



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

PEDRO IVO MIONI CAMARINHA

**MAPEAMENTO DO POTENCIAL DE INFILTRAÇÃO COMO
SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO DE MICROBACIAS DE
CABECEIRA. UMA PROPOSTA METODOLÓGICA UTILIZANDO
GEOTECNOLOGIAS**

Bauru
2011

PEDRO IVO MIONI CAMARINHA

**MAPEAMENTO DO POTENCIAL DE INFILTRAÇÃO COMO
SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO DE MICROBACIAS DE
CABECEIRA. UMA PROPOSTA METODOLÓGICA UTILIZANDO
GEOTECNOLOGIAS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Simões

Bauru
2011



Camarinha, Pedro Ivo Mioni.

Mapeamento do potencial de infiltração como subsídio ao planejamento de microbacias de cabeceira: Uma proposta metodológica utilizando geotecnologias / Pedro Ivo Mioni Camarinha, 2011.

120 f. il.

Orientador: Silvio Jorge Coelho Simões

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2011.

1. Infiltração 2. Sistema de Informação Geográfica
3. Álgebra de Mapas. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PEDRO IVO MIONI CAMARINHA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 21 dias do mês de fevereiro do ano de 2011, às 09:00 horas, no(a) SALA DE VIDEOCONFERÊNCIA - UNESP GUARATINGUETÁ, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. SILVIO JORGE COELHO SIMOES do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Guaratingueta, Prof. Dr. PAULO VALLADARES SOARES do(a) Secretaria Executiva / Associação Corredor Ecológico do Vale do Paraíba, Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Guaratingueta, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PEDRO IVO MIONI CAMARINHA, intitulado "MAPEAMENTO DO POTENCIAL DE INFILTRAÇÃO COMO SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO DE MICROBACIAS DE CABECEIRA: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA UTILIZANDO GEOTECNOLOGIAS". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. SILVIO JORGE COELHO SIMOES


Prof. Dr. PAULO VALLADARES SOARES


Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES

Dedico este trabalho
aos meus pais e avós, pelo eterno amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar capacidade de concluir mais essa grande etapa da minha vida e de poder reconhecer, cada dia mais, sua grandiosidade e perfeição;

Ao Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho, pela amizade, confiança, orientação e estímulo existente desde a graduação e que foram essenciais para o cumprimento do curso;

Ao Prof. Dr. George de Paula Bernardes, por sempre me ajudar, orientar e ensinar, seja na vida ou no ramo acadêmico;

À Profa. Dra. Isabel Cristina de Barros Trannin, pelos esforços demandados para a conclusão deste trabalho, bem como pelos seus comentários, sempre pertinentes;

À minha mãe Lucienne e meu pai Pedro Tarciso, pelo exemplo, dedicação e incentivo dado nessa grande caminhada que é a vida;

À toda minha família, por sempre me apoiarem e acreditarem em mim;

Aos meus eternos amigos que me acompanham desde tempos que precedem o mestrado (sobretudo aos catequistas) e que sempre irei ter, com carinho, ao meu lado. Cabe aqui um agradecimento especial à Mariana Benessiuti, minha fiel escudeira durante mais este período;

À Karinne, pela companhia inesquecível durante o mestrado;

À Zezé Zakia e ao Paulo Valladares Soares, pelas oportunidades concedidas e pelas conversas sempre produtivas;

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da UNESP; especialmente aos professores Heraldo Giacheti e Jorge Hamada, bem como à Secretária de Pós-graduação por sempre estarem dispostos a me ajudar a resolver os eventuais problemas que surgiram;

E a todos aqueles que pela minha vida passaram e me agregaram valores, conhecimento e virtudes, deixando boas lembranças.

“Quanto mais conhecemos, mais amamos.”

Leonardo Da Vinci

CAMARINHA, P. I. M. **Mapeamento do Potencial de Infiltração como Subsídio ao Planejamento de Microbacias de Cabeceira. Uma Proposta Metodológica Utilizando Geotecnologias.** Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista. Dissertação de Mestrado. Bauru, 2011.

Resumo

Esta pesquisa teve como objetivo principal elaborar uma proposta metodológica para gerar mapas de potencial de infiltração de caráter semi-qualitativo, em uma área de plantio de eucalipto, a Fazenda Santa Edwiges, Lorena (SP), localizada nas cabeceiras de drenagem da sub-bacia do Ribeirão Taboão. Os procedimentos baseiam-se na integração de informações cartográficas referentes à geologia, geomorfologia, geotecnia e cobertura vegetal, implementadas em ambiente SIG. O software ArcGIS[®] foi utilizado para análises espaciais avançadas, incluindo geoestatística, para a espacialização da porosidade total e textura do solo, e álgebra de mapas, para obter o produto final desejado. O intuito da utilização de tal metodologia foi o de relacionar os principais fatores que interferem no processo de infiltração avaliando suas peculiaridades, de modo que ao fim do trabalho pudesse ficar claro como cada elemento age dentro do geocossistema em questão. Como a cobertura vegetal nessa área é alterada com os ciclos de plantio de eucalipto, dois cenários diferentes foram utilizados: logo após o plantio e com o eucalipto adulto. Os mapas de potencial de infiltração indicaram que as composições formadas na porção Sudeste da fazenda, combinando a geologia dos Granitóides, com solos predominantemente arenosos, com boa drenagem interna (alta porosidade) corresponderam às áreas que mais favorecem o processo de infiltração. Por outro lado, a combinação de declividades acentuadas, solos predominantemente argilosos em locais com alta densidade de linhas de escoamento e também de drenagem, caracterizara como as mais tendenciosas ao escoamento superficial. Os resultados finais puderam ser validados através de ensaios de condutividade hidráulica saturada obtidos em campo, caracterizando a viabilidade e aplicabilidade da metodologia proposta, que pode ser considerada não só uma ferramenta para a gestão dos recursos naturais mas também como uma ferramenta essencial para tomadas de decisão quanto ao uso e ocupação do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Infiltração, SIG, Álgebra de Mapas, Paisagem, Bacias Hidrográficas.

CAMARINHA, P. I. M. **Mapping the Potential of Water Infiltration as Support for the Planning of the Headwaters of Watersheds. A methodology using geotechnologies.** Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista. MSc Dissertation. Bauru, 2011.

Abstract

This research had as main goal to create a methodology to generate semi-qualitative maps of the potential for water infiltration, in an area of eucalyptus plantations, the Farm St. Edwiges, Lorena (SP). The area is located in the headwaters zone of the Ribeirão Taboão watershed, Paraíba do Sul basin, Southeast Brazil. The procedures are based on the integration of cartographic information concerning the geology, geomorphology, geotechnical and vegetation cover, implemented in a GIS. The software ArcGIS ® was used for advanced spatial analysis, including the geostatistics for spatialization of porosity and soil texture, and map algebra to obtain the desired final product. The purpose of this study was to correlate the main factors involved in the water infiltration evaluating its peculiarities. As the vegetation in this area changes with the cycles of eucalyptus, two different scenarios were simulated: immediately after planting and adult eucalyptus. The maps of potential of water infiltration indicated that the southeast region of the study area, with geology composed of granitoids, sandy soils with high porosity corresponds to the areas with high infiltration potential. On the other hand, the combination of steep slopes with clay soils located in areas with high density of flow and drainage lines characterize the most propitious areas to runoff. The results can be validated through tests of hydraulic conductivity obtained in the field, characterizing the feasibility and applicability of the methodology, which can be considered not only a tool for the management of natural resources but also as an essential tool for decision making regarding the land use and occupation.

KEYWORDS: Water Infiltration, GIS, Algebra Map, Landscape, Watershed.

Índice de Figuras

Figura 1- O ciclo hidrológico (USGS, 2010).	6
Figura 2 - Ilustração de uma bacia hidrográfica e sua compartimentação (Adaptado de: Natural Resources Conservation Service apud Agriculture and Agri-Food Canada, 2007).....	9
Figura 3 - Perfil de solo ilustrando a zonas saturada e não-saturadas (Teixeira et al., 2000)..	11
Figura 4 - Zona vadosa com suas sub-divisões (Lane, 1960).	13
Figura 5- Perfis de umidade para três diferentes situações de declividade (Ahredt, 2005).	20
Figura 6 - Permeâmetro de Guelph (Fonte: Soil Moisture, 1987).....	21
Figura 7- Parâmetros do semivariograma (CAMARGO, 1997).	27
Figura 8 - Exemplo baseado nos conceitos da a) Lógica Booleana e b) Lógica Fuzzy.....	30
Figura 9 – Exemplo de um conjunto fuzzy, utilizando a variável altura.	31
Figura 10– a) Representação de funções lineares de conjuntos fuzzy; b) Representações de funções sigmoidais de conjuntos fuzzy. Adaptado de Borges e Silva (2009).....	32
Figura 11 - Fluxograma das atividades desenvolvidas no decorrer deste estudo.....	35
Figura 12 - Localização da Área de Estudo - Fazenda Santa Edwiges.....	36
Figura 13 - Vista panorâmica da localização da área de estudo. Imagens do Google Earth®.	37
Figura 14 - Esboço da distribuição das unidades litoestratigráficas no estado de São Paulo do Proterozóico e Eopaleozóico (Hassui e Sadowski, 1976).	38
Figura 15 – Mapa Geológico da área da Fazenda Santa Edwiges, elaborado em escala 1:10.000 (Adaptado de Rodrigues e Milanezi, 2005).	39
Figura 16 - Modelo Digital de Terreno para a Fazenda Santa Edwiges que identifica as unidades de relevo existente (Adaptado de Lima & Simões, 2005).....	41
Figura 17 - Mapa de Declividade para a área da Fazenda Santa Edwiges em escala 1:25.000.....	43
Figura 18 - Dinâmica do Escoamento Superficial na Fazenda Santa Edwiges e Rede de Drenagem (Bustamante, 2005).	44
Figura 19 - Mapa pedológico da área de estudo. Escala 1:500.000 Fonte: Rizzo (2006)	47
Figura 20 - Mapa de Cobertura Vegetal cedido pela Fibria referente ao ano de 2010.....	50
Figura 21 - Dados referentes à pluviometria na região do Vale do Paraíba (SANTOS, 2006).	51
Figura 22 - Organograma esquemático proposto para os procedimentos adotados na elaboração de um mapa de predição com qualidade desejável (Camarinha et al., 2008).....	54
Figura 23 - Seis principais tipos de solos encontrados durante a classificação expedita do solo, através de análises tátil-visuais, quanto a sua textura.	58
Figura 24 - Classificação da textura do solo utilizando Lógica Fuzzy.	59
Figura 25- Locais das 30 primeiras amostras e valores da porosidade.....	62

Figura 26 - (A) Predição da porosidade superficial e distribuição do erro associado; (B) novos locais para amostragem.....	63
Figura 27 – Mapas do erro associado na predição da porosidade superficial: (A) banco de dados com 30 amostras; (B) 38 amostras. O mapa (C) localiza as 3 novas amostras coletadas.....	64
Figura 28 - Histogramas associados a distribuição espacial das amostras.....	66
Figura 29- Semivariogramas para as profundidades: (a) superfície, (b) a 50 cm e (c) a 100 cm.....	67
Figura 30– Variogramas direcionais obtidos para amostras de solo na: a) superfície e b) a 100cm de profundidade.....	68
Figura 31 – Mapa Geológico e ajustes realizados para configurar a vizinhança de busca.	69
Figura 32 - Mapas de predição elaborados para a porosidade na a) superfície e b) a 100cm de profundidade.	70
Figura 33 - Histograma associado à localização das amostras para a textura do solo.....	71
Figura 34 - Semivariograma ajustado para os dados da textura do solo.....	72
Figura 35 - Configuração da vizinhança de busca para os dados da textura do solo.	73
Figura 36 - Mapa de predição da Textura do Solo.	74
Figura 37 - Mapa de Densidade de Linhas de Escoamento.	75
Figura 38 - Mapa de Densidade de Drenagem.	76
Figura 39- Hierarquização dos mapas utilizados para a Álgebra de Mapas.	82
Figura 40 - Mapa de Potencial de Infiltração, simulando a situação com o eucalipto adulto, após 4 anos de plantio.	84
Figura 41 - Mapa de Potencial de Infiltração simulando a situação com o eucalipto ainda pequeno, logo após o plantio.	85
Figura 42 – Exemplo de uma localidade onde o sopé das encostas apresentam tendência ao escoamento superficial.	90
Figura 43 – Exemplo de como os resultados apresentados podem ser utilizados no planejamento do traçado das estradas vicinais e também do sistema de drenagem de águas pluviais.	91
Figura 44- Dados de Kfs inseridos no Mapa de Potencial de Infiltração.	93

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classes da água subsuperficial. Adaptado de: Oliveira e Brito (1998).	13
Tabela 2 - Variação esperada da condutividade hidráulica saturada para diferentes texturas do solo (Adaptado de Scott, 2001)	15
Tabela 3 - Variações de porosidades representativas para materiais sedimentares (FETTER, 1994).	17
Tabela 4 - Comparação entre os valores de porosidade do solo, obtidos por análises laboratoriais e estimados através da Krigagem.	63
Tabela 5 – Banco de dados final utilizado neste trabalho.	65
Tabela 6 - Ponderação para o mapa de Declividade	77
Tabela 7 - Ponderação da Densidade de Escoamento Superficial.	78
Tabela 8- Ponderação da Densidade de Drenagem.	78
Tabela 9 - Ponderação para as Unidades Geológicas	79
Tabela 10- Ponderação para as classes de porosidade.	80
Tabela 11 - Ponderação para a textura do solo.	80
Tabela 12- Ponderação para as classes da cobertura vegetal.	81
Tabela 13 - Hierarquização dos layers utilizados.	82
Tabela 14 - Condutividade Hidráulica Sat. para alguns pontos da Fazenda Sta. Edwiges.	93

Sumário

RESUMO	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	V
SUMÁRIO	VI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	2
2 REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 INTERAÇÃO SOLO E ÁGUA	4
2.2 CICLO HIDROLÓGICO	6
2.3 BACIAS HIDROGRÁFICAS – CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES	8
2.4 INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO	11
2.4.1 <i>Zona não-saturada (zona vadosa)</i>	12
2.4.2 <i>Fatores que influenciam o processo de infiltração de água no solo</i>	14
2.4.2.1 Textura do Solo	14
2.4.2.2 Porosidade do solo	16
2.4.2.3 Cobertura Vegetal	18
2.4.2.4 Umidade Inicial do Solo	19
2.4.2.5 Declividade do Terreno	19
2.4.3 <i>Condutividade Hidráulica Saturada</i>	20
2.5 GEOESTATÍSTICA	23
2.5.1 <i>Krigagem</i>	25
2.5.2 <i>Variogramas</i>	26
2.5.3 <i>Exemplos de estudos geoestatísticos</i>	27
2.6 LÓGICA FUZZY	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 ÁREA DE ESTUDO – INFORMAÇÕES ENCONTRADAS NA LITERATURA	35
3.1.1 <i>Geologia Regional e Local</i>	37
3.1.2 <i>Geomorfologia</i>	40
3.1.3 <i>Hipsometria e Declividade</i>	42
3.1.4 <i>Dinâmica do Escoamento Superficial e Sistema de Drenagem</i>	44
3.1.5 <i>Pedologia</i>	45
3.1.5.1 Argissolos	48
3.1.5.2 Latossolos	48
3.1.5.3 Cambissolos	48
3.1.5.4 Neossolos e Gleissolos	48
3.1.6 <i>Cobertura Vegetal</i>	49
3.1.7 <i>Pluviometria Regional</i>	51
3.2 METODOLOGIA PARA GERAR OS MAPAS DE POROSIDADE E TEXTURA	52
3.2.1 <i>Processo de Amostragem</i>	53
3.2.2 <i>Procedimentos Geoestatísticos</i>	53
3.2.2.1 Definição e preparo dos dados	54
3.2.2.2 Análise dos dados	55

3.2.2.3	Otimização do processo	56
3.2.3	<i>Lógica Fuzzy aplicada a Textura do Solo</i>	56
3.3	MAPAS DE DENSIDADE DE ESCOAMENTO E DENSIDADE DE DRENAGEM	59
3.4	ÁLGEBRA DE MAPAS	60
3.4.1	<i>Ponderação das classes</i>	61
3.4.2	<i>Hierarquização dos layers (mapas)</i>	61
4	RESULTADOS	62
4.1	GEOESTATÍSTICA APLICADA AOS MAPAS DE POROSIDADE	62
4.1.1	<i>Mapas preliminares</i>	62
4.1.2	<i>Histogramas</i>	66
4.1.3	<i>Semivariogramas</i>	67
4.1.4	<i>Definindo a Vizinhaça de Busca</i>	68
4.1.5	<i>Mapas de Predição para a Porosidade</i>	70
4.2	GEOESTATÍSTICA PARA O MAPA DE TEXTURA DO SOLO.....	71
4.2.1	<i>Histogramas</i>	71
4.2.2	<i>Semivariograma</i>	72
4.2.3	<i>Definindo a Vizinhaça de busca</i>	72
4.2.4	<i>Mapa de Predição para a Textura do solo</i>	74
4.3	MAPA DE DENSIDADE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL	75
4.4	MAPA DE DENSIDADE DE DRENAGEM	76
4.5	ÁLGEBRA DE MAPAS	77
4.5.1	<i>Ponderação das classes dos mapas utilizados</i>	77
4.5.1.1	Mapa de Declividade	77
4.5.1.2	Mapa de Densidade de escoamento Superficial	78
4.5.1.3	Mapa de Densidade de Drenagem	78
4.5.1.4	Mapa Geológico	79
4.5.1.5	Mapa da Porosidade Superficial e a 100cm	79
4.5.1.6	Mapa da Textura do solo.....	80
4.5.1.7	Mapa da Cobertura Vegetal	80
4.5.2	<i>Hierarquização dos layers (mapas)</i>	81
4.5.3	<i>Mapas de Potencial de Infiltração</i>	82
5	DISCUSSÕES	86
5.1	GEOESTATÍSTICA PARA POROSIDADE DO SOLO.....	86
5.2	CORRELAÇÕES ENTRE POROSIDADE, TEXTURA E GEOLOGIA.	87
5.2.1	<i>Granitóides Quebra-Cangalha</i>	87
5.2.2	<i>Zonas Milonitizadas</i>	87
5.2.3	<i>Complexo Embu</i>	88
5.3	MAPAS DE POTENCIAL DE INFILTRAÇÃO.....	89
5.3.1	<i>Validação dos Resultados</i>	93
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

1 INTRODUÇÃO

Os geoeossistemas atuais mostram-se, de alguma forma, afetados pelas atividades humanas, apresentando diferentes níveis de degradação e reestruturação ambiental. Na região do Vale do Paraíba paulista, é possível encontrar um cenário intensamente modificado pelos processos antropogênicos históricos e atuais, que contribuíram, e contribuem, para a formação de um mosaico complexo de paisagens. A variedade de tipos de ocupação do solo, ecossistemas florestais de mata atlântica modificada/fragmentada, processos erosivos acelerados, drenagens assoreadas e impermeabilizadas pela expansão desordenada da malha urbana compõem este mosaico. As constantes alterações nas relações entre os sistemas bióticos, abióticos e sociais impõem conseqüências aos que, por sua vez, precisam ser entendidas e avaliadas para a proposição de medidas mitigadoras e ou compensatórias.

A escolha da bacia hidrográfica como unidade de estudo, planejamento e gerenciamento da paisagem foi base para diversos trabalhos que utilizam diferentes abordagens metodológicas (Bormann e Likens, 1967; Odum, 1985; Lima, 1994; Pires e Santos, 1995). Há muito tempo tem sido reconhecida nas ciências hidrológicas à existência de ligações entre as características físicas de uma bacia hidrográfica e a qualidade e a quantidade de água que chega aos corpos hídricos, espelhando, desta forma, o grau de interferência antrópica existente na bacia. Neste sentido, a análise dos principais parâmetros do meio físico relacionados (geologia, geomorfologia e geotecnia) permite avaliar, em uma determinada área geográfica, as intervenções propostas e como estas intervenções afetam, em qualidade e quantidade, a disponibilidade hídrica superficial e subterrânea.

Nas regiões tropicais úmidas, os processos atuais modeladores do relevo são, em grande parte, resultantes de ação dos regimes hidrológicos, que detém grande influência sobre os processos geomorfológicos (intemperismo, erosão e deposição) que atuam no substrato geológico (rochas). Mesmo nas diferentes escalas da paisagem, as bacias de drenagem apresentam uma forte relação com os processos geomorfológicos, articulando e organizando

a distribuição do fluxo de água (superficial e subsuperficial), sedimentos e solúveis, que convergem para um ponto de saída comum (exutório da bacia).

As transformações da paisagem impostas pelas ações antrópicas podem produzir alterações no regime hidrológico da bacia hidrografia que, por sua vez, poderão interferir nos processos erosivos nas vertentes, que são os responsáveis pelas mudanças aceleradas (induzidas) e degradação do relevo. A íntima relação entre os processos hidrológicos erosivos e a cobertura vegetal estabelece uma dinâmica particular no geocossistema, que pode ser modificada, por exemplo, frente às contínuas intervenções antrópicas, que geram uma reorganização e um novo direcionamento nos diversos processos reguladores do ambiente. Desta forma, são fundamentais os estudos sobre a componente hidrológica superficial (escoamento) e subsuperficial (infiltração) diante das alterações antropogênicas, sobretudo nos geocossistemas florestais, bem como sua relação com a composição do solo e o balanço hídrico.

Foi perante a estas necessidades e baseado no atual cenário valeparaibano, fortemente modificado pela atuação de empresas florestais, que este trabalho foi estruturado. O estudo apresentado aborda os processos de infiltração e escoamento superficial sob uma perspectiva sistêmica, cruzando dados espaciais do meio físico e de propriedades do solo ligadas a estes processos, em uma área de plantio de eucalipto pertencente a Fibria (antiga Votorantim Celulose e Papel).

