual, entraves e perspectivas no Brasil. In: *Manejo Integrado de Solos em Microbacias Hidrográficas*. CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O. (eds) Anais do Congresso Brasileiro e Encontro Nacional de Pesquisa Sobre Conservação de Solo, 8. Londrina: IAPAR, 1996. p. 43-57.
- FÚLFARO, V. J.; BJOMBERG, J. S. Geologia. In: FERREIRA, A. A.; NEGRO Jr, A.; ALBIERO, J. H.; CINTRA, J. C. A. (orgs.) *Solos do interior de São Paulo*. São Paulo: ABMS/EESC-USP, 1993. p. 1-44.
- GARDNER, R. H.; MILNE, B. T.; TURNER, M. G.; O'NEILL, R. V. *Neural models for the analysis of broad-scale landscape pattern*. Landscape Ecology. 1987. v. 1, p. 19-28.
- GIMENEZ FILHO, A.; MACHADO JR., D. L. ZAINÉ, J. E.; FRASCÁ, M. H. B. O. Geologia das folhas Jacareí, Tremembé, Taubaté e Pindamonhangaba-SP. Parte 2. Bacia de Taubaté. Atas... II Simp. Geol. Sudeste, SBG/SP-RJ. São Paulo, 1991. p. 491-500.
- GOLDENFUN, J. A. *Pequenas bacias hidrológicas: conceitos básicos*. In: Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (orgs.). Porto Alegre: ABRH, 2001. 625p.
- GOMES, M. A.; BORGES, S. J.; FRANCO, I. C.; CORRÊA, J. L. P. *Tecnologias apropriadas à revitalização da capacidade de produção de água de mananciais*. Viçosa: 2002.
- GRIFFITH, G. E.; OMERNIK, J. M.; WOOKS, A. J. *Ecoregions, watersheds, basins and hucs: How state and federal agencies frame water quality T. Soil Water Conserv*. 1999. p. 666-677.

GRIGG, N. S. *Relations persistentes: an objectif in conception systemes*. Cassini, 1997. p. 233-229.

GUSTAFSON, N. A.; FLISHRES, S.; JOELSSON, A. Acatchment — oriented and cost — efecive policy for water protection. *Ecological Engineery* v. 14. p.419-427, 2000.

HABBER, W. Using landscape ecology in planning and management. In: *Changing Landscapes: an Ecological Perspective*. (eds) ZONEVELD, I. S; FORMAN, R. T. T. BERLIN, Springer-Verlag, 1990. p. 217-232.

HALL, F. G.; STREBEL, D. E.; SELLERS, P. J. *Linking knowledge among spatial and temporal scales: vegetation, atmosphere, climate and remote sensing*. Landscape Ecology, 1998. v. 2, n. 1, p. 3-22.

HASUI, Y.; PONÇANO, W.L. Organização estrutural e evolução da Bacia de Taubaté. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife. *Anais...* Recife: SBG, 1978. n. 1, p. 26-381.

_____.; SADOWSKI, G. R. Evolução geológica do Pré-Cambriano da região sudeste do Estado de São Paulo: *Rev. Bras. Geol.*, 1976. v. 6, p. 182-200.

HEWITT, C. N. *Methods of environmental data analysis*. Londres: Elsevier, 1992.

HIRATA, R. C. A. *Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas: estudo de casos no Estado de São Paulo*. (Tese de Doutorado) IGC/USP, inédita, 1994. 195p.

_____.; FERNANDES, A. J.; PRESSINOTTI, M.M.N.; NOGUEIRA, S.A.A.; LEMOS, A.C.P.N. Aplicação do método de unidades homogêneas para o planejamento territorial. Estudo de caso de Itu (SP). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2. São Paulo. *Anais...* SBG. 1991. p. 337-344.

HUGGETT, R. J. *Geoecology. An evolutionary approach*. Londres: Routledge, 1995.

HYNES, H. B. N. *The stream out its valley*. Vehr. Internat. Verein: Limnol, 1975. n. 19, p. 1-15.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Censo demográfico Brasileiro*. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 15 de maio 2005.