A justificativa deste estudo baseia-se no fato que estes processos (infiltração e escoamento superficial) são os responsáveis pela manutenção do escoamento básico dos cursos d'água e, conseqüentemente, pela disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica (Simões et al., 2006), bem como pela alteração da paisagem através dos processos de erosão e também escorregamentos (translacionais). Visto que a área de estudo é diretamente afetada pelas ações antrópicas provenientes das atividades florestais, sobretudo a construção de estradas para a retirada de madeira, é interessante buscar o entendimento da dinâmica da água a fim de que os resultados obtidos possam contribuir na orientação de ações mitigadoras que visam a saúde ambiental e, particularmente para o estudo em questão, a saúde hídrica da região.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia para gerar mapas de potencial de infiltração de caráter semi-qualitativo, na área compreendida pela

Fazenda Santa Edwiges, Lorena (SP), através do cruzamento de informações cartográficas referentes à geologia, geomorfologia, geotecnia e cobertura vegetal. O intuito é que este trabalho sirva como uma ferramenta para a gestão e manejo de bacias hidrográficas, de maneira que possa propiciar a racionalização (planejamento) no uso e ocupação do solo.

Para o completo desenvolvimento do trabalho é necessário ter-se o conhecimento prévio de diferentes tipos de informações referentes a área de estudo. Desta forma, traçou-se alguns objetivos específicos para alcançá-las:

- Reconhecimento da área de interesse através de trabalhos já publicados;
- Trabalhar todos os dados espaciais em ambiente SIG (Sistemas de Informações Geográficas);
- Elaborar um mapa da distribuição espacial da porosidade do solo, através da Geoestatística (krigagem);
- Elaborar uma mapa da distribuição espacial da textura do solo, utilizando conceitos da Lógica Fuzzy juntamente com a Geoestatística (krigagem);
- Cruzar todas as informações pertinentes ao estudo da infiltração da água no solo através da técnica de Álgebra de Mapas;
- Identificar áreas com maior potencial de infiltração, bem como as que favorecem o processo de escoamento superficial.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Interação Solo e Água

Muito se tem falado sobre a importância da conservação dos recursos hídricos e, conseqüentemente, da disponibilidade de água potável. Apesar da abundância de água no planeta, sabe-se que 97% desta é de origem salgada, fato este que impossibilita o consumo humano, animal e é também imprópria para a utilização na agricultura. Desta forma, resta apenas uma pequena parcela de água doce para ser utilizada, sendo que aproximadamente um terço desta está localizada em reservatórios subterrâneos.

Basicamente, estes reservatórios subterrâneos juntos com os oceanos, lagos, rios e a atmosfera compõem o ciclo hidrológico, que é dinamizado por diferentes processos contínuos que a água atravessa, onde é possível que suas moléculas sejam recicladas.

Além das condições da atmosfera dos corpos hídricos, é válido ressaltar a importância que o solo apresenta para que este ciclo seja mantido de forma saudável. Depois de evaporar, condensar e precipitar, a água chegará à superfície terrestre, onde diferentes fenômenos serão desencadeados. Dependendo das condições, do uso e do estado de conservação deste solo, tanto para uma gota de água quanto para uma grão de solo, os resultados podem ser vários, sendo muitas vezes prejudiciais à saúde hídrica de uma bacia, município ou qualquer unidade territorial por onde aquela porção de água ou solo passem.

Tendo isso em vista, observou-se nas últimas décadas uma grande intensificação de estudos e reflexões sobre a conservação do solo e sua íntima ligação com os recursos hídricos. Além da importância socioeconômica que o solo possui por ser a base de diversas atividades agrícolas necessárias para a sobrevivência do homem, sabe-se que dentro de um processo de interação solo/água, cabe ao solo armazenar e dar suporte para o reabastecimento da água nos ambientes superficiais (TEXEIRA et al., 2000; SOARES, 2005; BERTOL, 2009).

Além disso, sabe-se que esta interação corresponde também como a base de todas as outras existentes que se desenvolvem dentro dos geocossistemas. Uma vez alterada esta dinâmica, portanto, diversos outros processos, em diferentes escalas, poderão também ser alterados. A consequência disso varia para cada caso específico, pois depende da intensidade com que estas alterações ocorrem, do tempo em que elas permanecem agindo, da resiliência do meio, entre outros fatores.

Porém, no que se refere as alterações impostas pelo homem, sabe-se que a grande maioria destas favorecem diretamente para o desenvolvimento de cenários degradados, principalmente se estudos sobre a dinâmica destes geocossistemas não são levados em consideração.

Ao contrário do que muitos pensam, sob condições de uso, ocupação e manejos inadequados, o solo torna-se um recurso degradável, limitado e finito. Conseqüentemente, diversos cenários insustentáveis ao desenvolvimento humano são observados, tais como: grandes pastagens não manejadas favorecendo a degradação do solo devido ao pisoteamento do gado; longos ciclos de monocultura que o empobrecem, diminuem a espessura da camada de matéria orgânica e expõe suas camadas mais frágeis; ocupação irregular, principalmente em encostas, que desestabilizam o solo; tráfego de veículos pesados, que compactam as camadas superficiais, entre outros.

De uma forma geral, estes processos trazem uma série de conseqüências ao solo (impermeabilização, desagregação das partículas, entre outros tipos de degradação) que, por conseguinte, promovem elevado escoamento superficial e subsuperficial, favorecendo a perda de solo através de processos erosivos (erosão hídrica) e escorregamentos (translacionais). Estes processos degradantes correspondem aos principais agentes causadores do empobrecimento tanto da água quanto do solo, pois constituem o mais importante mecanismo de remoção de solo, de seus elementos minerais e também de agrotóxicos, que serão levados até os mananciais de água.

O solo é removido e carregado até os mananciais provoca o assoreamento, que diminui drasticamente a quantidade de água disponível na superfície, principalmente em rios e barragens. Ao serem retirados do solo alguns de seus nutrientes (fósforo, nitratos, etc.), seja por carreamento das partículas ou por lixiviação, além de causar o seu empobrecimento, a eutrofização nos mananciais é favorecida. No caso do transporte de defensivos agrícolas, prejuízos são causados tanto para os agricultores, pois suas culturas estarão mais vulneráveis, quanto para o meio ambiente, uma vez que substâncias nocivas aos organismos vivos comprometerão a potabilidade da água dos mananciais.

2.2 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico pode ser visto como um conjunto de reservatórios, ou áreas de armazenamento, ligados à uma série de processos que causam o deslocamento da água entre estes reservatórios. O maior reservatório é constituído pelos oceanos, que detêm cerca de 97% da água da Terra em forma salobra, consideradas impróprias para o uso. Os 3% restantes são de água doce e possuem um papel de grande importância para a nossa sobrevivência. Porém, destes 3% de água doce, cerca de 69% estão armazenados em forma de gelo na Antártica e na Groenlândia. Algo em torno de 30% desta água doce é correspondente às águas subterrâneas, armazenadas em sedimentos e rochas abaixo da superfície da terra. Sendo assim, a água doce que vemos nos rios, riachos, lagos, e das chuvas correspondem a aproximadamente a 1% da água doce presente na Terra e menos de 0,1% do total de água. Existe ainda uma diminuta parcela que está presente na atmosfera e também retida no organismo dos seres vivos.

Toda essa diversidade da distribuição da água no planeta só é possível devido às suas propriedades. Ela é a única substância que, sob condições normais, pode ser encontrada em qualquer um dos três estados da matéria, o que implica num constante intercâmbio entre os diferentes sistemas no qual está inserida. Esta dinâmica caracteriza o ciclo hidrológico e corresponde à uma série de processos aos quais a água é submetida, como a evaporação, a precipitação, a infiltração, a percolação, a transpiração, o armazenamento superficial, o escoamento superficial e sub-superficial, ilustrados na Figura 1.

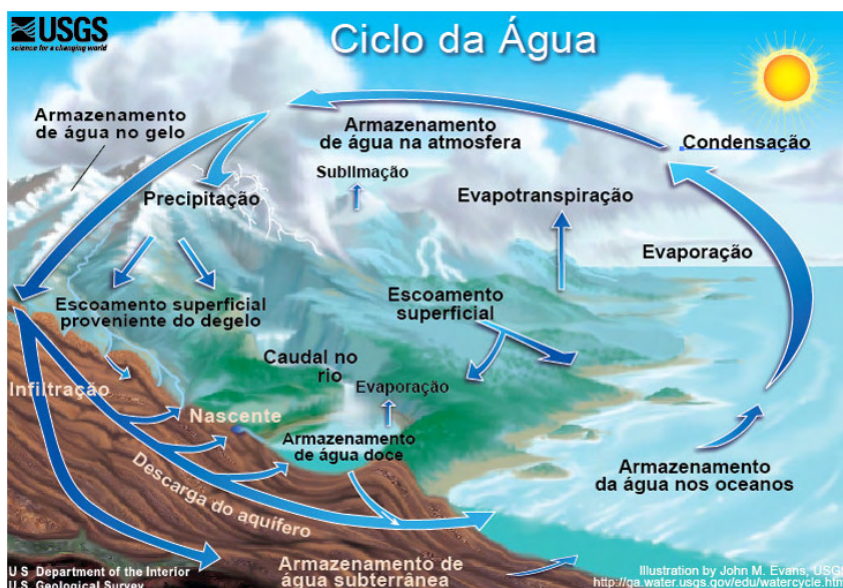


Figura 1- O ciclo hidrológico (USGS, 2010).

Apenas para fins descritivos, escolheu-se a precipitação como ponto de partida do ciclo hidrológico. A precipitação, cuja forma mais freqüente observada trata-se da chuva, é a etapa que ocorre quando o vapor de água presente na atmosfera se aglutina formando pequenas gotículas, que se agrupam até possuírem tamanho e peso suficiente para precipitar sob a forma de chuva, granizo ou neve. Quando precipitada, a água pode ter três destinos diferentes: cair diretamente no solo, ter sua queda *interceptada* pela cobertura vegetal ou incidir sobre um corpo d'água e ficar disponível para ser evaporada novamente.

A parte da precipitação que é *interceptada* antes de tocar o solo caracteriza outra etapa. Neste caso, a partícula de água incidente pode ficar retida na vegetação até ser evaporada ou cair sobre o solo, quando a precipitação exceder a capacidade de retenção da vegetação ou pelo balanço das folhagens causado pelo vento.

Ao tocar o solo, o processo de infiltração poderá ser iniciado, que corresponde a passagem da água da atmosfera para o interior do solo. Este processo é facilitado ou dificultado por uma série de fatores referentes ao solo (características pedológicas) e às características do terreno (geomorfologia) em que a água toca. Caso a água não consiga infiltrar, a tendência é se acomodar em depressões do terreno ou escoar superficialmente.

Esta parcela de água que caracteriza o *escoamento superficial* será impulsionada pela gravidade das cotas mais altas para as mais baixas. Ao longo do tempo, o fluxo repetitivo de água passando por locais específicos de uma encosta acabam formando pequenos sulcos no solo, comumente chamados de veios. Dependendo das condições do solo por onde estes veios passam, a água pode até conseguir se infiltrar. Caso contrário, a tendência é que estes veios se encontrem e formem pequenos cursos d'água, que continuam fluindo até encontrar riachos que formarão rios, de volume cada vez maior, até atingir um oceano ou um lago.

Já a parcela da precipitação que infiltrou-se no solo pode seguir dois caminhos. O primeiro são os corpos d'água subterrâneos (zona de saturação). Esta etapa do ciclo hidrológico corresponde ao *escoamento subterrâneo*, que ocorre de forma bastante lenta, visto a dificuldade da água se movimentar entre os interstícios do substrato rochoso. Por outro lado, se o *escoamento* da água infiltrada acontecer acima da camada rochosa, na zona vadosa do solo (camada não-saturada), ocorre chamado de *escoamento de base*. Esta parcela da água vai se movimentando subsuperficialmente até aparecer como escoamento superficial, que é o responsável por manter a vazão de base dos rios em períodos de estiagem.

Existe também uma parcela de água que é armazenada nas profundidades mais superficiais do solo e que será consumida pela vegetação, onde, após realizada sua absorção, volta à atmosfera através das folhas das plantas, em um processo chamado *transpiração*.

Antes mesmo da chuva tocar o solo, o fenômeno de *evaporação* já se inicia, logo após a formação da precipitação. A evaporação ainda pode ocorrer diretamente do solo que não possui cobertura vegetal. Nos lagos, oceanos, rios e outros reservatórios de água a evaporação devolve a água à atmosfera, completando o ciclo hidrológico, estando, outra vez disponível para ser precipitada.

2.3 Bacias Hidrográficas – Conceitos básicos e definições

Com o desenvolvimento de diferentes estudos hidrológicos, várias definições para bacias hidrográficas foram sendo criadas. De modo geral, as definições propostas se assemelham com aquela dada por Barrella (2001), que a define como um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, delimitada pelas regiões mais altas do relevo (espigões, divisores de água), onde as águas das chuvas podem ou escoar superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram-se no solo abastecendo as nascentes e o freático. As drenagens superficiais escoam das cotas mais altas para as mais baixas, formando riachos e rios. As cabeceiras destas bacias são formadas por riachos que brotam em terrenos com declividades mais elevadas, geralmente localizadas em serras e montanhas. A medida que as águas destes riachos descem, juntando-se a outros em relevos mais suaves (zona de transferência), aumenta o volume e forma os primeiros rios que, por sua vez, continuam seus trajetos recebendo água de outros tributários, os quais formam os rios maiores em áreas mais planas (zona de deposição) até desembocarem no oceano (Figura 2).

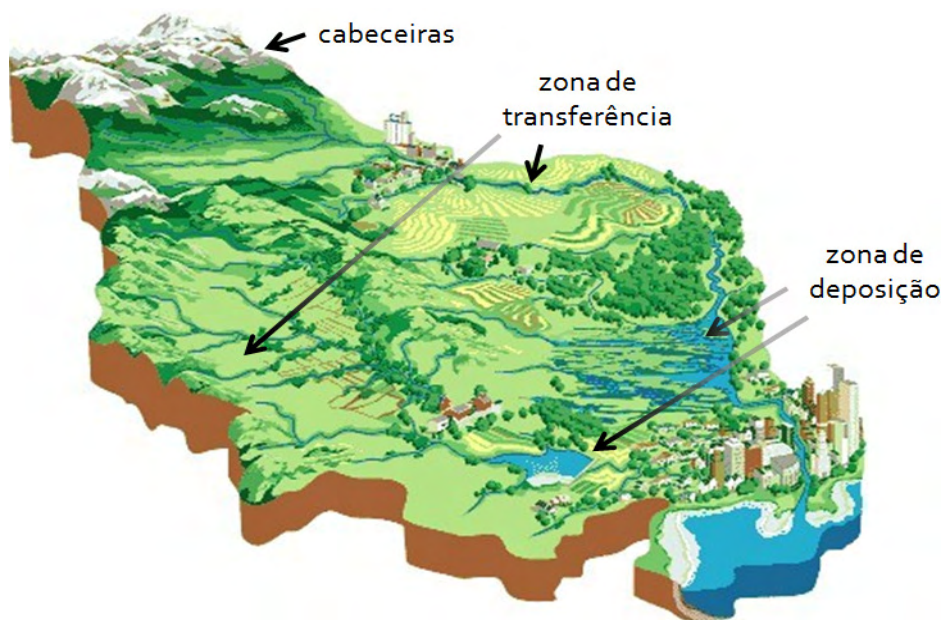


Figura 2 - Ilustração de uma bacia hidrográfica e sua compartimentação (Adaptado de: Natural Resources Conservation Service apud Agriculture and Agri-Food Canada, 2007).

Christofolletti (1980) contribuiu para incluir as características geomorfológicas na definição de bacia hidrográfica, de modo que, para o autor, ela seria um sistema aberto, que recebe suprimento contínuo de energia através do clima reinante e que, de forma sistêmica, perde energia através do deflúvio. Nesta mesma linha de raciocínio, Lima e Zakia (2000) afirmam que este balanço energético pode ser descrito por variáveis interdependentes e que oscilam em torno de um padrão. Para estes autores, mesmo quando perturbadas pelas ações antrópicas, haverá um equilíbrio dinâmico entre estas variáveis. Assim, qualquer processo que modifique tanto o recebimento quanto a liberação de energia, ou também a forma do sistema, acarretará em uma mudança compensatória natural que tende a minimizar o efeito sobre a modificação, restaurando o estado do equilíbrio dinâmico.

A fim de facilitar a abordagem sobre a utilização e conservação dos recursos hídricos, as bacias hidrográficas vêm sendo tratadas como unidades físicas de reconhecimento, caracterização e avaliação. Neste âmbito, diferentes escalas de abordagem se tornaram necessárias, propondo entender como cada processo (natural ou antrópico), pode interferir no equilíbrio existente dentro de cada sistema. Com isso, termos como sub-bacias, microbacias e pequenas bacias hidrográficas foram incorporados na literatura técnico-científica, embora não haja uma convergência conceitual entre os autores. Mais detalhes sobre as diferentes denominações encontradas na literatura podem ser encontradas em Teodoro et al. (2007).

Para que não haja qualquer tipo de divergência, neste trabalho é importante ter-se o conceito de microbacia bem esclarecido, o qual seguirá a definição de dois autores diferentes:

i) microbacias são áreas formadas por canais de 1ª, 2ª e, em alguns casos de 3ª ordem, devem ser definidas como base na dinâmica dos processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos. As microbacias são áreas frágeis e frequentemente ameaçadas por perturbações, nas quais as escalas espacial, temporal e observacional são fundamentais (CALIJURI & BUBEL, 2006);

ii) microbacia é considerada como a menor unidade do ecossistema, onde pode ser observada a delicada relação de interdependência entre os fatores bióticos e abióticos, em que perturbações podem comprometer a dinâmica de seu funcionamento; sendo assim, esse conceito visa à identificação e o monitoramento de forma orientada dos impactos ambientais (MOSCA, 2003).

É válido que ainda há o ponto de vista de programas de políticas públicas do uso do solo (programas de manejo de microbacias), onde o critério de caracterização da microbacia, neste caso, é eminentemente político e administrativo (ZAKIA, 1998), não fazendo parte das definições utilizadas neste trabalho.

As microbacias de cabeceiras, às vezes chamadas de cabeceiras de drenagem, se desenvolvem no domínio das encostas e apresentam topografia côncava sobre as quais originam ou avançam as cabeças dos canais (COELHO NETTO, 2003). O termo “cabeça do canal” refere-se às extremidades de montante dos canais erosivos que avançam progressivamente através dos fundos de vales de cabeceiras de drenagem. Estes canais erosivos das cabeceiras de drenagem drenam através da rede principal de canais fluviais, integrando os processos de encostas com os processos fluviais. Assim a rede interconectada de canais fluviais constitui-se na principal via de descarga da bacia hidrográfica, ou sub-bacia, a qual está inserida. Por este motivo, tornou-se um dos principais objetos de grande interesse hidrológico e geomorfológico, especialmente a partir de estudos de Horton na década de quarenta. Sato (2008) ressalta que a cabeceira de drenagem é um componente especial do sistema fluvial, porque é uma área onde a transição dos processos de denudação para transporte erosivo é caracterizada pela convergência em direção à porção terminal da rede de canais.

2.4 Infiltração da água no solo

A infiltração apresenta grande relevância dentro do ciclo hidrológico. Segundo Teixeira, et al. (2000), é processo mais importante de recarga da água armazenada no subsolo, que depende diretamente das características do solo de cobertura e das características da superfície.

Libardi (2000) define a infiltração como sendo a entrada de água no solo através de sua superfície, ou seja, na interface que existe entre solo-atmosfera. Dunne & Leopold (1978) vão um pouco mais além, definindo este processo como o resultado de relações interdependentes na entrada de água na superfície do solo, na armazenagem e na transmissão de umidade do interior do solo. Assim, considera-se que a água da chuva que chega até o solo pode infiltrar-se e movimentar-se para o interior do maciço e, dependendo das condições da superfície, o excesso escoar pela superfície.

Ao tocar o solo, a entrada de água é favorecida pela gravidade ou capilaridade, movimentando-se da superfície (onde se supõe haver aporte de água) para o interior do maciço. Esta passagem da água ocorre entre os poros, avançando como uma frente de umedecimento (frente de saturação), com o decorrer de tempo.

O processo de infiltração inicia-se na superfície e ocorre na *zona não-saturada*, (zona vadosa ou de aeração), onde os espaços que existem entre os grãos do solo podem estar parcialmente preenchidos por água, mas nunca completamente. Imediatamente abaixo desta encontra-se a zona onde a água ocupa todos os poros, designada *zona saturada*. Estas duas zonas são delimitadas pela *superfície freática*, ou *nível de água subterrânea* (Figura 3).