_____. *Indicadores de desenvolvimento sustentável*. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 15 de maio 2005.

INSTITUTO FLORESTAL/FUNDO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS - FEHIDRO. *Levantamento da Vegetação Natural e Reflorestamento e Constituição de Base Georeferenciada da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul/Mantiqueira*. (CDRW), 2001.

INSTITUTO FLORESTAL/SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. *Inventário Florestal da Vegetação Natural do Estado de São Paulo*. Imprensa Oficial, 2005.

INSTITUTO GEOLÓGICO. *Subsídios do meio físico geológico ao planejamento do município de Sorocaba (SP)*. Programa: Cartas geológicas e geotécnicas para o planejamento ambiental na região entre Sorocaba e Campinas. São Paulo. 1990. v. 2.

_____. *Subsídios do meio físico geológico ao planejamento do município de Campinas (SP)*. Programa: Cartas geológicas e geotécnicas para o planejamento ambiental na Região entre Sorocaba e Campinas. São Paulo, 1993. v. 2.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. *Geologia da região administrativa 3 (Vale do Paraíba) e parte da região administrativa 2 (litoral) do Estado de São Paulo*: Monografias, 1988. n. 1, 78p.

_____. *Geologia das folhas Jacareí, Tremembé, Taubaté e Pindamonhangaba*. Relatório 28732/1990. Secretaria da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico/Governo de São Paulo, 1990. Escala 1:50.000.

_____. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. Nota explicativa. São Paulo: IPT, Monografia, 1981. n. 6, 126p. Escala 1:500.000.

_____. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. Volume I. Governo de São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1981. Escala 1:500.000.

IRITANI, M. A. *Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea*. Tese de doutoramento apresentada ao Instituto de Geociências. USP. São Paulo, 1998.

JEFFREY, D. W.; MADDEN, B. *Bioindicators and environmental management*. Londres: Academic Press, 1991.

JOHNSTON, C. *Geographic information systems in Ecology. Methods in Ecology*. Singapura: Blackwell, 1998.

KARMANN, I. Ciclo da Água, Água Subterrânea e sua ação geológica. In: *Decifrando a Terra*. WILSON TEIXEIRA, et al. (org.). Oficina de Texto. São Paulo: 2001.

KLÉMES, V. Conceptualization and scale in hydrology. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, 1993. v. 65, p. 1-23.

LANNA, A. E. L. Províncias hidrológicas e bacias representativas. In: *V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, Blumenau, Anais... Florianópolis: ABRH, 1983. p. 3-24.

LANDIM, P.M. (coord.). *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências e Exatas da UNESP, 1984. Escala 1:250.000.

LEFF, Enrique. *Saber ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder*. Petrópolis: Vozes, 2001.

LEMOS, A. C. P. N.; SANTORO, J.; SOARES, P. V.; HIRATA, R. C. A. Subsídios do meio físico geológico ao planejamento territorial: a experiência do Instituto Geológico no município de Sorocaba (SP). In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 36. Natal: 1990. v.1, p. 335-374.

LENZ, R.; MALKINA-PYKH, I. G.; PYKH, Y. *Introduction and overview*. Ecological Modelling, 2000. v. 130, p. 1-11.

LIKENS, G. E. *Beyond the shoreline: a watershed – ecosystem Approach*. Verh. Internat. Verein. Leimnol. 1984. n. 22, p. 1-12.

_____.;BORMANN, F.H. *An Ecosystem to Aquatic Ecology*. LINKEN, G. E. (ed), New york: Spring-Verlag, 1985.

LIMA, W. P. *Impacto Ambiental do Eucalipto*. 2.º ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1996.

_____. *Princípios de hidrologia florestal para manejo de bacias hidrográficas*. Piracicaba,SP: ESALQ, 1986. 242p. Texto básico para a disciplina “Manejo de Bacias Hidrográficas”.

LOH, D. K.; RYKIEL JR.,E. J. *Integrated resource management: coupling expert systems with data-base management and geographic information systems*. Environmental Management, 1992. v. 16, n. 2, p. 167-177.

LOMBARDI NETO, F.; ROCHA, J. V.; BACELLAR, A. A. A. Planejamento agroambiental da microbacia hidrográfica do ribeirão Cachoeirinha – Município de Iracemópolis, SP, utilizando Sistema de Informação Geográfica. In: *Simpósio Nacional de Controle de Erosão*, 5. Bauru: 1995.

LORENZ, C. M.; GILBERT, A. J.; COFINO, W. P. *Environmental auditing: Indicators for Tran boundary river management*. Environment Management. 2001. v. 28, n. 1, p. 115-129.

MARCHETTI, D. A. B.; GARCIA, G. J. *Princípios de fotogrametria e fotointerpretação*. São Paulo: Nobel, 1977. 257p.

MARTINS, E. S. P. R.; PAIVA, J. B. D. Quantidade dos recursos hídricos.In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (org) *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 531-566.

MEDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Noções básicas de escalas dos processos hidrológicos. In: *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA e ELOISA MARIA CANDURO DIAS DE PAIVA (org) Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 15-30.

MEIRELLES, C. M.; BOTELHO, R. G. M. Amostras circulares de rede de drenagem na região serrana do médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ). In: *simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, 7, Curitiba (PR), 1997. v.2. CD-ROM.

_____.; _____. Correlação entre rede de drenagem e solos em amostras circulares na região serrana do médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ). In: *Simpósio Nacional de Geomorfologia*, 2, Florianópolis (SC), 1998. p. 443-446.

MEIXLER, H. S.; BAIN, H. B.; GALBREATH, G. H. *Aquatic gap analysis: tool for watershed scale assessment of fluvial habitat and biodiversity*. International Association for Hydraulic Research. Quebec. 1996. p. A665-A670.

MELENDO, J. Del v.[on line] *El paisaje como recurso natural* – breve aplicación ao território Aragonés. 1999. Disponível em <<http://www.bareas.org/articulos/paisagem.html>> acesso em 2001.

MELO, M. S.; RICCOMINI, C.; HASUI, Y.; ALMEIDA, F. F.; COIMBRA, A. M. *Geologia e evolução das bacias tafrogênicas continentais do Sudeste do Brasil*. Rev. Bras. Geoc. 1985. n. 15, p. 193-201.

MENDES, C. A. B. *Integração de Modelos hidrológicos e sistemas de Informações Geográficas: Fundamentos*. Rev. Bras. de Recursos Hídricos. 1996. v. 1, n. 1, p. 48-66.

METZGER, J. P. *Relationships between landscape structure and tree species diversity in tropical forests of South-East Brazil*. Landscape and Urban Planning, 1997. n. 37, p. 29-35.

_____.; Décamps, H. *The structural connectivity threshold: an hypothesis in conservation biology at the landscape scale*. Acta Ecológica. 1997. v.18, n. 1, p. 1-12.

MONTGOMERY, D. R.; GRANT, G. E.; SULLIVAN, K. Watershed análise as a frame work for implementing ecosystem management. *Water Resources Bulletin*. 1995. v. 31, n. 3, p. 369-386.

MORELLI, A. F. *A transformação da paisagem no município de São José dos Campos (SP) - 1500 a 2000*. Tese de doutorado. Universidade do Estado de São Paulo: UNESP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Campus Rio Claro: 2002.

NAKAZAWA, V. A.; PRANDINI, F. L.; SANTOS, A. R. dos; FREITAS, C. G. L. de. Cartografia Geotécnica: a aplicação como pressuposto. In: *Simpósio de Geologia do Sudeste*, 2, São Paulo, 1991. Anais... p. 329-336.

NAVEH, Z. *Mediterranean landscape evolution and degradation as multivariate biofunctions: theoretical and practical implications*. Landscape Planning. 1982. n. 9, p. 125-146.