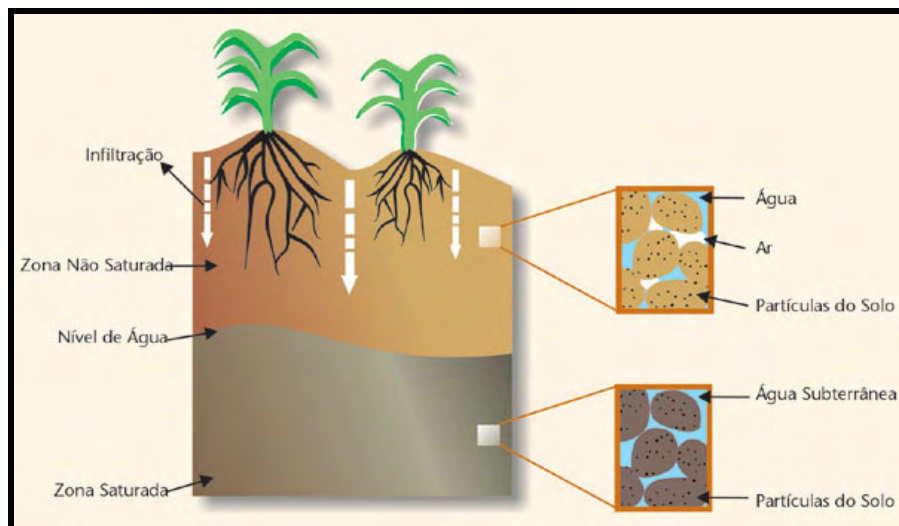


Figura 3 - Perfil de solo ilustrando a zonas saturada e não-saturadas (Teixeira et al., 2000)

Para quantificar a infiltração da água no solo, é comum utilizar a *velocidade ou taxa de infiltração* como parâmetro, definida com a quantidade de água que atravessa a unidade da área da superfície do solo, por unidade de tempo. Sabe-se através de dados experimentais (Araújo Filho e Ribeiro, 1996, Wilson, 1997) que durante o processo de infiltração, se o solo estiver inicialmente seco, a velocidade de infiltração irá diminuir ao longo do tempo até atingir um valor constante, denominado capacidade de infiltração. Ou seja, a menor velocidade com que a água consegue se infiltrar no solo, após sua saturação.

A alta velocidade de infiltração nos momentos iniciais da chuva ocorre devido a existência de um gradiente matricial (diferença de potenciais) existente entre as zonas úmidas e secas do solo. Entretanto, no decorrer do processo de infiltração, este gradiente é diminuído, pois a tendência é que as camadas vão se umedecendo mais até a chuva cessar. Ou seja, a medida que a saturação vai sendo atingida, as diferenças de potenciais diminuem e, conseqüentemente, a velocidade de infiltração também.

Quando a velocidade infiltração torna-se constante, já no estágio de regime estacionário, esta pode ser igualada a condutividade hidráulica saturada. Desta forma, para eventos chuvosos com intensidades menores ou iguais a condutividade hidráulica saturada, admite-se que toda água irá infiltrar no solo. Por outro lado, para os casos onde a intensidade da chuva a excede, a infiltração será total apenas nos instantes iniciais, até que a superfície do solo seja saturada. A partir deste instante, tem-se o início do fluxo superficial (*runoff*), ou seja, a quantidade excedente de água que irá escoar sobre a superfície do terreno.

Quando o processo de infiltração é cessado, parte da água no seu interior propaga-se para profundidades maiores e outra é transferida para a atmosfera por evaporação ou por transpiração dos vegetais. Esse processo faz com que o solo vá recuperando sua capacidade de infiltração, tendendo a um limite superior a medida que as profundidades superiores do solo vão se tornando mais secas.

2.4.1 Zona não-saturada (zona vadosa)

Na zona não saturada (vadosa) a movimentação da água é fornecida fundamentalmente pela força da gravidade, pelas diferenças de pressão internas e, principalmente, pelas diferenças de potencial hidráulico. Porém, este movimento está sujeito a outras forças, como as forças moleculares e tensões superficiais, resultando em *águas higroscópicas, peliculares e capilares*.

A zona vadosa pode ser dividida em 3 faixas: a faixa superior, onde a água se encontra próxima a superfície do solo; a intermediária e a franja de capilaridade. Seus limites não são bem definidos, já que há uma transição gradual de uma para outra com variações do teor de umidade (Figura 4).

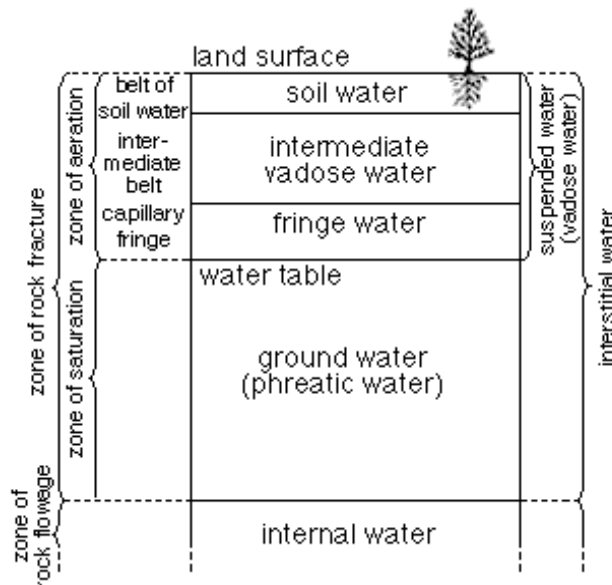


Figura 4 - Zona vadosa com suas sub-divisões (Lane, 1960).

A faixa superior da zona vadosa, onde a água está bem próxima da superfície, é de grande importância para atividades agrícolas, pois fornece a água para o crescimento das plantas. Esta parcela de água está sujeita a retornar para a atmosfera tanto pela evaporação quanto pela absorção das raízes das plantas e, em seguida, transpirada pelo vegetal. A água mantém-se nesta faixa devido à duas forças atuantes: atração molecular e ação da capilaridade, que agem no sentido contrário ao da força gravitacional (Tabela 1).

Tabela 1 - Classes da água subsuperficial. Adaptado de: Oliveira e Brito (1998).

ZONA DE	CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA	FASE	PRESSÃO	PROCESSO
Aeração ou vadosa	<i>Higroscópica</i> (saturação capilar descontínua)	Gasosa	P = atmosférica	Infiltração ↓ Fluxo Descendente
	<i>Pelicular</i> (saturação capilar semicontínua)	Líquida	P < Atmosférica	
	<i>Capilar</i> (saturação capilar contínua)	Líquida	P < Atmosférica	
Saturação	<i>Água subterrânea</i> (confinada ou não confinada)	Líquida	P > Atmosférica	Percolação ↔ Fluxo lateral

A atração molecular tende a reter uma fina película de água sobre a superfície de cada partícula sólida (grãos) do solo. Esta atração é causada pela interação das forças eletrostáticas existentes entre os compostos minerais que formam cada partícula de solo e as moléculas de água. Já a capilaridade retém água nos pequenos interstícios das partículas do solo. Somente quando a água penetra substancialmente nesta faixa, vencendo a capacidade de retenção de água pelas forças capilares é que a mesma começa a se deslocar verticalmente para baixo.

Na faixa intermediária da zona não-saturada, da mesma maneira que na faixa sobrejacente, a água é retida por atração molecular e capilaridade. Porém, o que a diferencia esta faixa é que, por ser mais profunda, a água não é mais absorvida pelas raízes dos vegetais e não tendem a se evaporar. Logo abaixo desta faixa encontra-se a franja capilar, que retém a água logo acima da zona de saturação por capilaridade, opondo-se à ação da gravidade.

Após infiltrar-se pela zona de aeração, ou zona vadosa, é necessário que a água da chuva ultrapasse a franja capilar para, somente depois, chegar à zona saturada. Ao atravessar a franja capilar, o fluxo da água ocorre através dos capilares existentes neste solo, pelo fenômeno da sucção, e depende da quantidade de capilares presentes e dos seus diâmetros. O fluxo através dos capilares, quando ocorre a pequenas velocidades, é chamado de fluxo laminar, sendo que o mesmo fica confinado aos capilares, tendo um sentido definido e não ocorrendo deslocamentos transversais do líquido nem misturas no processo de escoamento (OLIVEIRA E BRITO, 1998)

2.4.2 Fatores que influenciam o processo de infiltração de água no solo

A infiltração da água no solo depende de muitos parâmetros físicos e também de fatores relacionados às características do local onde a água chega. Segundo Harden & Scruggs (2003), a infiltração não é um processo único, mas sim uma mistura de processos que envolvem a força da gravidade e a força de atração entre as moléculas de água, de modo que caracterizam três processos distintos: a) entrada de água na superfície, b) estocagem de água no solo e c) transmissão de umidade dentro do solo. Os principais fatores e a descrição de como influenciam no processo de infiltração é apresentado a seguir.

2.4.2.1 Textura do Solo

A textura do solo não só influencia o processo de infiltração somente pelo tipo de partículas que o compõem, mas principalmente pela distribuição granulométrica e a estrutura

das partículas que formam a matriz do solo. Estas características definem a porosidade do solo e o grau de interligação entre um poro e outro, que por sua vez irão caracterizar uma maior ou menor capacidade de transmissão da água através do solo. Por isso, recomenda-se sempre avaliar a textura do solo não só quanto ao tipo de partícula, bem como por meio de dados adicionais referentes à porosidade do solo.

Teoricamente, solos que apresentam textura predominantemente argilosa tendem a apresentar uma menor condutividade hidráulica quando comparados com solos de textura arenosa. Porém, Ahrendt (2005) alerta que isso nem sempre ocorre de fato, pois em regiões tropicais é possível encontrar solos quimicamente evoluídos que possuam algum tipo de argilomineral e/ou matéria orgânica, fazendo com que estes solos apresentem maior velocidade de infiltração do que as areias. No caso de argilominerais, deve-se ressaltar que a presença de minerais expansivos como a montmorilonita ajudam a diminuir a taxa de infiltração, enquanto a presença de minerais não expansivos, como a caulinita, agem de forma contrária (ASCE, 1996).

Além desses aspectos, a magnitude da infiltração é severamente reduzida pela formação ou presença do selamento superficial, fenômeno motivado pela pequena porosidade desta camada e à dominância de poros de pequeno diâmetro. Reichert et al. (1992), afirmam que a textura do solo afeta sensivelmente o salpico de partículas com impacto das gotas de chuva, o que contribui para uma redução da porosidade da camada superficial do solo. Além do impacto da gota, Morin & Van Winkel (1996) citam a dispersão físicoquímica das argilas do solo como causas da formação do selamento superficial e, conseqüentemente, da redução da taxa de infiltração. Ou seja, o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo pode reduzir a capacidade de infiltração de água no solo e propiciar a formação de escoamento superficial.

A Tabela 2 apresenta alguns valores comparativos da condutividade hidráulica saturada (velocidade de infiltração final) que são esperados para diferentes tipos de textura.

Tabela 2 - Variação esperada da condutividade hidráulica saturada para diferentes texturas do solo (Adaptado de Scott, 2001)

Textura do Solo	Condutividade Hidráulica Saturada	
	m/s x 10 ⁻⁷	mm/h
Arenosa	> 5,5	> 2,0
Areno Siltosa	2,8 - 5,5	1,0 - 2,0
Argilosa	0,3 - 1,4	0,1 - 0,5

2.4.2.2 *Porosidade do solo*

A distribuição e as características dos poros existentes entre os grãos de solo condicionam seu comportamento físico-hídrico. O estudo da porosidade é, portanto, uma das maneiras de caracterizar e quantificar os processos físicos e hidráulicos que ocorrem no solo (Klein & Libardi, 2002).

O arranjo das partículas do solo forma agregados, produzindo micro e macroporos que são responsáveis por reterem água e/ou ar em sua estrutura. Através desta organização dos grãos determina-se a porosidade do solo, propriedade esta que regula o arejamento do solo, o armazenamento de água e de ar e também as perdas de elementos químicos solúveis presentes nos minerais.

Considerando que uma amostra de solo tenha um certo volume total (V_t), este é formado pela soma dos volumes correspondente às partículas que formam o solo (V_s) e o volume de vazios (V_v). O volume de vazios é caracterizado pela parcela referente ao volume ocupado pela água (V_a) e também pelo ar (V_{ar}) nos interstícios do solo. Sendo assim, a porosidade (η) é uma medida em porcentagem que apresenta a relação entre o volume de vazios e o volume total do solo:

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} \quad \text{(Equação 1)}$$

A variação da porosidade se deve a diversos fatores, entre eles: à forma e imbricamento dos grãos, à presença de materiais de granulometria fina (argilas, siltes) que ocupam lugares intergranulares, à presença de materiais cimentantes (óxidos, carbonatos) que preenchem total ou parcialmente os poros do solo e a distribuição granulométrica. A heterogeneidade dos grãos possui, por sua vez, uma importância considerável na porosidade. Os grãos menores tendem a se concentrar nos espaços intersticiais deixados pelos grãos maiores, diminuindo o índice de vazios e, conseqüentemente, a porosidade.

Nos solos argilosos podem ocorrer porcentagens muito elevadas de porosidade (valores geralmente entre 40% e 70%). Porém, porosidades elevadas em solos argilosos não significam facilidade para a água se movimentar. Isso é explicado devido ao fato de que as partículas dos argilo-minerais, que compõem os solos argilosos, são muito pequenas (menores que 0,02mm) e tendem a se organizar de forma mais condensada. Assim, os poros existentes tornam-se também diminutos, dificultando a infiltração e a percolação da água no seu interior.

É observado que a porosidade das areias varia muito. Os seguintes exemplos demonstram tais variações, embora não seja uma regra geral apresentarem valores dentro destas faixas: areias de aluviões fluviais variam entre 29 a 39 %, as areias marinhas de 20 a 41 % e as areias de dunas entre 34 a 39 %. Na prática, a porosidade das areias puras não ultrapassa 40%. Apesar dos solos arenosos não serem necessariamente os de maior porosidade, estes são bem arejados (devido ao grande tamanho dos grãos e, conseqüentemente, de seus vazios), o que justifica a facilidade de percolação da água, caracterizando como solos de boa permeabilidade.

De modo geral, a porosidade do solo subsuperficial é um pouco mais baixa do que no solo de superfície devido à compactação pela gravidade, que força a movimentação dos grãos de solo de forma que se reorganizem e fiquem mais próximos, de maneira que se organizem formando uma estrutura mais densa. A Tabela 3 apresenta valores médios da porosidade encontrados em diferentes tipos de solo.

Tabela 3 - Variações de porosidades representativas para materiais sedimentares (FETTER, 1994).

Tipo de solo	Porosidade (%)
Argila	45 a 55
Silte	40 a 50
Mistura de areia média a grossa	35 a 40
Areia uniforme	30 a 40
Mistura de areia fina a média	30 a 35
Pedregulho	30 a 40
Pedregulho e areia	20 a 35

A heterogeneidade das macroporosidades existentes no solo tem grande influência no processo de infiltração de água no solo, de modo que, geralmente, causam um aumento da taxa de infiltração. Jakkola (1998), afirma que essas estruturas porosas podem potencialmente formar redes anastomosadas e efetivamente drenar a água através de um talude mais rapidamente que o fluxo natural entre a matriz e o solo. Por isso é importante ter o conhecimento da variabilidade espacial da porosidade do solo tanto lateralmente quanto verticalmente, analisando perfis em diferentes profundidades.

Porém, quanto a variabilidade espacial, pode-se dizer que porosidade do solo é complexa. Os modelos tradicionais de predição consideram a porosidade contínua, fato este que não é capaz de esclarecer diversas características anômalas observadas em campo e produz somente resultados aproximados. Além disso, ao atribuir a continuidade para a

porosidade, não é possível modelar a influência dos fatores ambientais que afetam a geometria dos poros. Tentando prever melhor a distribuição espacial da porosidade, alguns modelos mais complexos foram propostos, incluindo fractais, teoria da bolha, processo booleano do grão, esfera, entre outros (Horgan, 1993). Entretanto, por ser uma variável do solo, sabe-se que modelos estocásticos baseados na geoestatística apresentam-se mais condizentes com a realidade, mesmo não prevendo mudanças bruscas em sua distribuição.

2.4.2.3 Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal retarda parte da água que atinge o solo através da interceptação física que as folhagens causam nas gotas de água. Isto faz com que o volume de água que incide diretamente no solo seja menor, além de diminuir a energia de impacto transmitida pela gota de água ao solo.

Segundo Silva & Schulz (2002), os danos causados pelas gotas de chuva que golpeiam o solo constituem o primeiro passo no processo da erosão, independentemente do grau de inclinação do terreno. As gotas podem ser consideradas bombas em miniatura, que golpeiam a superfície do solo, rompendo os grânulos e torrões, reduzindo-os a partículas menores, lançando-as para longe e, ainda, diminuindo a capacidade de infiltração de água no solo (Bertoni & Lombardi Neto, 1990), caracterizando o fenômeno *splash*.

Guerra (1999) chama atenção para a formação de crostas superficiais que provocam a selagem dos solos quando há a incidência direta da gotas de chuva no solo. Segundo este autor, o papel do *splash* varia não só com a resistência do solo ao impacto das gotas de água, mas também com a própria energia cinética das gotas de chuva. Dependendo da energia impactada sobre o solo, vai ocorrer, com maior ou menor facilidade, a ruptura de seus agregados, formando as crostas que provocam o selamento superficial. A compactação resultante do impacto de gotas de chuva cria uma crosta superficial de 0,1 a 3,0 mm de espessura (Farres, 1978), que pode implicar redução da capacidade de infiltração superior a 50%, dependendo das características do solo (MORIN et al., 1981).

Desta forma, a presença da vegetação retarda o processo de escoamento superficial, aumentando o tempo de contato entre a água e a superfície do solo, possibilitando que uma maior quantidade de água consiga se infiltrar. Além disso a presença das raízes aumenta a porosidade da porção superficial do solo, fazendo com que haja um aumento da capacidade de infiltração (JAAKOLA, 1998).

2.4.2.4 *Umidade Inicial do Solo*

A umidade do solo no momento em que o processo de infiltração é iniciado está relacionada com o tempo necessário para que a velocidade de infiltração atinja um valor constante, onde o solo estará saturado (condutividade hidráulica saturada). Desta forma, Scott (2001) afirma que quanto maior a umidade inicial do solo, menor será a taxa de infiltração inicial e, conseqüentemente, a velocidade constante será alcançada de forma mais rápida.

Por outro lado, sabe-se que um solo que se encontra inicialmente seco requer maior quantidade de água para preencher todos os poros e, assim, mais tempo será necessário para alcançar o regime estacionário (velocidade de infiltração constante). Além disso, Freyberg et al. (1980) ressaltam que a umidade inicial do solo irá também influenciar na profundidade alcançada pela frente de saturação. Os autores demonstram que para um mesmo volume de água acumulado e em um mesmo intervalo de tempo, um perfil de solo com umidade inicial mais alta irá apresentar uma profundidade de saturação maior do que um perfil de solo com umidade inicial baixa.

2.4.2.5 *Declividade do Terreno*

Diferente dos outros fatores anteriormente discutidos, a declividade do terreno não influencia na velocidade de infiltração propriamente dita, mas sim na quantidade de água disponível da superfície do terreno para ser infiltrada e o tempo em que esta permanece ali.

Quando a água toca o solo em terrenos mais íngremes, a tendência é que ela escoe mais rapidamente pela superfície, diminuindo o tempo de contato entre a água e a superfície do terreno e, conseqüentemente, a disponibilidade para ser infiltrada nestes locais. Por outro lado, em declividades mais baixas onde os terrenos são planos ou possuem pequenas ondulações, o escoamento superficial é retardado, propiciando condições para que a água infiltre, uma vez que a tendência é que a água permaneça nestes locais por mais tempo.

Além disso, Miyazaki (1993) afirma que a declividade influencia na profundidade alcançada pela frente de saturação e no tempo necessário para que esta saturação ocorra, como pode ser observado na Figura 5.

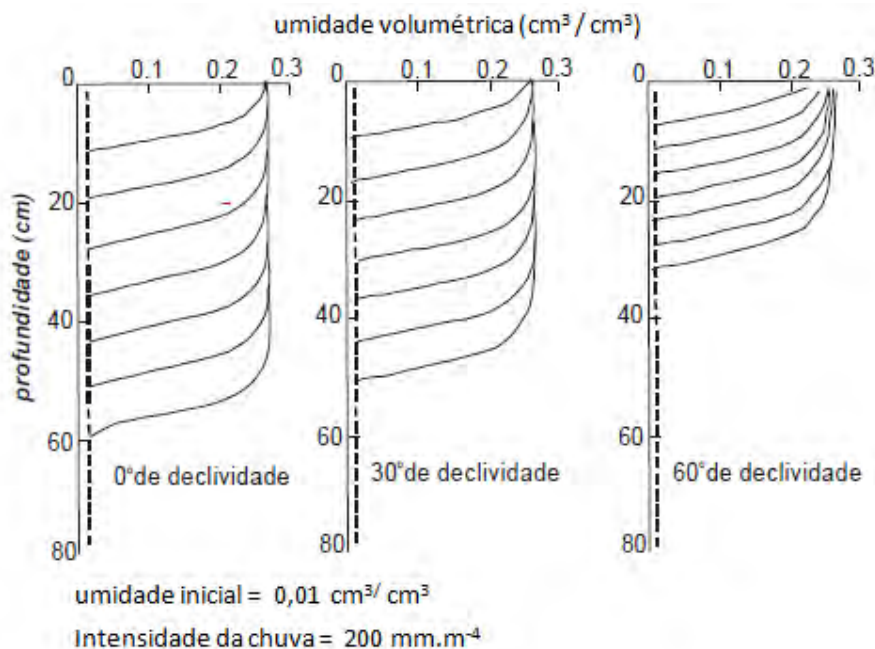


Figura 5- Perfis de umidade para três diferentes situações de declividade (Ahredt, 2005).

2.4.3 Condutividade Hidráulica Saturada

Para quantificar o processo de infiltração é necessária a caracterização de parâmetros que representem o modo como a água se movimenta no solo. Dentre os parâmetros que são comumente utilizados estão a velocidade de infiltração (v_i), a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e não saturada ($K(\theta)$) e a difusividade hidráulica ($D(\theta)$). O primeiro destes está relacionado ao modo com que a água penetra a partir da superfície do terreno, enquanto que os demais estão relacionados ao movimento da água no interior de maciço. Entretanto, será discutido neste trabalho apenas a condutividade hidráulica saturada, visto que ela significa o menor valor da taxa de infiltração que o solo pode atingir, que acontece após a saturação completa do solo.

A condutividade hidráulica constitui uma das mais importantes propriedades relacionadas à movimentação da água nos solos. Devido aos gradientes de potencial existentes, a água líquida é capaz de fluir através dos poros do solo, sendo a direção do fluxo da zona com maior potencial para uma com menor potencial, que são definidos pelas diferenças de umidade e, conseqüentemente, da sucção mátrica.

O conhecimento das propriedades hidráulicas do solo é imprescindível em qualquer estudo relacionado ao transporte de água ou de nutrientes e até mesmo de defensivos agrícolas para as profundidades subterrâneas e seus impactos ao meio ambiente. Klute &

Dirksen (1986) definem que a condutividade hidráulica é a medida do solo em transmitir água e determina o comportamento do fluxo de água juntamente com o processo de retenção. O movimento da água, seja em condições saturadas ou não, é altamente dependente da condutividade hidráulica.

A condutividade hidráulica pode ser definida como um parâmetro físico-hídrico do solo, que se caracteriza pela capacidade do solo em deixar passar água através do seu perfil. Scherpinski (2003) afirma que este parâmetro está diretamente ligada ao tamanho, volume e distribuição dos poros do solo (porosidade), apresentando grande variabilidade para os diferentes tipos de solo existentes.

A determinação da condutividade hidráulica saturada pode ser feita utilizando-se métodos de laboratório e de campo. Os métodos de laboratórios apresentam o inconveniente de utilizarem amostras de solo de tamanhos reduzidos. Já os métodos de campo, apesar de mais trabalhosos, são mais precisos, tendo em vista um maior volume de solo amostrado, a não alteração da estrutura natural do solo devido aos processos de amostragem e o valor da condutividade hidráulica é determinado à direção predominante do escoamento da água qual seja, a vertical (PEREIRA et al., 2001).

Dentre diversos métodos que podem ser utilizados para a determinação da condutividade hidráulica do solo em condições de campo tem-se o que utiliza o permeâmetro de Guelph, o qual foi empregado na pesquisa de onde provém os dados para este trabalho. Seu esquema ilustrativo encontra-se na Figura 6.

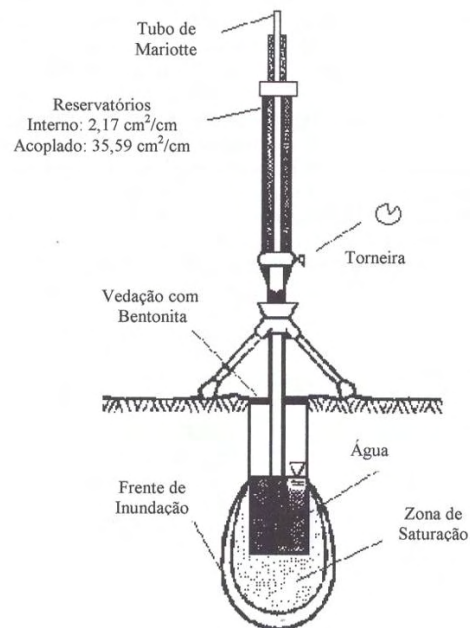


Figura 6 - Permeâmetro de Guelph (Fonte: Soil Moisture, 1987)

O aparelho consiste de um dispositivo que mede a condutividade hidráulica de solo saturado em condições de cargas hidráulicas constantes. É composto de uma garrafa de Mariotte, a qual controla a carga constante de água a ser aplicada no solo; um reservatório de água; uma régua graduada que permite a determinação de fluxos de água introduzidos no solo e um tripé que permite adaptar o aparelho a terrenos irregulares. Após algum tempo, que dependerá, dentre outros fatores, da umidade e da textura do solo verifica-se o estabelecimento de um fluxo estacionário de água no solo. A partir da determinação deste fluxo e do conhecimento de alguns parâmetros ligados ao equipamento, determina-se a condutividade hidráulica da saturação do solo em condições de campo (Aguiar, 2001).

Os métodos que utilizam permeômetros de carga constante vem sendo bastante utilizados para a obtenção da condutividade hidráulica do solo saturado. O emprego do permeômetro de Guelph destaca-se por ser de simples implementação (facilidade de instalação e operação do equipamento), rápido (a duração de um ensaio varia normalmente entre $\frac{1}{2}$ a 2 horas) e por não perturbar demasiadamente o local onde o ensaio é realizado, considerando que para a realização de uma medição, escava-se uma pequena abertura no solo de aproximadamente 5cm e da profundidade desejada (BAGARELLO et al., 2000).

Independente de qual metodologia é aplicada para a determinação da condutividade hidráulica, é visto que a mesma apresenta uma alta variabilidade espacial, tanto em determinações em campo como em laboratório (Hurtado, 2004). Essa variabilidade da condutividade hidráulica ocorre devido a diferenças naturais existentes no solo.

O estudo da variabilidade espacial das propriedades hidráulicas de um solo é essencial para a obtenção de valores médios representativos de áreas maiores que possam ser utilizados com segurança nos estudos da dinâmica da água no solo (CADIMA et al., 1980 apud HURTADO, 2004). Porém, tratando-se de condutividade hidráulica, o uso de valores médios ou extrapolados para áreas maiores pode trazer erros consideráveis na sua estimativa, necessitando de um maior número de observações e métodos estatísticos mais adequados ou até mesmo de modelagens que se baseiam em parâmetros que influenciam na variabilidade da condutividade hidráulica.

Várias propriedades físicas do solo são responsáveis pela variabilidade da condutividade hidráulica, uma vez que esta é influenciada por todas as propriedades que afetam a distribuição, o tamanho e a forma dos poros da matriz do solo, tais como densidade, textura, estrutura e porosidade. Para constatar a influência dessas propriedades à condutividade hidráulica, Hurtado (2004) cita trabalhos como o de Correa (1985) e Logsdon

& Jaynes (1996), onde os autores observaram que algumas propriedades hidráulicas como a infiltração são afetadas pela modificação de propriedades físicas como a estrutura e a porosidade do solo, devido a compactação, por exemplo.

Ferreira (2008) comenta sobre a obra de Regalado e Muñoz-Carpena (2004) que, ao investigarem a condutividade hidráulica do solo saturado, relataram que a porosidade do solo pode ser considerada como um parâmetro que determina a distribuição da condutividade hidráulica. No entanto, segundo os autores, há ainda outros fatores que influenciam nessa condutividade tais como, por exemplo, o conteúdo de argila no solo e seu grau de compactação.

Diversos outros estudos são encontrados na literatura onde há a análise entre uma possível correlação entre a porosidade do solo e a condutividade hidráulica, como os trabalhos de Guimarães (2000), Nakano e Myazaki (2005), Onsubitam et al. (2005) relatados por Ferreira (2008), entre outros. Várias são as conclusões para cada um dos autores e diferentes discussões são geradas sobre este assunto que, apesar da grande quantidade de pesquisas que o engloba, ainda deixa dúvidas em diversos aspectos. Sendo assim, há uma notável necessidade de se tentar elaborar novas metodologias que possam associar o fenômeno da condutividade hidráulica à parâmetros de solo que, por sua vez, talvez possam prover uma modelagem que facilite a determinação de sua espacialização.

2.5 Geoestatística

A *geoestatística* pode ser entendida como um ramo da estatística que reúne uma série de conceitos que servem de base para a aplicação de técnicas de interpolação, geralmente processadas por aplicativos computacionais. Estas técnicas utilizam dados pontuais referentes a uma determinada variável (que pode ser uma propriedade de solo, por exemplo) que, se apresentar certas características espaciais, podem ser utilizadas para estimar sua distribuição espacial em locais não-amostrados.

Resumidamente, a teoria fundamental da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras mais próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem mais distantes (Isaaks & Srivastava, 1989), conceito este definido como *dependência espacial* da variável.

Antes da *geoestatística* ser fundamentada, várias teorias que não consideram a dependência espacial das variáveis do solo contribuíram para estudos estatísticos e foram importantes para inferir dados espaciais em pesquisas científicas. Algumas das exigências

necessárias para aplicação destes métodos tratam-se do princípio da aleatorização e o da repetição, os quais foram alvos de críticas quando se iniciaram pesquisas após suas formulações. Nesta época, durante a década de 30, começou-se a perceber que a variabilidade espacial de muitas propriedades do solo estão ligadas à sua heterogeneidade, sendo quase impossível descrevê-las sem levar em consideração os locais onde são feitas as observações, ou seja, sem levar em consideração suas coordenadas espaciais.

Então, Memória (2004) diz que, em 1935, o estatístico Ronald Fisher procurou novas definições sobre sua teoria baseada na estatística clássica, tentando resolver os problemas observados nos métodos de interpolação por ele proposto anos antes, que não levava em consideração a componente espacial das amostras. Neste estudo, o autor notou que ao se estabelecer uma área para experimentação, nas parcelas vizinhas e mais próximas, as produções das culturas eram mais similares que aquelas que eram mais afastadas, apresentando, então, algum tipo de correlação espacial.

Décadas depois, a questão da variabilidade voltou a ser discutida por Krige (1951), em suas pesquisas realizadas em jazidas de ouro na África do Sul. Ao analisar a concentração do mineral, o autor percebeu que somente a informação dada pela variância seria insuficiente para explicar o fenômeno em estudo. Para que isso fosse possível seria necessário levar em consideração a distância entre as observações. Fazendo isso o autor concluiu que:

(i) nos estudos com dependência espacial utilizando malha regular (com espaçamentos iguais entre as amostras), as variâncias são notavelmente menor quando comparadas com as provenientes de uma malha irregular

(ii) a variância total é a soma de uma variância aleatória e uma espacial;

(iii) devido à influência de valores extremos, é necessário utilizar a média geométrica para efeito de parametrização das reservas e;

(iv) como há dois tipos de variância (espacial e aleatória), o número de amostras necessárias para o estudo geoestatístico é sempre menor que o solicitado pela estatística clássica.

Posteriormente a este estudo, o matemático Matheron (1963) prosseguiu com essas pesquisas, formalizando as observações experimentais anteriores e, então, fundamentou a chamada Teoria Das Variáveis Regionalizadas (VR), que, por ter sido utilizada inicialmente nos campos da geologia, agronomia e mineração, recebeu o nome de *Geoestatística*. Atualmente, sua aplicação se expandiu para diversos outros campos de pesquisas, e é utilizada até mesmo em análises de indicadores sociais. O método de interpolação que se

baseia na geoestatística levou o nome do sul-africano Krige, e hoje é conhecido como *kriging* ou, em português, *krigagem*.

A geoestatística utiliza a ferramenta *variograma* (às vezes chamada *semivariograma*) para medir a variabilidade espacial de uma variável regionalizada, e fornece os parâmetros de entrada para a interpolação espacial por meio da *krigagem* (Krige, 1951; Webster e Oliver, 1993).

2.5.1 ***Krigagem***

A *krigagem* usa informações a partir do *variograma* para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras com valores conhecidos que irão estimar os pontos desconhecidos. Neste aspecto, é entendida como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço (Matheron, 1971; Isaaks & Srivastava, 1989).

A diferença entre a *krigagem* e os outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. Para métodos como o de interpolação linear simples, todas as amostras possuem pesos iguais a $1/N$ (sendo N o número total de amostras); já no inverso do quadrado da distância, os pesos dados às amostras são referentes ao inverso do quadrado das distâncias que separam os valores estimados e os observados. No caso da *krigagem*, é a média móvel ponderada dos valores observados na vizinhança em que os vizinhos mais próximos têm peso maior e, os mais afastados, pesos cada vez menores, nulos e até mesmo negativos (Cressie, 1993; Ribeiro Junior, 1995).

Além disso, a *krigagem* fornece estimativas não tendenciosas e com variância mínima. Estimativas não tendenciosas significam que, em média, a diferença entre os valores estimados e observados, através de uma amostragem, para um mesmo ponto deve ser nula; e variância mínima significa que estes estimadores apresentam a menor variância entre todos os estimadores não tendenciosos (Camargo, 1997). Outra característica ressaltada pelo autor é que, em locais com agrupamento de amostras (clusters), a *krigagem*, por utilizar intrinsecamente uma estrutura de covariância, consegue tratar estas redundâncias, isto é, atribuindo pesos adequados para os agrupamentos. Fato este não considerado nos procedimentos determinísticos.

2.5.2 Variogramas

Para verificar a relação da distribuição da variável no espaço, utiliza-se o variograma. Esta ferramenta é capaz de medir o grau de dependência espacial entre amostras ao longo de um suporte específico. Para sua construção, são usadas as diferenças ao quadrado dos pares de valores $\{z(x)$ e $z(x+h)\}$, assumindo-se estacionaridade nos incrementos (Landim, 2006).

A construção e o ajuste de um modelo de semivariograma é um pré-requisito para a *krigagem*, sendo usado para modelar dois valores correlacionados no tempo ou no espaço.

Para se obter a estimativa dos parâmetros de um modelo de semivariograma baseado na teoria, pode-se formular um estimador para o mesmo, que depende somente da separação do vetor \mathbf{h} , apresentado da seguinte forma:

$$2\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = \frac{1}{|N(\mathbf{h})|} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} \left[z(x_i) - z(x_j) \right]^2, \quad h \in \mathfrak{R}^d \quad (\text{Equação 2})$$

sendo: \mathbf{h} um vetor, $|N(\mathbf{h})|$ é o número de elementos distintos de $N(\mathbf{h})$, que é dado por:

$$N(\mathbf{h}) \equiv \{(x_i, x_j) : x_i - x_j = \mathbf{h}; i, j = 1, \dots, n\} \quad (\text{Equação 3})$$

Quando há dependência espacial, geralmente, duas medidas mais próximas são mais similares que duas outras que estejam mais afastadas, permitindo que $\gamma(\mathbf{h})$ aumente à medida que \mathbf{h} também aumente. No entanto, a partir de uma certa distância não serão encontrados valores correlacionados com $z(\mathbf{h})$ porque a correlação espacial entre as amostras deixa de existir (Goovaerts, 1997; Landim & Struraro, 2002; Gumiaux et al., 2003).

Este ponto de semivariograma onde os dados não apresentam mais dependência espacial, ou seja, onde a semi-variância (eixo y) é praticamente a mesma e onde é estabelecida uma linha reta no gráfico, é chamado de "*patamar*" ou "*sill*" (C) (Figura 7).

A distância da origem (coordenadas x e y igual a zero) até o *patamar*, é chamado de "*alcance*" ou "*range*" (a), que representa o raio de influência de pontos de amostragem na sua vizinhança, indicado pela distância em que a variância se estabiliza (Figura 7).

Por definição, $\gamma(0)$ deve ser zero, mas na prática observa-se que há casos em que conforme h se aproxima de zero, $\gamma(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado *efeito pepita* ou *nugget* (C_0), que demonstra a descontinuidade do semivariograma para medidas menores do que a menor medida das amostras (Figura 7). O efeito pepita é o valor da semivariância para a distância zero e representa a componente da variabilidade espacial que

não pode ser relacionada com uma causa específica, ou seja, variabilidade ao acaso (Camargo, 1997), ou também estar ligado a erros de medição.

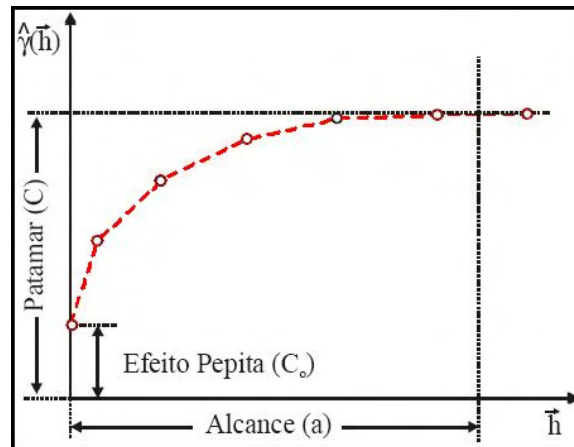


Figura 7- Parâmetros do semivariograma (CAMARGO, 1997).

2.5.3 Exemplos de estudos geoestatísticos

Principalmente a partir da década de 80, resultados de várias pesquisas constataram a ocorrência de dados com dependência espacial, sobretudo, em estudo que envolvem propriedades do solo. Destacam-se os estudos que apresentam uma continuidade espacial nas áreas de infiltração e drenagem, manejo de cultura, mineração entre outras.

Um dos primeiros trabalhos utilizando a *geoestatística* foi o estudo sobre a variação da infiltração de água no solo, realizado por Vieira et.al (1981). Neste trabalho, os autores investigaram a dependência espacial da taxa de infiltração de água em um solo argiloso de Yolo (Califórnia) e estudaram a variabilidade espacial através de 1280 medidas de campo, utilizando conceitos geoestatísticos. Dependendo da correta seleção das amostras, observou-se que um mínimo de 128 amostras era suficiente para estimar praticamente as mesmas informações quando se aplicava a krigagem utilizando 1280 amostras.

Gomes et al. (2007) fez uso de técnicas de krigagem para conhecer a distribuição espacial da densidade do solo, da concentração de matéria orgânica e da textura do solo, a fim de encontrar as interferências causadas pelo uso e ocupação do solo. O estudo foi realizado com 165 amostras pontuais distribuídas por uma área de 47 km², localizada na Bacia do Ribeirão Marcela, MG, Brasil. Os autores descobriram que alguns tipos de uso do solo agrícola provocam interferências diretas na distribuição espacial de atributos do solo. Assim, eles enfatizaram a importância da utilização de krigagem para encontrar áreas críticas quanto

à gestão do solo e, também, para fornecer informações importantes para o planejamento adequado do uso da terra.

Fernandes da Silva et al. (2007) analisaram algumas propriedades geotécnicas, tais como frações granulométricas e índice de plasticidade, na área de Ubatuba, litoral Norte de São Paulo, Brasil. O objetivo do estudo foi encontrar padrões espaciais dessas propriedades que permitissem a estimativa aproximada de comportamento geotécnico dos solos. Os autores empregaram três métodos de interpolação (vizinho mais próximo, média ponderada e krigagem), utilizando 73 amostras pontuais a fim de encontrar a melhor técnica para estimar a espacialização das propriedades geotécnicas. Os resultados sugerem que a krigagem é o melhor modelo a ser utilizado na regionalização dos parâmetros.

A importância das amostras serem georreferenciadas foi objeto de estudo de Landim (1998), que ao fazer pesquisas no ramo da mineração, percebeu que se as posições das amostras são deixadas de lado, considerando que todas têm a mesma probabilidade de serem escolhidas e são aleatórias, zonas mais ricas podem ser descartadas erráticamente, impedindo a obtenção de maiores produções de um referido minério. Assim, amostras mais próximas que apresentam valores mais similares não são levadas em conta, fazendo com que a distribuição da quantidade de minério se distribua indefinidamente e independente de sua localização, tornando, portanto, quase impossível prever locais com maior ocorrência. Além disso, concluiu que existe a necessidade do conhecimento parcial da função densidade de probabilidade que representa a ocorrência da variável regionalizada.

2.6 Lógica Fuzzy

Tanto os fenômenos naturais quanto as variáveis observadas na natureza não ocorrem ou se distribuem de forma abrupta, havendo uma mudança gradativa que separa sua *ocorrência* de sua *não-ocorrência* (McBratney et al., 2000). Em outras palavras, não existe um linha, por exemplo, que separe exatamente o limite entre dois diferentes tipos de solos, como se observa em mapas pedológicos.

Entretanto, havendo a necessidade de representar o espaço no qual está inserido, o homem criou mecanismos para representá-lo, utilizando uma série de aproximações para espacializar a realidade observada. Visto as dificuldades observadas em mapeamentos com diferentes objetivos, é necessário atribuir convenções que facilitem a abstração dos elementos mapeados para que, em seguida, promova-se a compreensão das informações que sejam pertinentes.

É válido lembrar que esta não é uma característica específica dos elementos da natureza, mas também de tantos outros que envolvem análises conceituais e que, por permitir subjetividade nas definições de suas classes, se apresentam no universo de ambigüidades e informações vagas.

Porém, as técnicas computacionais tradicionalmente utilizadas para tratar estes assuntos, como a *lógica booleana*, não explicam este tipo de abordagem onde uma variável pode apresentar valores intermediários. Estas técnicas classificam as ocorrências apenas como *sim* ou *não*, pois é feita sob a ótica binária que baseia-se na lógica de verdadeiro (1) ou falso (0). Por analogia, isto seria o mesmo que um jogo aleatório, no qual só existem duas possibilidades diferentes de resultados: ou se ganha ou se perde tudo, sem qualquer probabilidade de ocorrer outra situação.

Assim, ao observar que o mundo ao nosso redor apresenta definições intermediárias e indefinições quanto aos limites de muitos conceitos que são utilizados no cotidiano, o lógico polonês Jan Lukasiewicz, que viveu entre 1878 e 1956, iniciou estudos envolvendo estes *conceitos vagos* ou *imprecisos* (*fuzzy concepts*). Tais conceitos seriam necessários, por exemplo, para compreender questionamentos como: Onde começa o Oriente ou o Ocidente? O que define uma pessoa ser alta? O que é uma pessoa baixa? Em que momento uma neblina muito densa passa a ser considerada chuva? O que é um solo argiloso?

Perante este raciocínio, em 1920 Lukasiewicz introduziu conjuntos com graus de pertinência 0, $\frac{1}{2}$ e 1 (e não mais somente 0 e 1) e, em estudos posteriores, estendeu estas aplicações à infinitos números de valores entre 0 e 1. Entretanto, a denominação *lógica fuzzy* só foi atribuída por Zadeh (1965), quando foi publicado o primeiro estudo científico abordando estes conceitos.