NAVEH, Z.; LIEBERMAN, A. S. *Landscape ecology*. Nova York: Springer-Verlag, 1994. 255p.

O'HONNEY, K.; PIESENS, K.; LANDUYT, W. VAN; GULINCK, H. *Sattelite based land use and landscape complexity indices as predictors for regional plant species diversity*. Landscape and Urban Planning. 2003. n. 63, p. 241-250.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. *Mapa Pedológico do Estado de São Paulo*. 1:500.000. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas (IAC), 1999.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). *Enviromental indicators Paris*: OCDE, 1994.

OSTERKAMP, W. R.; SCHUMM, S. A. Geoindicators for river and river-valley. In: BERGER e W.J. IAM (eds.) *Geoindicators: Assessing Rapid Environmental Changes in Earth Systems*. 1996. p. 97-114.

OTT, W.R. *Environmental statistics and data analysis*. Boca Raton: Lewis Publishers. 1995.

PEREIRA, M. N.; NOVO, E. M. L. M; KURKDJIAN, M. L. N. O.; D'ALGE, J.C.L. *Atualização do uso da terra do município de São José dos Campos através de dados de sensoriamento remoto*, INPE- DPA, mar.1988. p. 71, CDU-528.711.7:551.4.

PIERCE, F.J.; LARSON, W.E. Quantifying indicators for soil quality. BERGER e W.J. IAM (eds.) *Geoindicators: Assessing Rapid Environmental Changes in Earth Systems*. 1996. p. 323-336.

PIRES NETO, A. G.; LEPSCH, I.F F. A análise geomorfológica como base para os estudos das potencialidades do meio físico e sua aplicação no macrozoneamento e no planejamento territorial. Município de Nova Friburgo (RJ). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, São Paulo. *Anais...* SBG. 1991. p. 329-336.

PIRES, J. S. R; SANTOS, J. E. *Bacias Hidrográficas: integração entre meio ambiente e desenvolvimento*. Ciência Hoje, Rio de Janeiro: 1995. v. 19, n. 110, p. 40-45.

PMC (Prefeitura Municipal de Campinas) *Plano de gestão da Área de Proteção Ambiental Sousas* - Joaquim Egídio - APA Municipal. Campinas: Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente, 1996. 149 p.

POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Legislação Básica. Comentários do secretário GARRIDO, R. J. S. de Recursos Hídricos sobre aspectos institucionais do setor, p. 11, 12, 13, Comentários do relator no senado Federal: A água no século XXI, CABRAL, B. 2002. p. 15-16.

PONCE, V. M. *Engineerng hidrology: principles and practice*. Englewodo Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989. 640p.

PONÇANO, W. L.; CARNEIRO, C. D. R.; BISTRICHI, C. A; ALMEIDA, F. F. M.; PRANDINI, F. L. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT. 1981. v. 2.

REBOUÇAS, A. C. Inovações tecnológicas e água subterrânea. In: *Encontro de preservação de mananciais da zona da mata mineira, II*, 2002, Viçosa: Anais palestras-encontro, 2002. p. 45-48.

RESENDE, M.; CURY, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G. F. Pedologia: base para destruição de ambientes. Viçosa: NEPUT, 1995. 304p.

RICCOMINI, C. *O Rift Continental do Sudeste Brasileiro*. 256p. (Tese de Doutorado) – Instituto de Geociências da USP, São Paulo: 1989.

RIITERS, K. H.; LAW, B. E.; KUCERA, R. C.; GALLANT, A. L.; DE VELICE, R. L.; PALMER, C. J. *A selection of forest condition indicators for monitoring. Environmental Monitoring and Assessment*. 1992. n. 20, p. 21-33.

RISSER, P. G. Landscape ecology. In: M.G. TURNER (ed.) *Landscape Heterogeneity and Disturbance*. Nova York: Springer-Verlag, 1991.

ROBINSON, N. (ed.) *Agenda 21 – Working toward a global partnership*. Nova York: Ocean Publication, 1993.