Zadeh (1965) combinou os conceitos da lógica clássica e os conjuntos propostos por Lukasiewicz, definindo diferentes graus intermediários para o conceito em questão. Esta lógica também é denominada de *Conjuntos Nebulosos* (*Fuzzy Sets*) e permite que níveis de incertezas sejam implementados. A *lógica fuzzy*, portanto, estabelece um grau de veracidade (grau de pertinência/adesão) que permite afirmar a premissa avaliada como parcialmente falsa ou parcialmente verdadeira, atribuindo-se valores entre 0 e 1. A Figura 8 apresenta graficamente um exemplo ilustrativo para diferenciar a lógica booleana da lógica fuzzy.

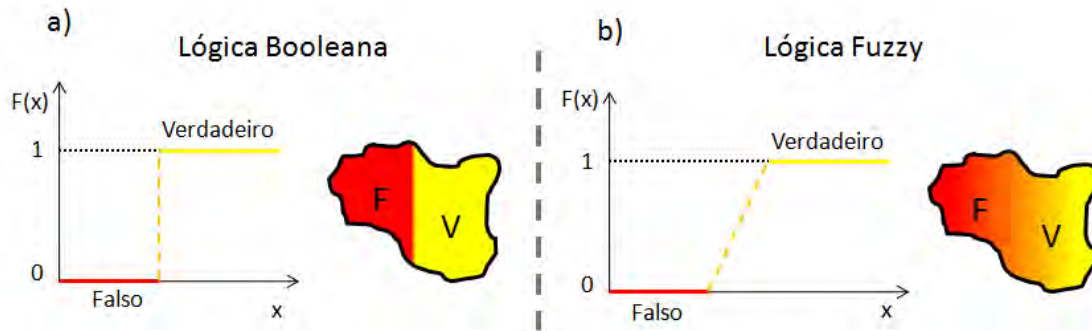


Figura 8 - Exemplo baseado nos conceitos da a) Lógica Booleana e b) Lógica Fuzzy.

Portanto, a *lógica fuzzy* tem por objetivo modelar o raciocínio humano de modo aproximado, proporcionando manipular qualquer informação em um ambiente de incerteza e imprecisão. Em outras palavras, ela é capaz de fornecer resultados aproximados para uma questão baseada em um conhecimento que é inexato, incompleto ou que não é totalmente confiável.

Os valores tratados em conjuntos *fuzzy* não são considerados reais, pois expressam valores lingüísticos (pessoa alta/baixa, dia quente/frio, solo argiloso/arenoso, etc.) baseados em variáveis lingüísticas (altura, temperatura, teor de argila, etc.) e, para isso, utilizam modos de raciocínio aproximado para expressar as diferentes classes do conjunto em questão. Um elemento pode pertencer com um certo grau, denominado grau de pertinência ou adesão, a um determinado conjunto fuzzy.

Segue um exemplo para ilustrar tais considerações. Numa cidade fictícia, observa-se que a altura da população adulta varia num universo entre 1.48m e 2.03m. É possível dividir esta população em quantos conjuntos achar necessário (*fuzzy sets*), mas para exemplificar, optou-se por dividir em apenas três: pessoas baixas, medianas e altas. O critério para traçar os limites entre essas classes pode ser variado, dependendo do universo analisado e das considerações pertinentes ao estudo em questão. Por exemplo, para jogar basquete, os conceitos de alto/baixo são diferenciados e específicos para este caso. Porém, para o caso ilustrativo optou-se por estabelecer os limites de forma aleatória, utilizando o senso comum como referência (Figura 9)

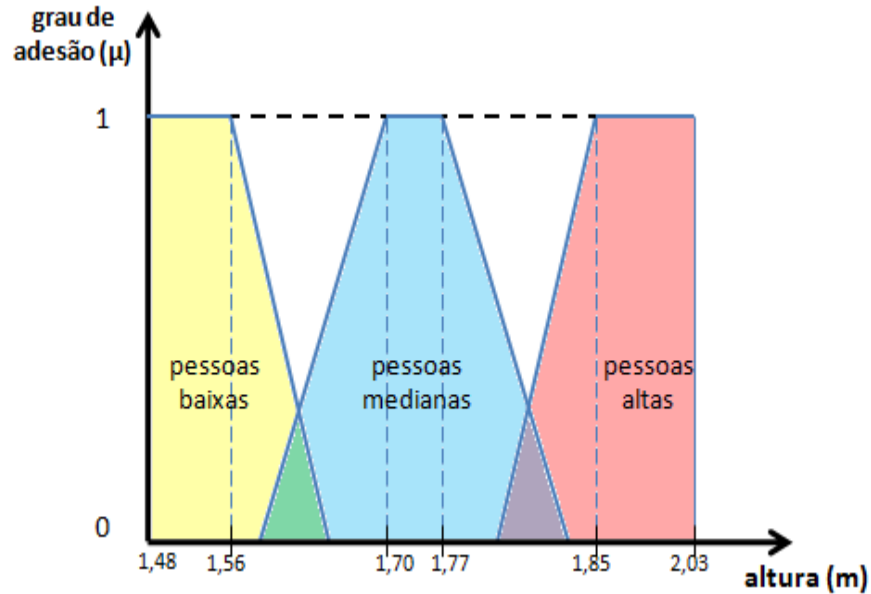


Figura 9 – Exemplo de um conjunto fuzzy, utilizando a variável altura.

Ao observar os conjuntos *fuzzy* apresentados na Figura 9 (pessoas baixas, medianas e altas) é possível interpretar diversas informações lógicas, tais como: a altura 1,65m pode caracterizar uma pessoa como baixa ou mediana, mas em nenhum dos casos é possível afirmar, com um grau de certeza, que esta é uma pessoa totalmente representativa para qualquer um dos dois grupos (o grau de adesão para estas classes é em torno de 0,50). Outra interpretação é que pessoas com alturas menores que 1,56m, que possuem altura entre 1,70 e 1,77 ou maiores que 1,85m representam exatamente as classes de pessoas baixas, medianas e altas, respectivamente, pois o grau de pertinência/adesão para estas ocorrências é igual a 1.

Mesmo que ilustrativo, o exemplo apresentado é capaz de representar diferentes tipos de questionamentos envolvidos na lógica *fuzzy*, independente de seu campo de estudo. Para o trabalho em questão, é interessante seguir este raciocínio para propriedades do solo, como a textura, que será abordada em itens posteriores.

Sobre *conjuntos fuzzy*, Borges e Silva (2009) ressaltam que os valores que os definem podem apresentar diferentes comportamentos, dependendo das propriedades que compõe a variável de análise. Desta forma, a disposição/distribuição das amostras de uma variável pode admitir diferentes curvas que delimitam cada conjunto quanto ao grau de pertinência. As Figura 10-a e Figura 10-b ilustram graficamente o comportamento das variáveis na lógica *fuzzy*.

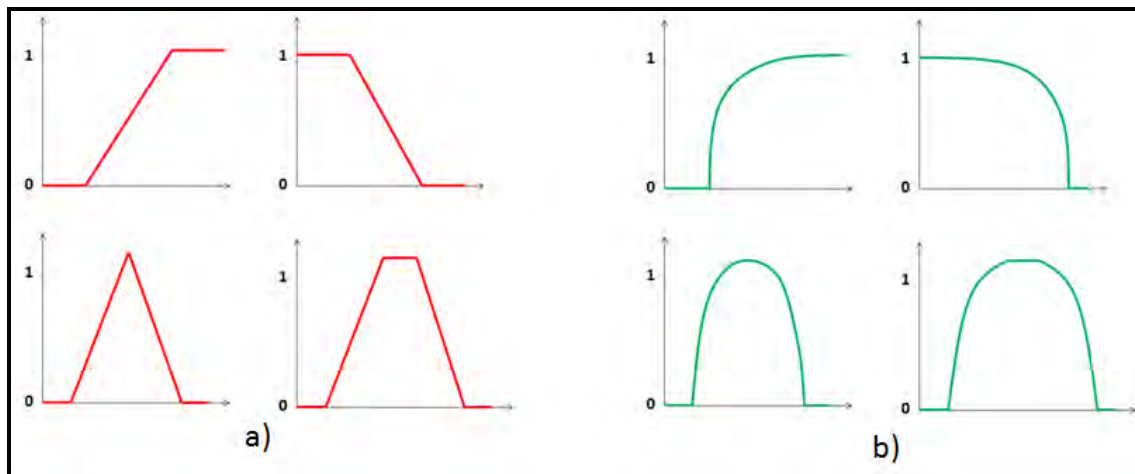


Figura 10– a) Representação de funções lineares de conjuntos fuzzy; b) Representações de funções sigmoidais de conjuntos fuzzy. Adaptado de Borges e Silva (2009).

Diferentes comportamentos são apresentados na Figura 10, de modo que na Figura 10-a tem-se a disposição linear dos *conjuntos fuzzy* e na Figura 10-b a disposição dos *conjuntos fuzzy* está representada através de funções sigmoidais (funções curvilíneas, com formato S). Conhecer o comportamento da variável é fundamental para a determinação dos pesos fuzzy na realização de qualquer operação que utilize esta lógica.

Antes de finalizar este tópico, é importante lembrar que a integração por meio de modelagem *fuzzy* tem sido extensamente utilizada por ser uma forma de caracterização de classes que não têm, ou não podem, definir limites rígidos (contatos) entre classes (Burrough & McDonnell, 1998). Esse tipo de modelagem é indicado para lidar com ambigüidades, abstrações e ambivalências em modelos matemáticos complexos que representam contatos difusos, comuns em diferentes processos naturais.

Bonisch et al. (2004) afirma que existem vários tipos de operadores para integração de dados numéricos (booleano, média ponderada, lógica fuzzy, Bayes, redes neurais artificiais, etc.) que geram resultados com representação numérica e que, se forem especializados, recebem o nome de *geocampos derivados*. O termo “*geocampo*” é atribuído devido ao fato de representarem a distribuição espacial de uma variável geográfica sobre uma região da superfície terrestre. Já o termo “*derivado*” é utilizado porque estas informações são provenientes de análises lógicas implementadas por algum tipo de operador que transforma os campos lingüísticos em numéricos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O conhecimento das principais características do meio físico é fundamental em qualquer estudo relacionado ao meio ambiente e aos processos que nele se desenvolvem. No caso de uma análise voltada para a dinâmica da água, sobretudo o processo de infiltração, estes estudos devem se basear na investigação geológica, geomorfológica e geotécnica da área estudo e do contexto regional no qual ela está inserida. No entanto, sabe-se que os procedimentos metodológicos empregados para estes fins desenvolvem-se de diferentes maneiras para cada caso ou situação analisada, variando conforme as necessidades específicas para alcançar objetivos atribuídos, do fator tempo e dos recursos humanos e financeiros disponíveis.

O desenvolvimento do presente estudo baseou-se essencialmente no emprego dos principais fatores do meio físico e das propriedades do solo que estão associadas ao processo de infiltração, conforme apresentado no item 2.4.2. Para otimizar o trabalho, utilizou-se informações cartográficas referentes ao meio físico (geologia, relevo e cobertura vegetal) em escala adequada, já elaboradas em estudos prévios. No caso das propriedades do solo (textura e porosidade), foi necessário realizar uma série de procedimentos (geoestatística) que permitissem, através de amostras pontuais, estimar sua distribuição espacial (mapas de predição).

No caso da umidade inicial do solo, considerou-se que há uma variabilidade temporal (sazonalidade) envolvida, o que inviabiliza a produção de diferentes mapas que sejam representativos, pois fatores como a temperatura e a pluviosidade são considerados interferências diretas. Entretanto, considerou-se que tanto para a condição natural ou saturada do solo, a influência da umidade inicial sempre age da mesma forma para os diferentes tipos de solo da região. Ou seja, em qualquer um dos casos, sabe-se que solos com textura argilosa dificultam o processo de infiltração, enquanto solos arenosos facilitam. Assim, não é necessário cruzar os dados relativos à umidade inicial do solo, desde que seja lembrado que a

pior situação para qualquer lugar da área de estudo será quando o solo já estiver umedecido e, principalmente, no caso em que ele estiver encharcado/saturado nas camadas superficiais, dificultando o processo de infiltração.

O cruzamento de diversas informações na forma cartográfica, através da álgebra de mapas, teve como objetivo principal gerar o mapa de potencial de infiltração. Desta maneira, todos os principais fatores que interferem no processo de infiltração foram considerados de forma diferenciada, permitindo a geração de um modelo que se aproxima da realidade.

A utilização de dados de propriedades hidráulicas (condutividade hidráulica) visa a validação dos modelos desenvolvidos através de comparações entre o que foi estimado e o que realmente é mensurado na região. Para a obtenção destas informações contou-se com estudos que já tinham sido desenvolvidos previamente (Vasconcellos, 2009).

Com o intuito de organizar e esclarecer as etapas desenvolvidas neste trabalho, elaborou-se o fluxograma apresentado na Figura 11, procurando dividir em quatro etapas principais, a saber:

Etapa 1 – Revisão Bibliográfica;

Etapa 2 – Caracterização da Área de Estudo;

Etapa 3 – Desenvolvimento e aplicação do método proposto para gerar mapas de potencial de infiltração;

Etapa 4 – Análises dos resultados, discussões e conclusão da dissertação.

Os principais procedimentos desenvolvidos para a execução de cada uma destas etapas encontram-se descritos nos próximos itens.

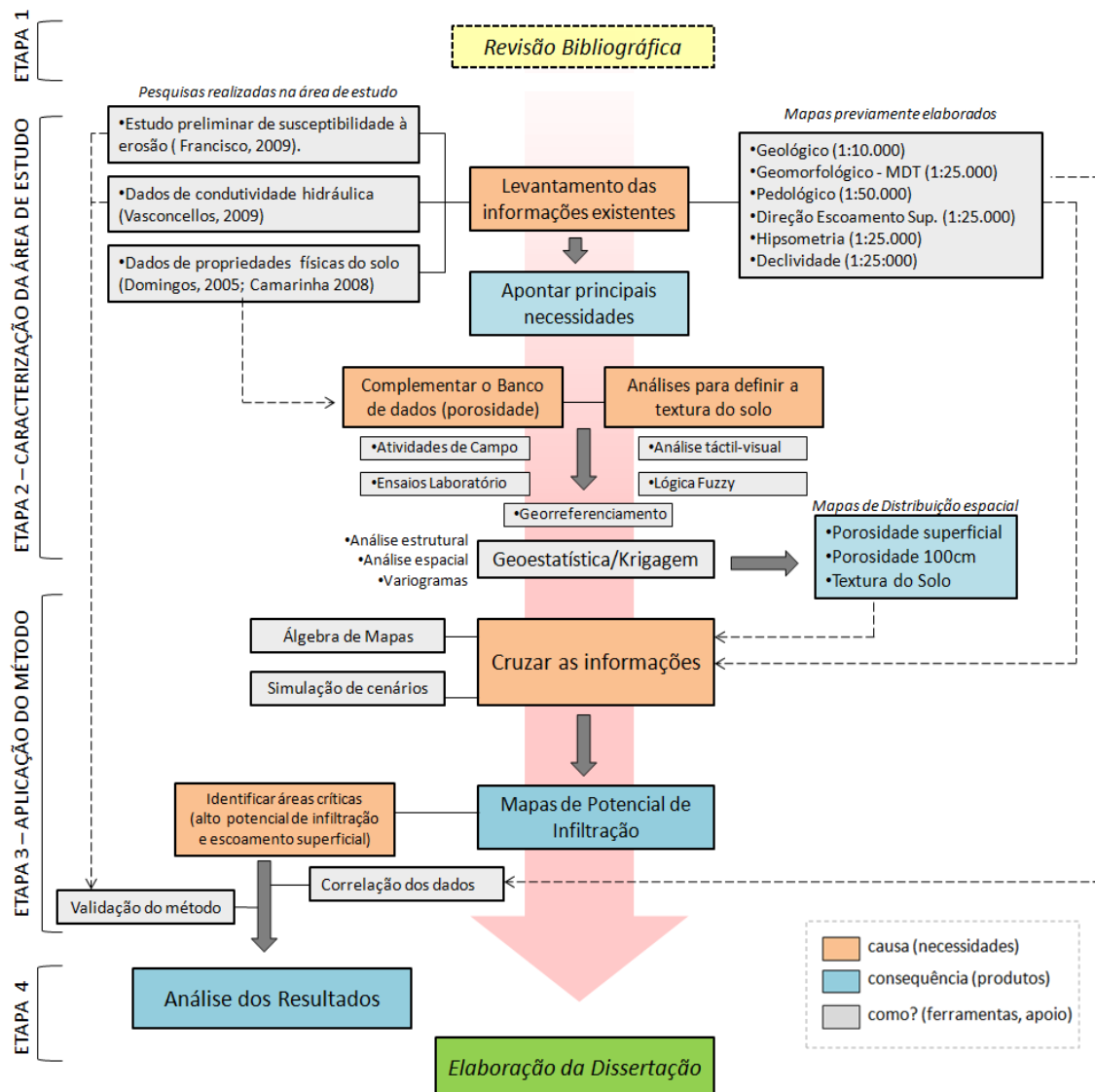


Figura 11 - Fluxograma das atividades desenvolvidas no decorrer deste estudo.

3.1 Área de Estudo – Informações encontradas na literatura

A área de estudo compreende a região da Fazenda Santa Edwiges, a qual compõe uma microbacia de cabeceira da sub-bacia do Ribeirão Taboão, situada no Vale do Paraíba no município de Lorena, Estado de São Paulo (Figura 12).

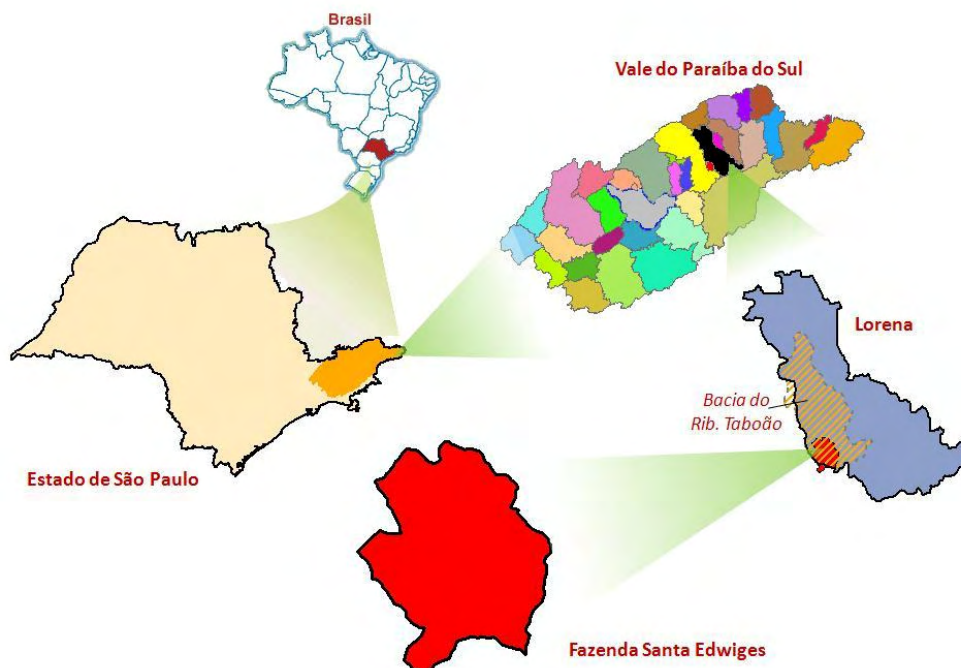


Figura 12 - Localização da Área de Estudo - Fazenda Santa Edwiges

Esta área pertence a empresa Fibria S.A. (antiga Votorantim Celulose e Papel), que a utiliza para o plantio de eucalipto. Apesar do seu pequeno tamanho (12,6 km²), esta área de estudo foi escolhida porque reflete a diversidade geológica e geomorfológica encontrada na região, que caracteriza a transição entre a planície do Paraíba do Sul e as montanhas costeiras que compõem a Serra do Mar. Além disso, sua localização em áreas de cabeceira de drenagem a tornam essencial para a manutenção dos recursos hídricos que ali existem e que, conseqüentemente, abastecem a porção a jusante da sub-bacia do Ribeirão Taboão, um dos afluentes do Rio Paraíba do Sul.

Como pode ser observado na Figura 13, são nas áreas de menores altitudes que se localizam grande parte dos municípios da região, às margens do Rio Paraíba do Sul. Estes municípios são abastecidos essencialmente pelo Rio Paraíba do Sul e seus afluentes. O Ribeirão Taboão é um afluente d'órrio Paraíba do Sul e localiza-se em sua margem direita, cortando o município de Lorena.

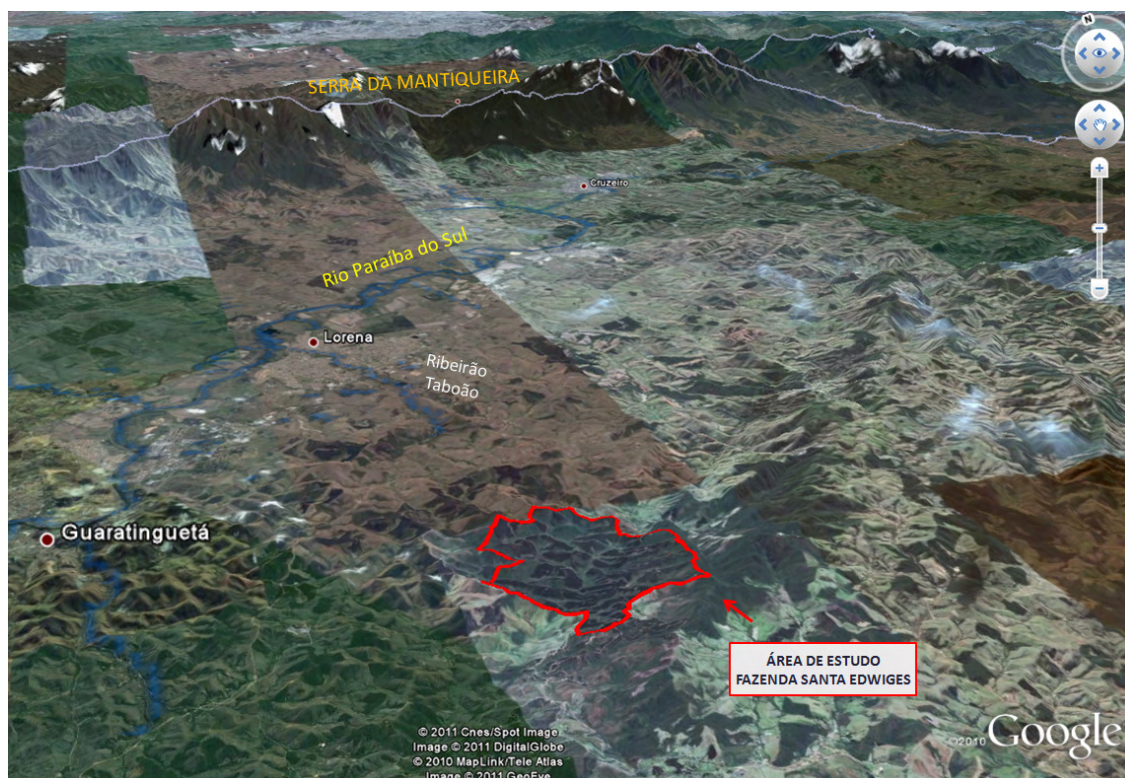


Figura 13 - Vista panorâmica da localização da área de estudo. Imagens do Google Earth®.

A primeira etapa do trabalho compreende o levantamento de mapeamentos existentes referentes à área de estudo, identificando diferentes domínios a partir da análise e integração de diversas variáveis do meio físico (geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, geotécnicas, pedológicas e climatológicas). No entanto, com o intuito de focar os objetivos específicos do projeto, as variáveis geomorfológicas, geológicas e geotécnicas ganharão maior ênfase. Estas variáveis consistem em fatores determinantes dentro dos processos de circulação de água (superficial e subsuperficial) na área de estudo.

Todo este levantamento do meio físico (geologia, geomorfologia e hipsometria) que será apresentado foi previamente desenvolvido em projetos de parcerias que envolvem o grupo de pesquisa no qual este trabalho está inserido.

3.1.1 **Geologia Regional e Local**

No contexto regional, segundo Hassui e Sadowski (1976), a grande diversidade dos complexos existentes na região Sudeste do Estado de São Paulo (Embú - Ps_eM - ,Pilar do Sul - PS_pX - e Costeiro - A_cM) trazem evidências de uma grande movimentação ocorrida na

região, que provavelmente ocorreu durante os eventos tectônicos Juquiê, período Arqueano; e Brasileiro, período Proterozóico Superior.

O proterozóico do estado de São Paulo é composto por rochas metamórficas de fácies variadas, indo desde granulitos até xisto-verde e granitóides. Tal fato provavelmente devido ao caráter polifásico, de início no período Arqueano até o fim do Proterozóico Superior (2500 m.a. - 570 m.a.), tendo aí ocorrido deposições, metamorfismos, retrometamorfismos e dobramentos das formações vulcano-sedimentares e intrusões graníticas. Há dois grandes grupos litoestratigráficos na região, os quais são ilustrados na Figura 14.

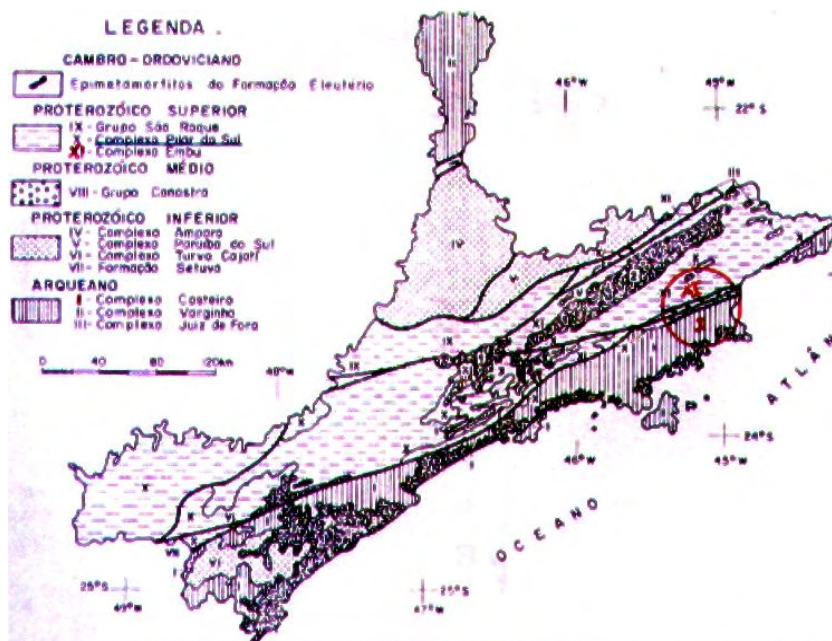


Figura 14 - Esboço da distribuição das unidades litoestratigráficas no estado de São Paulo do Proterozóico e Eopaleozóico (Hassui e Sadowski, 1976).

Devido a pouca informação em trabalhos, publicações e pesquisas, pode-se apenas afirmar através de cartas geológicas de escalas 1:100.000 a existência de dois grandes grupos lito-estratigráficos na região. São eles: Complexo Costeiro (A_{CM}); e Grupo Açungüi, que compreende, conforme o levantamento feito em dois subgrupos, o Complexo Pilar do Sul (PS_{pX}) e o Complexo Embú (PS_{eM}).

Em escala local, Rodrigues e Milanezi (2005) afirmam que a fazenda Santa Edwiges encontra-se totalmente inserida em um contexto geológico formado por rochas cristalinas de idade pré-cambriana (> 500 milhões de anos). O mapa apresentado na Figura 15 apresenta as diferentes unidades geológicas encontradas na área de estudo:

a) rochas metamórficas (xistos, gnaisses e migmatitos) do Complexo Embu (Hasui & Sadowski, 1976; Carneiro et al., 1978; Landim, 1984);

b) rochas ígneas (de composição predominantemente granítica) do Complexo Quebra-Cangalha (Landim, 1984);

c) as faixas de alta deformação (zonas milonitizadas); d) os sedimentos inconsolidados localizados próximos aos leito dos cursos de água.

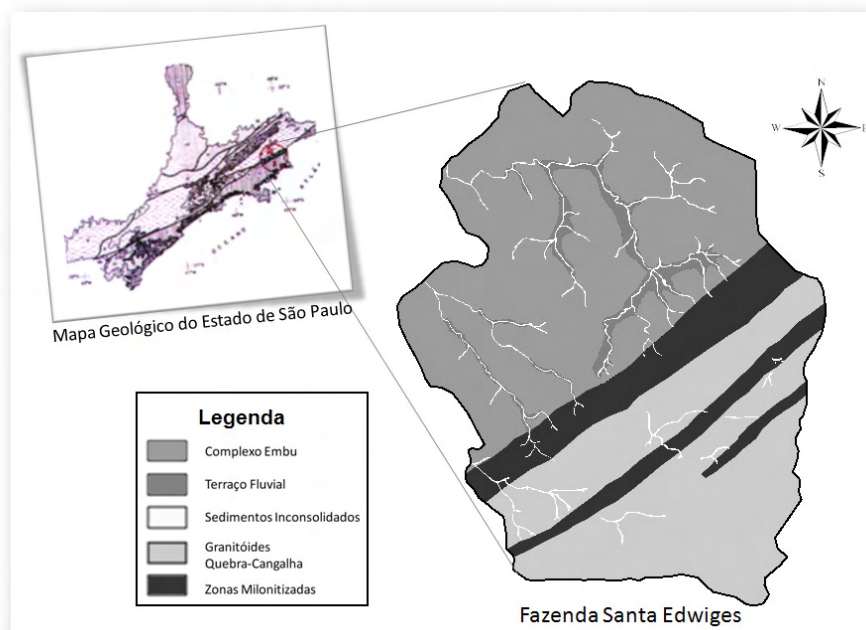


Figura 15 – Mapa Geológico da área da Fazenda Santa Edwiges, elaborado em escala 1:10.000 (Adaptado de Rodrigues e Milanezi, 2005).

Pela Figura 15 pode-se perceber que a porção norte da área está inserida no *Complexo Embu*. Esta unidade é constituída por rochas metamórficas (gnaisses) que possuem na sua composição minerais mais facilmente alteráveis como micas e feldspatos. Desta maneira, o solo de alteração proveniente destas rochas é normalmente fino, onde predominam minerais argilosos favorecendo o desenvolvimento de solos mais impermeáveis e mais homogêneos. Os solos são normalmente espessos e possuem coloração avermelhada devido à presença de minerais ricos em ferro como a biotita.

A unidade *Granitóide Quebra-Cangalha* tem sua área de abrangência na porção sul da área sendo constituída predominantemente por granitos leucocráticos de tonalidades claras. As rochas desta unidade possuem minerais mais resistentes à alteração como o quartzo e o feldspato potássico. Em decorrência da presença destes minerais, os solos são predominantemente de coloração esbranquiçada, de constituição areno-argilosa e com a

presença significativa de frações minerais mais grosseiras, como saibros. A textura grossa destes solos e a ausência de uma cobertura vegetal favorecem a ocorrência de processos erosivos em estágios avançados, como sulcos e ravinas.

As *zonas milonitizadas* (ou zonas de cisalhamento) correspondem à cerca de 10% da área total estudada são áreas que foram submetidas a intensas tensões tectônicas em condições dúcteis, ou seja, a profundidades maiores que 10 km (Ramsay, 1980). Por esta razão, apresentam uma foliação bastante desenvolvida e a presença de minerais finos com estrutura em camadas como mica e clorita em decorrência de processos de retrometamorfismo, devido à percolação de fluidos nas zonas de cisalhamento. Quando em superfície, a intensa foliação destas rochas facilita os processos de intemperismo e a formação de solos com elevada proporção de argila.

A unidade *Terraço Fluvial* e a unidade *Sedimentos Inconsolidados* está associada à planície fluvial do ribeirão Taboão e seus principais afluentes. Nesta área são identificados paleo-terraços com sedimentos de composição pelítica (silte e argila) e, secundariamente, areia e seixos angulosos de quartzo e feldspato. Também se observam sedimentos inconsolidados de cor preta indicando a presença de solos com grande quantidade de matéria orgânica.

3.1.2 Geomorfologia

Regionalmente, a área de estudo está inserida na unidade geomorfológica do Planalto do Médio Vale do Paraíba, a qual foi descrita por Ponçano *et al.*, (1981) no Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. A diversidade do substrato geológico descrita anteriormente é diretamente responsável pela grande variação de relevos e solos encontrados na região e também na fazenda Santa Edwiges.

Na escala de trabalho adotada por Lima & Simões (2005) - 1:10.000 - foi possível identificar, com base em elementos morfométricos (hipsometria e declividade) três unidades geomorfológicas distintas: Escarpas Degradadas, Morros e Morrotes e Colinas Alveolares, que podem ser observadas através de um Modelo Digital de Terreno (MDT), elaborado pelos mesmos autores (Figura 16) descritas a seguir.

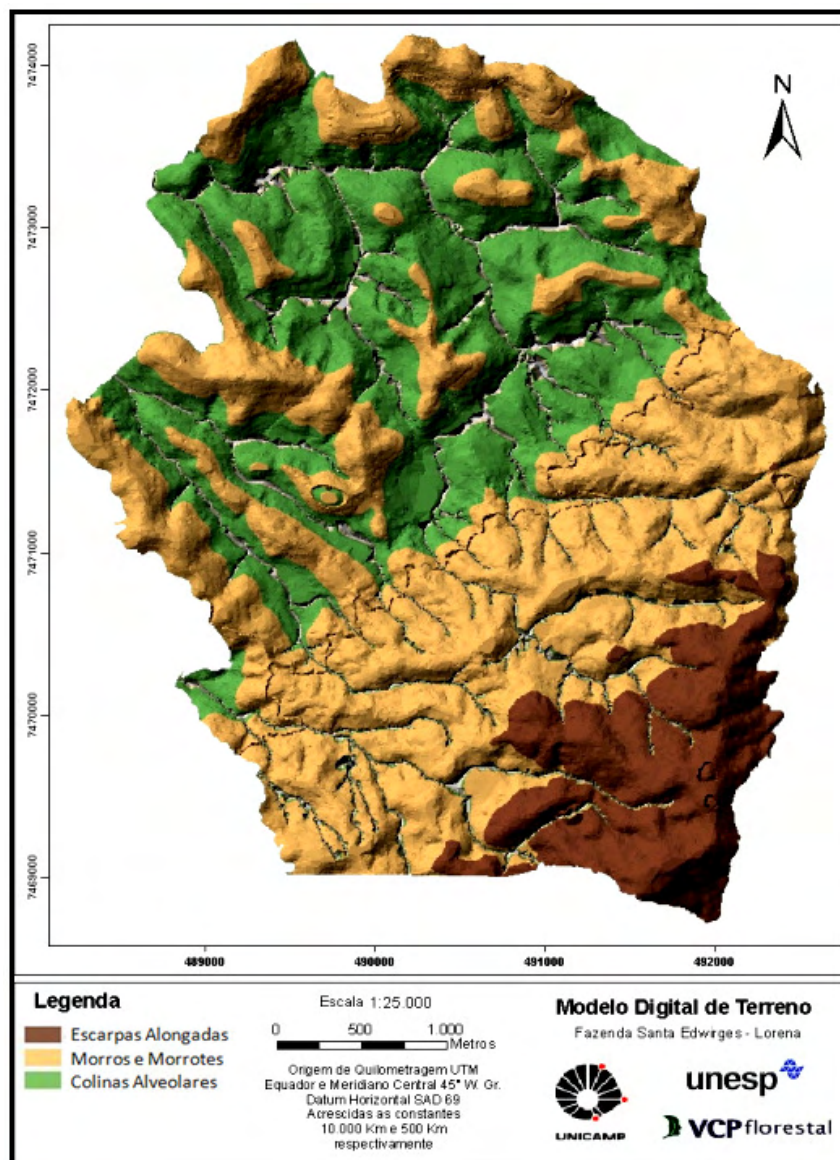


Figura 16 - Modelo Digital de Terreno para a Fazenda Santa Edwiges que identifica as unidades de relevo existente (Adaptado de Lima & Simões, 2005).

Escarpas Alongadas – localiza-se na porção Sudeste da área de estudo sendo caracterizada por relevos com alta declividade (>30%) e grandes amplitudes altimétricas (>300m). No caso, localiza-se em cotas entre 900m e 1180m. O relevo apresenta-se muito dissecado com vales estreitos e densidade de drenagem elevada. Os solos observados nestas unidades apresentam-se com pouca espessura, predominando solos residuais jovens e saprolitos.

Morros e Morrotes Arredondados - ocupa a parte central e norte área de estudo. Apresentam formas arredondadas com declividades médias (>15%) inferiores aos relevos de

Escarpas Alongadas e amplitudes altimétricas variando entre 100 e 300m. Para a área de estudo, localiza-se entre as cotas 700 e 950m. Os vales são mais abertos com presença de alvéolos e densidade de drenagem média. Os perfis de intemperismo nesta região variam bastante, com locais apresentando grandes espessuras de solo transportado.

Colinas Alveolares – Representa a transição entre os relevos de escarpas e os relevos de morros e morrotes situados na porção central da área de estudo. Correspondem as áreas de declividade muito baixa (<5%) e com variações altimétricas baixas (menores e em torno 50 m) normalmente relacionadas às planícies aluvionares. Nesta região encontram-se camadas de solo residual maduro e mais espessas. Esta unidade encontra-se entre as cotas 610 e 700m de altitude.

Embora a geomorfologia seja uma variável de grande importância para o estudo da dinâmica da água, este Modelo Digital de Terreno não será utilizado na etapa correspondente à Álgebra de Mapas. Optou-se por utilizar a Carta de Declividade (que foi gerada a partir da hipsometria), o Mapa de Densidade de Escoamento Superficial (gerado a partir dos vetores de escoamento) e do Mapa de Densidade de Drenagem (gerado a partir das linhas de drenagem identificadas na região). Estes elementos, juntos, são capazes de fornecer informações mais precisas de como o processo de infiltração ocorre dentro da área de estudo.

3.1.3 Hipsometria e Declividade

O mapa hipsométrico foi produzido a partir do MDT elaborado por Lima & Simões (2005). O mapa de declividade também foi obtido a partir deste MDT, de modo que foram definidas seis classes com base na variação de relevo, na legislação ambiental e nas diversas fases de operação que envolvem as atividades de silvicultura. Estas classes estão apresentadas junto ao mapa de declividade (Figura 17).

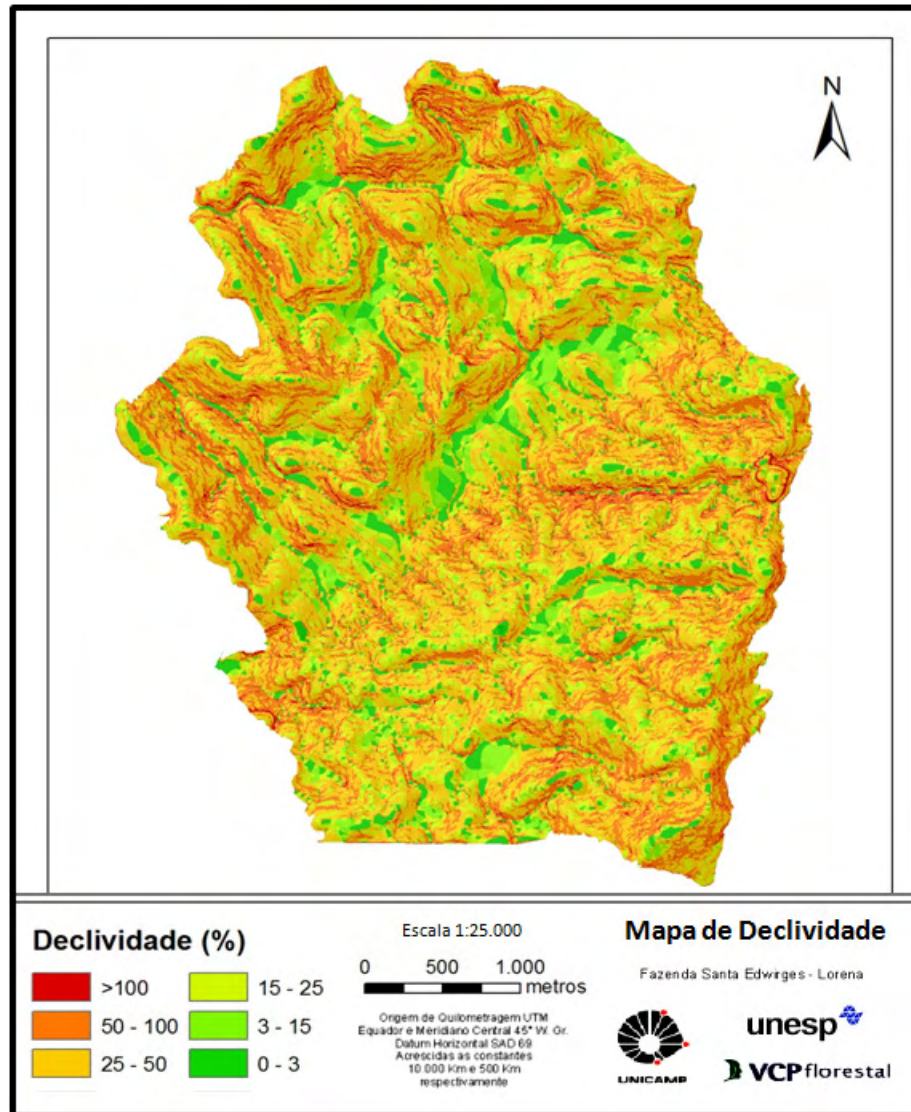


Figura 17 - Mapa de Declividade para a área da Fazenda Santa Edwiges em escala 1:25.000.

A classe entre 0 e 3% corresponde as áreas próximas ao topo dos morros e colinas e as áreas de planície aluvionar dos rios, enquanto a classe entre 5 e 15% corresponde às vertentes dos relevos mais suaves. O valor de 25% corresponde ao limite superior para operar tratores agrícolas; o valor de 50% corresponde ao limite máximo para operar a máquina colheitadeira de eucalipto; o valor de 100% corresponde ao limite determinado para área de proteção permanente conforme o Código Florestal Lei nº 4.771, de 15/09/1965.

3.1.4 Dinâmica do Escoamento Superficial e Sistema de Drenagem

Bustamante (2005) realizou um estudo utilizando elementos morfológicos dos relevos (linear, côncavo e convexo) na área compreendida pela fazenda Santa Edwiges, procurando caracterizar as áreas que concentram o escoamento superficial a partir de vetores de fluxo e que pudessem ser visualizados através de um Mapa de Dinâmica de Escoamento Superficial, apresentado na Figura 18. Neste mesmo mapa também é possível identificar a Rede de Drenagem existente da região, representado pelas linhas azuis.