ROCHA, J. S. M. *Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas*. 2.^a ed. Santa Maria: USFM, 1991. 181p.

ROSS, J. L. S. *Análise empírica de fragilidade dos ambientes naturais e antropizados*. Ver. do Depto. de Geografia. 1994. n. 8, p. 63-74.

_____. *O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo*. Revista do Departamento de Geografia, FFLCH/USP, 1992. n. 6, p. 17-29.

_____.; MOROZ, I. C. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. Revista do Departamento de Geografia, FFLCH/USP, 1997. n. 10, p. 41-56.

_____.; MOROZ, I. C. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. Escala 1:500.000. São Paulo: Universidade de São Paulo/Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, 1999.

_____.; QUEIROZ NETO, J. P. Amostras circulares de rede de drenagem para o estudo de solos de regiões tropicais úmidas escarpadas e litorâneas – São Paulo, Brasil. In: *XIII Congresso Latino Americano da Ciência do Solo*, CD-ROM, Águas de Lindóia (SP), 1996.

RUZICKA, M.; MIKLOS, L. Basic premises and methods in landscape ecological planning and optimization. In: ZONNEVELD, I. S.; FORMAN, R. T. T. (eds.) *Changing Landscapes: An Ecological Perspective*. Nova York: Springer-Verlag, 1990. p. 233-260.

SANTORO, E.; ENS, H. H.; NAGATA, N. *Geologia das folhas Jacareí, Tremembé, Taubaté e Pindamonhangaba. SP, Parte 1: Embasamento Setentrional da Bacia de Taubaté*. Atas, SBG/SP-RJ; 2º Simp. Geol. Sudeste, 1991. p. 481-489.

SANTOS, R.F.; CARVALHAIS, H. B. PIRES, F. *Planejamento ambiental e sistemas de informações geográficas*. Caderno de Informações Georeferenciadas. Publicado Interne, acesso em 1998.

SÃO PAULO, SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. Coordenadoria de Planejamento Ambiental Estratégico e Educação Ambiental. *Gestão Participativa das Águas*. São Paulo: SMA/CPLEA, 2004.

SCHUMM, S. A. *The fluvial system*. New York: Wiley and Sons. Interscience, 1977. 338p.

SERRA, A. L. R. *Indicadores de pressão para o córrego Piçarrão*. IG, Unicamp. Dissertação de Mestrado, 2002.

SHAMIR, U. Opening address of the first Goerg Kavacs colloquium. In: FEDDES, R.A. (ed) *Space and time scale variability and interdependencies in hydrological Processes*. Cambridge: University Press, 1995. p. 1-2 (International Hydology Series).

SHENG, T. C.; BARRET, R. E.; MITCHELL, T. R. Using geographic information systems for watershed classification and rating in developing countries. *J. Soil Water Conserv*, 1997. v. 52, n.2, p. 84-89.

SILVA, J. U. L. *A dinâmica atmosférica e a distribuição das chuvas na região “lesnordeste” paulista*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP (tese de doutorado). 1999.

SILVEIRA, A. L. da; LOUZADA, J. A.; BELTRANE, L. Infiltração e Armazenagem no solo. In: TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência aplicação*. Porto Alegre: Univerdidade. ABRH, EDUSP, 1993.

SIMÕES, S. J. C. A dinâmica dos sistemas e a caracterização de geoindicadores. In: MARTOS, H. L.; MAIA, N. B. (coord.) *Indicadores Ambientais*. 1997. p. 59-70.

_____. *Geoindicadores ambientais: conceitos e aplicações*. Geociências. Rio Claro, 1999. v. 18, n. 1, p. 41-52.

_____. BARROS, A. P.; RAFF, D. *The effects of climate variability on water resources: A regional perspective*. Atas da Conferência Internacional: Climate Change: a chalange or a threat for water management, Amsterdan, 2004. p. 9-14.