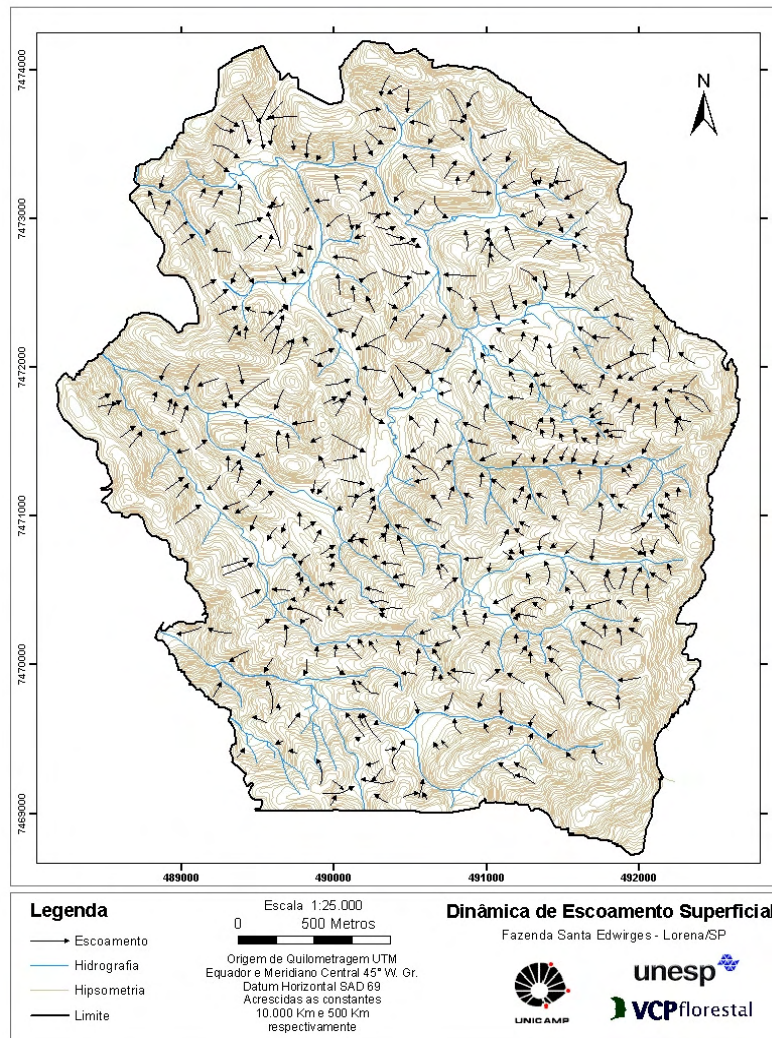


Figura 18 - Dinâmica do Escoamento Superficial na Fazenda Santa Edwiges e Rede de Drenagem (Bustamante, 2005).

A caracterização das linhas de vetores de fluxo pode contribuir decisivamente na orientação de um melhor traçado das estradas em áreas de plantio de eucalipto evitando intercepções impróprias e que as estradas sejam elementos de fluxos concentrados que agravem os processos de formação de ravinas e escorregamentos de taludes e aterros (SIMÕES et al., 2005).

Este mapa servirá de base para a geração do mapa de Densidade de Linhas de Escoamento e Densidade de Drenagem, que serão utilizado para a Álgebra de Mapas, com o intuito de identificar áreas potenciais de infiltração. Sabe-se que quanto maior a densidade de escoamento, menor a tendência do processo de infiltração ser favorecido, pois estas localidades apresentam, naturalmente, maior facilidade para a água escoar até o sistema de drenagem.

Já o arranjo da rede de drenagem é importante devido ao fato dela ser somatório de um conjunto de variáveis físicas como clima, relevo, solos, substrato rochoso e vegetação; e em grande parte função da relação infiltração/escoamento (SOARES, 2005).

Conforme Marchetti e Garcia (1977), 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 geralmente mais denso.

3.1.5 Pedologia

A pedologia consiste no estudo do desenvolvimento do solo próximo à superfície. O perfil do solo geralmente mostra uma seqüência de camadas (horizontes) que pode se estender de 1,0m a 3,0m abaixo da superfície. As propriedades destes horizontes refletem nos materiais que lhe deram origem (rochas) e também fatores ambientais atuantes no processo de formação do solo, tais como: clima, inclinação do talude, e a vegetação.

A pedologia da área de estudo foi detalhada no levantamento realizado por Rizzo (2006), em atendimento a solicitação Votorantim Celulose Papel (Figura 19). Neste levantamento, destacam-se as unidades compostas *Latosolo Vermelho+Cambissolo Háptico* sendo a outra *Argissolo Vermelho+ Cambissolo Háptico* que ocupam cerca de 90% da área da fazenda. Entretanto, este mapa foi produzido em escala 1:500.000, não sendo provavelmente representativo para a área de estudo. Neste aspecto, há necessidade de um melhor detalhamento das classes de solo para que, assim, este mapa possa ser utilizado nas análises propostas neste trabalho.

Sendo assim, a utilização deste mapa no presente trabalho é somente de caráter explicativo, não cabendo utilizá-lo nas etapas posteriores, que correspondem ao cruzamento das informações cartográficas que sejam pertinentes ao processo de infiltração.

Por outro lado, este mapa pode colaborar na avaliação da metodologia proposta para a geração do mapa de textura e na validação dos resultados obtidos (mapa de predição da textura), antes mesmo do mapa de potencial de infiltração ser gerado.

É importante notar que o mapa pedológico apresentado na Figura 19 apresenta o limite físico da Fazenda Santa Edwiges diferentes dos demais mapas apresentados. Isto deve-se ao fato de que quando os estudos nesta área se iniciaram, por volta do ano de 2004, a propriedade utilizada pela Votorantim possuía área maior, conforme os mapas anteriores. A partir de 2005, esta área foi reduzida exatamente nos limites de uma microbacia, conforme está apresentado a seguir e também no mapa de cobertura vegetal (Figura 20). Embora existam mais informações em mapas que representam uma área maior, será esse o limite utilizado para o estudos que posteriores.

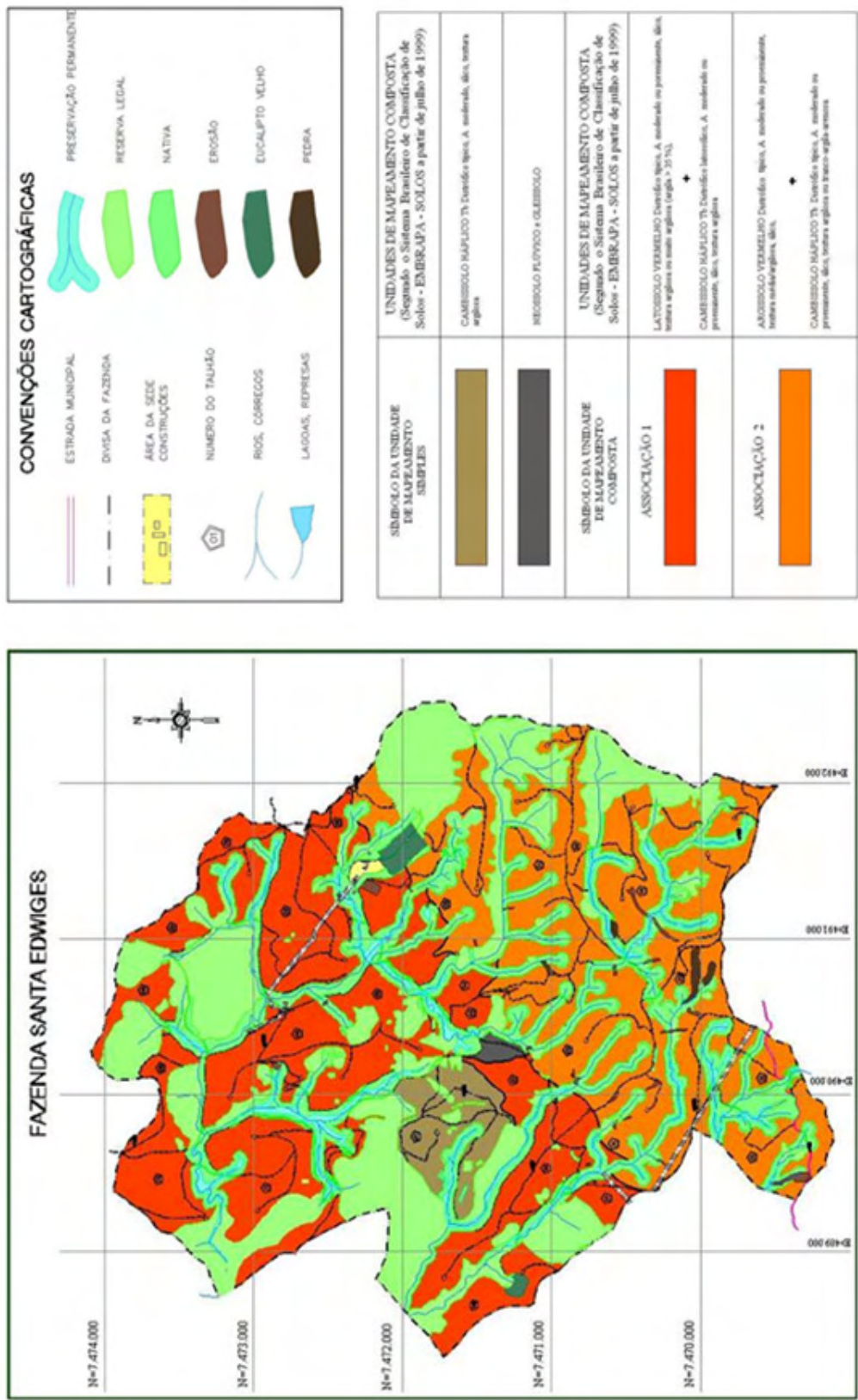


Figura 19 - Mapa pedológico da área de estudo. Escala 1:500.000 Fonte: Rizzo (2006)

3.1.5.1 *Argissolos*

Os argissolos são constituídos por material mineral com argila de atividade baixa e horizonte B textural, imediatamente abaixo do horizonte A ou E. São solos que facilmente são preparados para o plantio por geralmente apresentarem textura média ou arenosa em superfície e baixa atividade da fração argila, sendo normalmente solos espessos.

No caso da subordem Argissolo Vermelho, que ocorre na área de estudo, a cor avermelhada está relacionada, especialmente ao fato de serem solos de textura, predominantemente argilosa, à presença de solos originados a partir de rochas básicas ou ricas em minerais ferromagnesianos apresentando por isso, em geral, teores mais elevados em cátions trocáveis e em micronutrientes.

3.1.5.2 *Latossolos*

Latossolos são, em geral, solos que apresentam boas propriedades físicas para as atividades agrícolas (elevada friabilidade) e situados, na maioria dos casos, em relevo favorável ao uso intensivo de máquinas agrícolas, exceto aqueles situados em regiões serranas. Mesmo os latossolos bastante argilosos apresentam boa drenagem interna e excepcional porosidade total, sendo comuns valores de 50-60% de porosidade.

3.1.5.3 *Cambissolos*

Por definição, os Cambissolos são considerados solos pouco evoluídos, constituídos por material mineral primário e de espessura fina, sendo caracterizado,s portanto, como solos residuais jovens. Quando encontrados em terrenos acidentados como na Fazenda Santa Edwiges, apresentam sérias restrições quanto ao uso agrícola; e os localizados em terrenos escarpados também apresentam limitações ao uso pastoril e florestal devido à sua elevada capacidade de degradação, o que favorece o desenvolvimento de processos erosivos.

3.1.5.4 *Neossolos e Gleissolos*

Os neossolos flúvicos, subordem dos neossolos (ocorrência vista na área de estudo), situam-se em planícies aluviais sendo, por isso, virtualmente desprovidos de limitações quanto à erodibilidade. Em razão do micro-relevo, os neossolos flúvicos apresentam profundidades efetivas variadas, sendo predominante a ocorrência de solos profundos.

Mesmo quando identificados como sendo de textura argilosa, média ou arenosa, os Neossolos apresentam estratos, sendo os de textura arenosa e de textura média aqueles que oferecem, em geral, melhor permeabilidade.

Os Gleissolos também se originam de sedimentos aluviais e, por isso, apresentam, geralmente, textura errática ao longo do perfil, às vezes, com variações texturais muito grandes entre os horizontes. Apresentam também limitações à trafegabilidade de máquinas em razão da sua menor capacidade de suporte.

3.1.6 Cobertura Vegetal

As condições em que se encontra a superfície do solo é de grande importância para avaliar o processo de infiltração na área de estudo. Para o caso em questão, praticamente toda a área possui algum tipo de vegetação, seja ela natural, com bom estado de conservação (fragmentos de mata nativa) ou em estágios de recuperação (no caso das APP's); ou plantada (eucalipto para produção de papel e celulose).

Sabe-se que após a retirada do eucalipto, o solo pode ficar desprotegido e, assim, favorecer o processo de escoamento superficial. Entretanto, o manejo utilizado pela Fibria é o Sistema de Cultivo Mínimo do Solo. Este sistema de cultivo não aplica o fogo para limpeza da área no período pós-plantio, de modo que toda a camada de matéria orgânica (serrapilheira) depositada pelas árvores do eucalipto do ciclo anteriores permanece no local. Desta forma, galhos, folhas, tocos e raízes depositadas são mantidos na superfície do terreno para que se decomponham, para evitar os processos erosivos, conservando o solo e água.

Conforme Pires et al. (2006), sob esse sistema de cultivo, no período de pós-plantio o solo ainda permanece em condições de favorecer o processo de infiltração, de modo que, conforme o eucalipto vai crescendo, melhores serão as condições estabelecidas. Martins et al. (2003) avaliou a diferença entre um solo sem cobertura vegetal e aquele encontrado logo após a retirada da madeira do eucalipto, onde já inicia-se o plantio de outro ciclo. Neste estudo, os autores concluíram que a serrapilheira desfavorece demasiadamente o processo de escoamento superficial e, conseqüentemente, favorece a conservação do solo. Lima (1996) comparou os casos do solo na situação pós-plantio de eucalipto e o também sem cobertura vegetal. O autor observou redução dos valores de perda de solo do primeiro para o quarto ano em plantios de eucalipto. Os valores obtidos no início, logo após o plantio, variaram entre 1,0 e 6,5 Mg ha⁻¹/ano, decrescendo para 0,01 a 0,14 Mg ha⁻¹/ano no quarto ano, enquanto na parcela sem cobertura vegetal, as perdas de solo variaram entre 3,2 e 11,32 Mg ha⁻¹ por ano.

Portanto, mesmo que a situação observada após a colheita da madeira ainda seja favorável ao processo de infiltração, será necessário simular dois cenários diferentes: o primeiro onde as áreas de plantio de eucalipto estejam já com bosques formados (favorecendo o processo de infiltração praticamente como a mata nativa), e outra onde a superfície está apenas com a serrapilheira, favorecendo um pouco menos. A Figura 20 apresentada a seguir mostra o Mapa de Cobertura Vegetal, elaborado pela Fibria. A ponderação (hierarquização) de cada uma das classes será apresentada posteriormente, na etapa referente a *Álgebra de Mapas*.

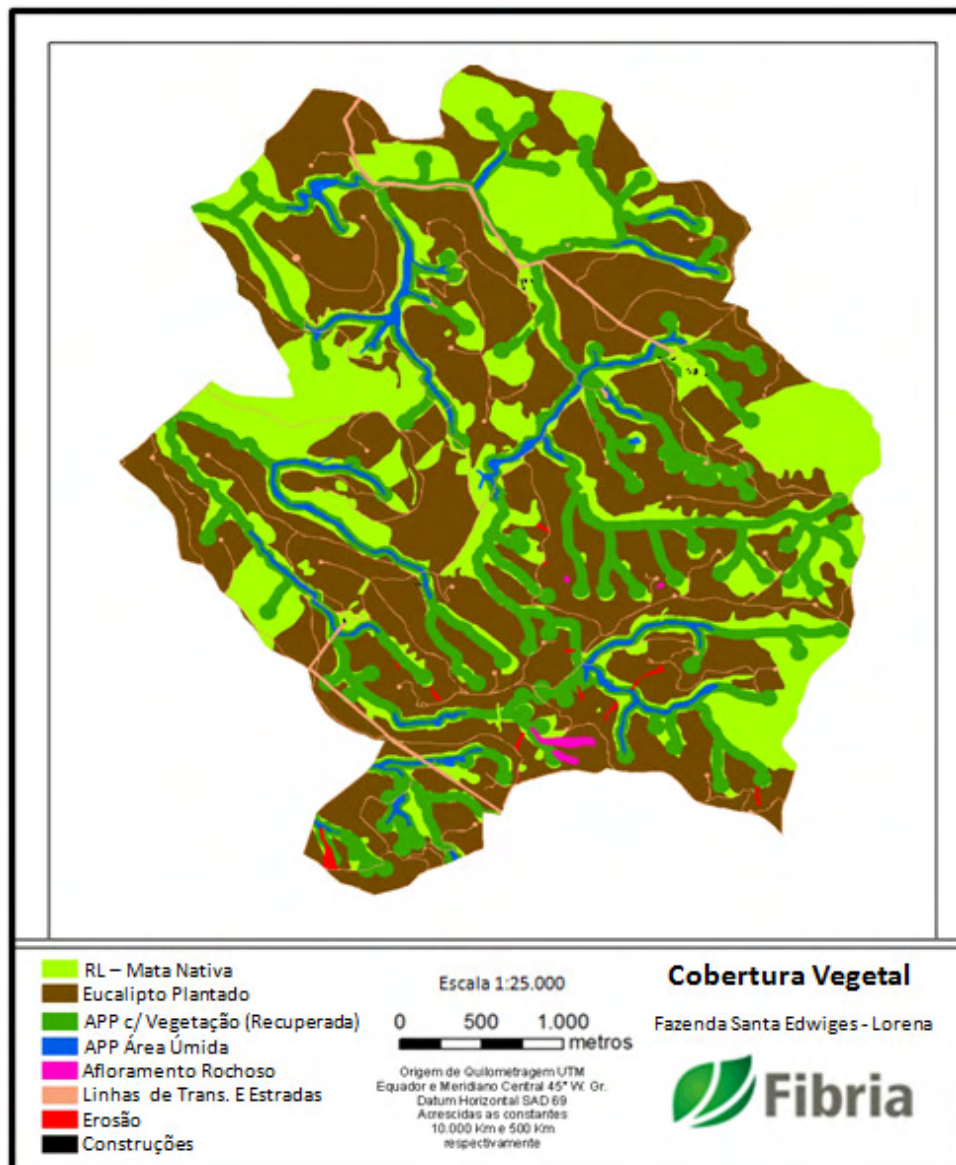


Figura 20 - Mapa de Cobertura Vegetal cedido pela Fibria referente ao ano de 2010.

3.1.7 Pluviometria Regional

Com base nos estudos realizados por Silva (1999), citado por Santos (2006), sobre a dinâmica atmosférica e a distribuição das chuvas na região “oriental” paulista, existem de três unidades morfológicas distintas, que praticamente coincidem com as unidades pluviométricas, sendo estas: a Serra da Mantiqueira, o Vale do Paraíba e o Litoral Norte. A região apresenta uma média anual de pluviosidade de 1300 mm. Através da classificação obtida pelo estudo, observa-se que a análise feita com base na média de precipitação anual define uma classificação climatológica variando de úmida (60% da área) a muito úmida (35% da área).

Contudo, a análise com base na distribuição sazonal mostra que no inverno, 60% da região do Vale do Paraíba apresenta índice pluviométrico inferior à 125mm, sendo caracterizada como uma região semi-árida. Por outro lado, no verão os índices pluviométricos ficam acima de 300 mm e neste período existe o agravante das chuvas torrenciais com grande intensidade e curto período. A Figura 21 apresenta um histórico de 30 anos de precipitação na região do Vale do Paraíba, onde a Fazenda Santa Edwiges está inserida. O gráfico mostra os valores das médias mensais totalizando 12 pontos por ano, referentes aos dados extraídos de um posto pluviométrico situado no Vale do Paraíba.

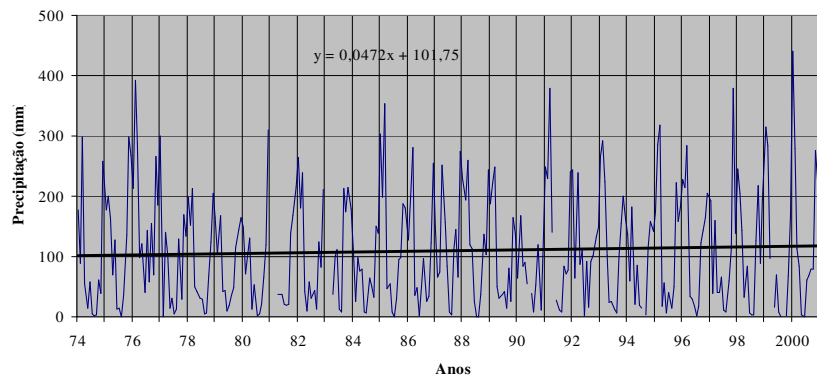


Figura 21 - Dados referentes à pluviometria na região do Vale do Paraíba (SANTOS, 2006).

Embora a intensidade das chuvas esteja diretamente ligada ao processo de infiltração, pois é ela que o desencadeia, esta variável não será utilizada no cruzamento cartográfico devido ao fato de não serem encontradas diferenças pluviométricas significantes dentro da área compreendida pela Fazenda Santa Edwiges.

Entretanto, se houvessem dados específicos para a área de estudo, seria interessante discutir os efeitos das chuvas de alta intensidade, que vêm se tornando cada vez mais comum na região. Uma estação pluviométrica dentro dos limites da fazenda está prevista para entrar em funcionamento, o que possibilitaria tais reflexões ao cruzar estes dados com os resultados sobre a infiltração que serão apresentados nos próximos itens.

3.2 Metodologia para gerar os mapas de porosidade e textura

Conforme apresentado anteriormente, um estudo detalhado do processo de infiltração da água no solo necessita do conhecimento de diversos fatores que o influenciam. Muitos destes fatores podem ser espacializados e são comumente gerados através de técnicas de sensoriamento remoto e pesquisas complementares de campo, como nos casos dos mapas apresentados anteriormente: geológico, geomorfológico, declividade, pedológico, cobertura vegetal e direção de fluxo superficial, embora este último seja um estudo mais específico.