_____.; BERNARDES, G. P. SILVA, J. U. L. *Monitoramento dos processos geo-hidrológicos na bacia hidrográfica dos Mottas, Médio Vale do Paraíba do Sul, SP*. V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal: (CD-ROM), 2000.

SOARES, P. V.; PEREIRA, S. Y.; SIMÕES, S. J. C.; BERNARDES, G. P. *Aplicação do conceito de geoindicadores ambientais na avaliação da disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas - Uma abordagem introdutória*. ABRH (submetido). 2005.

- SOPHOCIEOUS, M. *Interactions between groundwater and surface water: the state of the science*. Hydrogeology Journal, 2002. n. 10, p. 52-67.
- SPEIDEL, D. H.; RUEDISILI, L. C.; AGNEW, A. F. (Eds) *Perspectives on water: uses and abuses*. New York: Oxford University Press, 1988. 388p.
- STRASKRABA, M.; TUNDISI, J. G. *Diretrizes para o gerenciamento de lagos*. Vol. 9: Gerenciamento da qualidade da água de represas. Instituto Internacional de Ecologia, São Carlos: Somus Gráfica e Editora Ltda., 2000.
- TOEBES, C.; OURYVAEV, V. *Representative and experimental basins: an international guide for research and practice*. Haarle: UNESCO, 1970. 348p.
- TROLL, C. *Landscape ecology and biogeocenology – a terminological study*. Geoforum, 1971. n. 8, p. 43-46.
- TROPPEMAIR, H. *Ecologia de paisagem: da geografia para a ciência multidisciplinar*. Rev. de Est. Ambientais. Rio Claro: IGCE. UNESP: 2001 v. 3, n. 1, p. 80-85.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia – Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Ed. da Universidade, ABRH, EDUSP, 1993.
- _____. Vazões Médias. In: *Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas*. João Batista Dias de Paiva e Eloisa Maria Canduro Dias de Paiva (org). Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 113-124.
- _____. Limnologia no século XXI: perspectivas e desafios. *Instituto Internacional de Ecologia*, São Carlos, 1999. 24p.
- _____. Regionalização de vazões. In: TUCCI, C. E. M. (org). *Hidrologia, Ciências e Aplicação*. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH: EDUSP, 1993. p. 573-619.
- TUNDISI, J. G. *Água no século XXI*. Enfrentando a escassez. Rima, IIE. São Carlos: 2003.
- _____. *Limnologia no século XXI: perspectivas e desafios*. Instituto Internacional de Ecologia. São Carlos, 1999, 24p.
- _____.; Barbosa, F. A. R. Conservation of aquatic ecosystems: present status and perspectives. In: Tundisi, T.C. *et al.*, (eds) *Limnology in Brazil*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências/Sociedade Brasileira de Limnologia, 1995. p. 365-371.
- TURNER, M. G.; GARDNER, R. H. *Quantitative methods in landscape ecology*. Nova York: Springer Verlag, 1991.
- USDA. National Engineering Handbook. Section 4, Hydrology. Soil Conservation Service, Washington, D. C. 1972.

VALÉRIO FILHO, M; ALVES, M; FANTIN, M; GARCIA, R. 2002. *Geotecnologias Aplicadas na Avaliação das Áreas Urbanizadas e seus Impactos na Rede de Drenagem*. Simpósio Nacional de Impactos Ambientais Urbanos, Curitiba: 2002.

VILES, H.; GOUDIE, A. S. *Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology*. *Earth Sciences Reviews*, Orlando, 2003. v. 131, p. 61-105.

WALZ, R. *Development of environmental indicator systems: experiences from Germany*. *Environmental Management*, 2000. v. 25, n. 6, p. 613-623.

ZIEMER, R. R. Temporal and spatial scales. In: WILLIAMS, J. E. et al. (eds). *Watershed Restoration: Principles and practices*. Bethesda: American Fisheries Society, 1997. p. 80-95.

ZONNEVELD, I. S.; FORMAN, R. T. T. *Changing landscape: an ecological perspective*. Berlin: Springer-Verlag, 1990. 298p.