No entanto, o desenvolvimento de mapas de propriedades específicas do solo ainda não é tratado como prática comum para microbacias ou outras demandas que necessitam de uma escala detalhada. Neste contexto, é notável a importância do desenvolvimento e conhecimento de metodologias que permitam, com recursos não tão vastos, gerar subsídios a estes tipos de estudos. Dentre diversas opções existentes, uma ferramenta para auxiliar estas necessidades são os métodos de interpolação que, através de amostras pontuais, são capazes de gerar informações relativas a toda a área correspondente à localização destas amostras.

Sobre métodos de interpolação, Burrough (1998) diz que quando os dados são abundantes, a maior parte deles produz valores semelhantes. No caso de dados esparsos, no entanto, tais métodos possuem limitações na representação da variabilidade espacial, uma vez que não consideram a localização das amostras e, então, desconsideram a continuidade do fenômeno.

Para tentar solucionar tais problemas, Matheron (1971) propôs a *krigagem*, que será o método de interpolação utilizado neste trabalho para gerar o mapa da distribuição da variável *porosidade* e também para a *textura* do solo. Segundo Vieira (2000), a krigagem tem capacidade de produzir melhores estimativas em termos de interpolação, porque é embasada em duas premissas: não-tendenciosidade do estimador e variância mínima das estimativas. Para sua aplicação, é necessário, essencialmente, que seja determinada a dependência espacial da variável. Esta verificação é dada através da utilização de semivariogramas, pois

interpolações requerem, a rigor, o conhecimento da estrutura da variabilidade espacial do conjunto de dados, sob o risco de se criarem resultados indesejáveis.

Desta forma, os próximos itens apresentados abordarão os procedimentos utilizados para gerar os mapas de predição da variável porosidade e também da textura do solo, mostrando desde as estratégias utilizadas para a coletas de amostras, como foram mensuradas estas variáveis, até as técnicas empregadas em ambiente SIG para que os mapas pudessem ser elaborados.

3.2.1 *Processo de Amostragem*

Um dos maiores questionamentos dentro dos estudos que envolvem métodos de interpolação refere-se à quantidade de amostras necessárias para a obtenção de resultados representativos. Geralmente, o tamanho da área em estudo é tomado como referência. Porém, alguns autores, como Webster e Oliver (1993), afirmam que não existe um número mínimo para estudos geoestatísticos e ressaltam a importância dos resultados serem complementados por conhecimento técnico ou informações adicionais de áreas similares à área de estudo e que foram melhor amostradas.

Devido à grande diversidade da paisagem da região de estudo, inserida em relevos acidentados, não se determinou um número específico de amostras. O estudo buscou um caminho paralelo, onde o banco de dados foi sendo elaborado em diversas etapas até alcançar qualidade desejada, orientado a partir da observação da espacialização da variável analisada e do erro atribuído ao processo. O processo de amostragem também buscou ser o mais abrangente possível, de tal forma que todas as unidades geológicas e geomorfológicas (apresentadas na Figura 15 e na Figura 16 fossem analisadas, de maneira que nas etapas finais fosse possível relacionar os resultados obtidos. Vale ressaltar que grande parte desta etapa foi realizada por Domingos (2005) e Camarinha (2008) em estudos prévios, cabendo ao atual estudo somente complementá-los.

3.2.2 *Procedimentos Geoestatísticos*

Os procedimentos adotados para aplicação da geoestatística tiveram objetivo de avaliar, em cada etapa, a qualidade dos dados obtidos e os resultados parciais, questionando sempre a viabilidade da metodologia aplicada e buscando novas soluções para melhoria dos resultados finais. A Figura 22 apresenta uma síntese dos procedimentos adotados para a

elaboração do mapa de predição da porosidade, passo a passo, e as diferentes opções para determinadas situações, que tomam como base o estudo realizado por Camarinha et al. (2008). Procurou-se organizar os passos em três etapas principais: 1ª etapa - definição e preparo dos dados (do passo 1 ao 5); 2ª etapa - análises dos dados (do passo 6 ao 9) e; 3ª etapa - otimização do processo (do passo 10 ao 13).

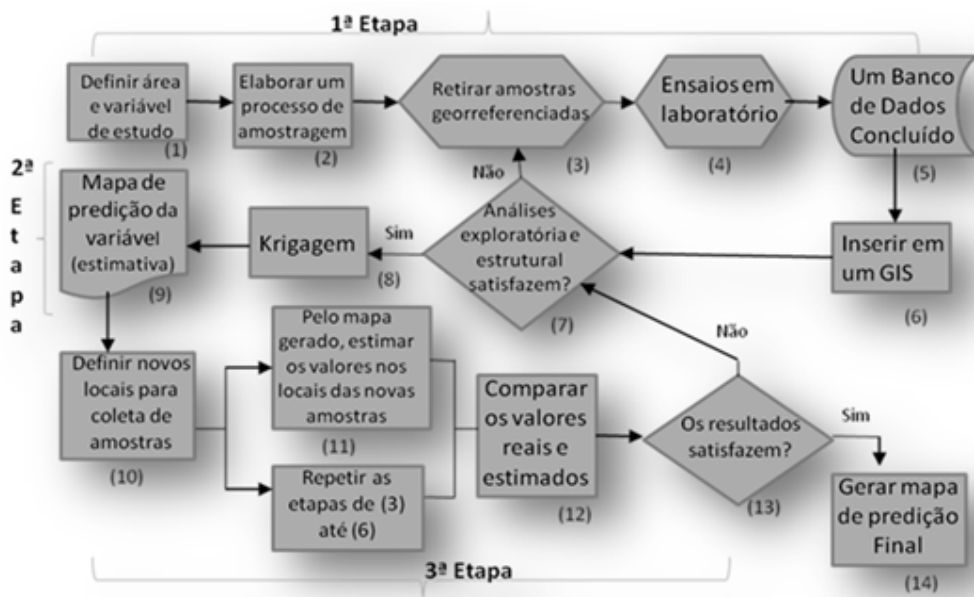


Figura 22 - Organograma esquemático proposto para os procedimentos adotados na elaboração de um mapa de predição com qualidade desejável (Camarinha et al., 2008).

3.2.2.1 Definição e preparo dos dados

Após a definição da área de estudo (Fazenda Santa Edwiges), a porosidade total foi escolhida como a variável do solo a ser analisada pela presente proposta, devido a dois fatores: a) facilidade no processo de amostragem e b) associação com o fenômeno da infiltração e movimentação da água no solo, que é intrínseco a cada tipo de solo. No caso da textura do solo, ela também é um fator relacionado ao processo de infiltração, mas não é tão fácil de ser obtida em ensaios laboratoriais. Entretanto, este trabalho buscou uma metodologia alternativa para viabilizar suas caracterizações, que será apresentada posteriormente.

O passo seguinte foi o estabelecimento do banco de dados que, em estudos prévios realizados por Domingos (2005), contou com 30 (trinta) amostras pontuais georreferenciadas. Camarinha (2008) deu seqüência a estes estudos, coletando mais 11 (onze) amostras, totalizando 41 (quarenta e um) pontos de amostragem.

Cada amostra possui, além dos valores da porosidade total e de suas coordenadas espaciais, valores para diferentes parâmetros do solo como o peso específico natural e seco, umidade, índice de vazios e densidade dos grãos; em 3 profundidades diferentes: superficial, a 50 e 100cm. Tais parâmetros foram obtidos por meio de análises físicas realizadas no Laboratório de Mecânica dos Solos e Geossintéticos da FEG/UNESP. Para este trabalho, a determinação dos valores da porosidade total é dada por meio de correlações com outros parâmetros físicos do solos: peso específico, umidade e densidade dos grãos.

Todos os parâmetros do solo acima descritos foram obtidos laboratório e correspondem às pesquisas realizadas por Domingos (2005) e Camarinha (2008). Já a caracterização do solo quanto a sua textura é exclusiva deste estudo. Mais detalhes de como este procedimento foi executado será apresentado em itens posteriores.

3.2.2.2 *Análise dos dados*

A criação de um banco de dados georreferenciados é feita por meio da inserção de novos pontos, um a um, amarrados a um sistema de coordenadas e de projeção, utilizando-se os recursos disponíveis em um SIG. Para o desenvolvimento destas etapas, utilizou-se o software ArcGIS[®], desenvolvido pela ESRI. Em seguida, foram atribuídos os valores dos diversos índices físicos conhecidos, dentre eles a porosidade e a textura.

No caso da porosidade, se buscou elaborar dois mapas preliminares de predição da variável e também do erro associado às estimativas. O mapa de erro é elaborado de forma análoga ao de predição de qualquer variável. Entretanto, ao invés de se utilizar, para cada ponto, o valor conhecido da variável, utiliza-se o erro observado. Este erro existe devido ao fato de que a krigagem considera a influência das amostras vizinhas para estimar os valores em qualquer localidade, inclusive onde já existe uma amostra coletada. Portanto, o valor estimado não será, necessariamente, igual ao valor real de campo. Estes mapas fornecem subsídios à análise do modelo gerado, definindo locais com as maiores incertezas e, conseqüentemente, onde novas amostras devem ser retiradas para complementar o banco de dados.

É válido ressaltar que durante a elaboração dos mapas preliminares, ou seja, etapas que precedem a elaboração do mapa de predição final (passo 14, Figura 22), algumas análises estatísticas (passo 7) como a verificação do histograma, validação cruzada, análise de tendência, entre outras, não foram realizadas de modo aprofundado, sob o risco da metodologia se tornar inviável do ponto de vista prático. Portanto, todos os mapas

preliminares (passo 9) tiveram o foco voltado somente para obtenção de variogramas que fossem capazes de verificar a dependência espacial da variável de estudo.

Para aplicar o método de interpolação krigagem, utiliza-se a extensão *Geostatistical Analyst*, do software ArcGIS®. A fundamentação teórica utilizada na rotina do programa está apresentada no item 2.5.

3.2.2.3 *Otimização do processo*

A qualidade dos dados disponíveis é avaliada por meio de análises espaciais e exploratórias (histogramas, análise de tendência, verificação de *clusters* etc.) Dependendo destas análises, pode-se verificar que a o banco de dados obtido fornece condições suficientes para a geração de mapas de predição confiáveis. Caso contrário é possível, ainda, obter-se informações que poderão orientar o desenvolvimento do trabalho, como indicar novas área de amostragem, de maneira que se possa planejar e, então, alcançar os objetivos do estudo.

Somente depois de alcançada a qualidade desejada, ou seja, quando for verificado que não há praticamente diferença entre os valores estimados pela krigagem e os valores reais observados em campo, é que se iniciam os estudos mais aprofundados, buscando informações entre os diferentes resultados obtidos e através de dados já existentes. As análises desta etapa possibilitam verificar a distribuição do erro associado à estimativa, a existência e a representatividade do variograma observado e ainda se o próprio resultado obtido está de acordo com o esperado para a variável e a região de estudo (Camarinha et al., 2008).

3.2.3 ***Lógica Fuzzy aplicada a Textura do Solo***

O presente trabalho utilizará os conceitos da Lógica Fuzzy (apresentado no item 2.6) para estudar a textura do solo. O intuito é analisar amostras de solo com diferentes texturas e classificá-las, sob o olhar da *lógica fuzzy*, em diferentes conjuntos e que possam ser expressos de forma numérica. Através destes valores *fuzzy*, o objetivo é implementar métodos de interpolação baseados na geoestatística para conhecer sua distribuição espacial da textura do solo na área de estudo.

Para isso, o conjunto de amostras foi submetido a análises táctil-visuais. Este procedimento foi realizado tomando como base a norma ASTM D2488, *Identificação Expedida dos Solos em Campo* (American Society for Testing and Materials, 1984) – utilizando-o para identificação das classes do *Sistema Unificado de Classificação dos Solos*

(SUCS). Dentre os principais fatores analisados, destacam-se: a coloração das amostras de solo, inspeção visual para identificar minerais primários (sobretudo quartzo) no solo destorroado, resistência à seco (agregação) e aderência das partículas quando umedecidas para identificar sua plasticidade. Para estes aspectos, solos arenosos e argilosos tendem a ter características diferenciadas.

No que se refere a coloração, foi observado que solos predominantemente argilosos encontrados na região de estudo tendem a ser mais avermelhados e, se possuírem matéria orgânica, tons mais escuros. Enquanto solos arenosos tendem a tonalidades mais claras, variando entre o branco, cinza claro, amarelo e matizes alaranjadas.

Quanto à resistência, a atração entre as partículas de solos argilosos (interação físico-química) caracterizam a coesão do agregado, tornando estes tipos de solo mais resistentes, enquanto os solos arenosos e siltosos se desfazem facilmente ao tentar rompê-los manualmente.

Em contato com a água, solos argilosos e aqueles que possuem um alto teor de matéria orgânica, apresentam comportamento plástico, de modo que é possível moldá-lo facilmente, situação esta que não acontece para solos arenosos.

Na análise visual dos grãos, a presença de materiais grosseiros em grande quantidade, sobretudo o quartzo, caracteriza solos com grande fração arenosa. Por outro lado, as partículas que compõem solos argilosos são extremamente finas, normalmente não sendo possível observá-los a olho nu.

Juntando todas estas informações, procurou-se classificar os solos como sendo predominantemente argilosos ou arenosos, atribuindo também classes intermediárias com a presença de frações siltosas. A Figura 23 mostra os seis principais grupos de solos encontrados na área de estudo e como as amostras foram classificadas quanto a sua textura.



Figura 23 - Seis principais tipos de solos encontrados durante a classificação expedita do solo, através de análises tátil-visuais, quanto a sua textura.

A partir desta análise, procurou-se converter as classes texturais encontradas em valores numéricos, utilizando os conceitos da Lógica Fuzzy. Sendo assim, dois extremos foram estabelecidos, representando solos predominantemente argilosos e arenosos, de modo que todas as amostras possam ser classificadas numericamente, conforme seu grau de pertinência referente à textura.

O parâmetro de referência utilizado é o quanto este solo pode ser caracterizado como argila. Para isso, levaram-se em consideração as características notórias que estes solos apresentam, conforme a ASTM D2488, atribuindo valores próximos a 1 (um) para estes casos. A situação oposta, ou seja, solos arenosos, receberam valores mais próximos de 0 (zero). Para os casos intermediários, com grande quantidade de silte, atribuíram-se valores medianos, variando entre 0,30 e 0,70. A Figura 24 ilustra como esta classificação foi feita e os respectivos valores numéricos atribuídos para cada caso.

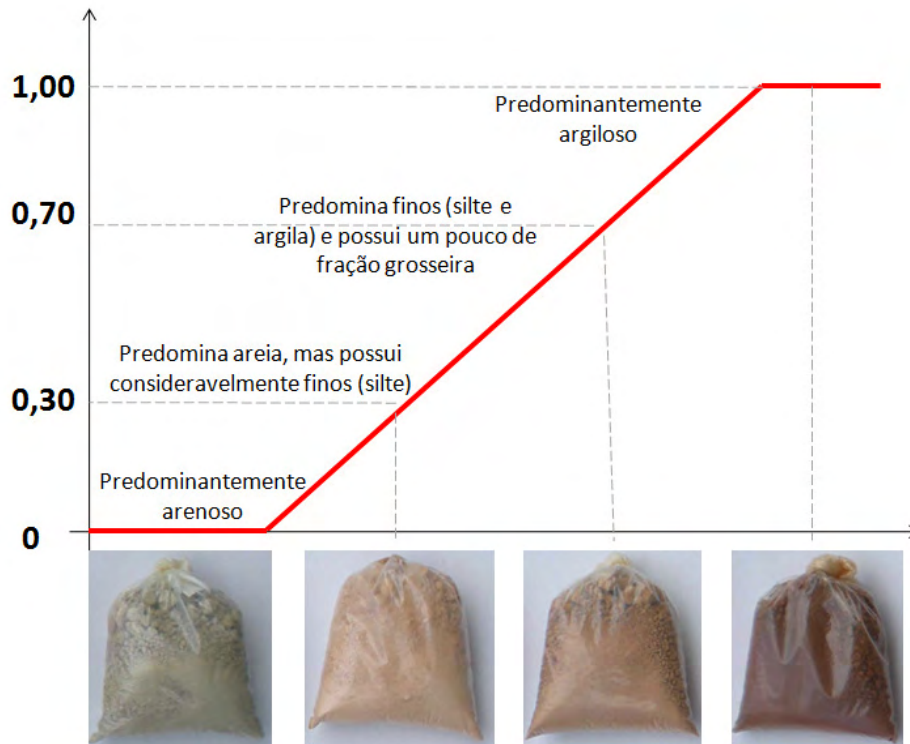


Figura 24 - Classificação da textura do solo utilizando Lógica Fuzzy.

A partir desta metodologia, cada amostra de solo possui, além dos parâmetros físicos já mencionados no item 3.2.2.1 obtidos em laboratório, um valor numérico que representa textura do solo. Com isso foi possível realizar análises geoestatísticas para avaliar as características espaciais da textura do solo e, assim, estimar sua distribuição espacial para toda a região de estudo através da aplicação da krigagem.

3.3 Mapas de Densidade de Escoamento e Densidade de Drenagem

Os mapas de Densidade de Escoamento e de Densidade de Drenagem são uma forma alternativa de representar as informações fornecidas pelo mapa apresentados nas Figura 18 (Direção da Dinâmica do Escoamento Superficial e Rede de Drenagem). Neste mapa original, as informações estão na forma linear (linhas de escoamento e de drenagens), sendo inviável cruzá-las na etapa de Álgebra de Mapas, visto que só fornecem informações de locais muito específicos dentro na área de estudo. Ao gerar os Mapas de Densidade para as linhas de escoamento e drenagem, torna-se possível obter informações espaciais adicionais quanto a distribuição destes elementos dentro da área de estudo.

A opção *Density*, da ferramenta *Spatial Analyst* do software ArcGIS® permite gerar estes mapas de forma prática e rápida, cabendo ao usuário somente escolher a informação linear que deseja gerar o mapa de densidade e o raio de busca (que corresponde a uma área circular) que o software irá utilizar para calcular quanto destas linhas (soma dos comprimentos) cada ponto da área de estudo possui.

Desta forma, as informações que antes estavam em forma de linha passaram a ter uma representação espacial em forma de superfície, permitindo o cruzamento com outros mapas na etapa de Álgebra de Mapas.

3.4 Álgebra de Mapas

A álgebra de mapas tem como objetivo cruzar informações disponíveis na forma de mapas, onde cada pixel desses mapas possui um valor numérico, selecionado por meio de critérios lógicos para interpretar e resolver problemas espaciais (Tomlin, 1990), sendo realizada em ambiente SIG.

No presente estudo, o intuito é cruzar informações cartográficas para gerar um mapa de potencial de infiltração para a área de estudo, em escala de detalhe (1:25.000). Em outras palavras, a proposta é atribuir valores numéricos para cada classe (*ponderações*) dos mapas utilizados, seguindo a lógica proposta. Por convenção, costuma-se utilizar valores mais elevados para as classes que apresentem maior pertinência dentro da lógica estabelecida. Por exemplo, áreas com solos arenosos receberam uma pontuação mais alta que solos argilosos devido à facilidade da água infiltrar nestes tipos de solo, do mesmo modo que declividades mais baixas recebem valores mais altos quando comparados com terrenos íngremes. Esta análise foi feita detalhadamente para cada um dos mapas utilizados.

Este processo foi feito através de discussões entres especialistas de cada assunto e visando cumprir os objetivos propostos. Após estas atribuições, estes valores foram exportados para ambiente SIG para que os mapas fossem “cruzados” (somados).

Antes de realizar esta soma, é possível também estabelecer pesos diferentes para cada um dos mapas, estabelecendo uma *hierarquização* entre eles, segundo o grau de pertinência relativo ao processo de infiltração. Esta discussão também deve ser embasada nas premissas do projeto, previamente estabelecidas.

3.4.1 Ponderação das classes

Após classificar as classes de cada um dos mapas que serão utilizados, foram necessários alguns procedimentos para organizar e criar arquivos digitais que permitissem o cruzamento de informações em ambiente SIG.

Para a Álgebra de Mapas, os arquivos referentes aos mapas precisam estar em formato RASTER, onde cada pixel possuirá um valor referente a ponderação estabelecida. Como a maioria dos mapas utilizados estava em formato de *shapefile*, foi necessário convertê-los. Este procedimento pôde ser facilmente realizado utilizando-se o ArcGIS® versão 9.3, através da opção *Convert features Raster*, disponível nas ferramentas do *Spatial Analyst*.

3.4.2 Hierarquização dos layers (mapas)

Cada mapa, que corresponde a um *layer* (camada), pode possuir um peso diferente dentro da análise proposta. Após a definição de quais pesos serão atribuídos, segue-se para a etapa do cruzamento das informações, que é feita através da opção *Raster Calculator*, dentro do *Spatial Analyst*. Esta ferramenta pode ser entendida como uma calculadora comum, que permite realizar operações matemáticas, onde os operadores matemáticos agem entre os mapas. É neste momento que a hierarquização é inserida no cálculo, de modo que os pesos são os números que multiplicam cada um dos *layers* que, por sua vez, são somados entre si.

4 RESULTADOS

4.1 Geoestatística Aplicada aos Mapas de Porosidade

4.1.1 Mapas preliminares

As análises iniciais para gerar o mapa de predição da porosidade contaram, inicialmente, com 30 amostras recolhidas e examinadas no Laboratório de Mecânica dos Solos, UNESP / FEG. A Figura 25 mostra a localização de cada amostra dentro da Fazenda Santa Edwiges. Sua posição espacial e os valores de porosidade para cada profundidade (superfície, 50cm e 100cm) também podem ser observados na tabela da Figura 25.

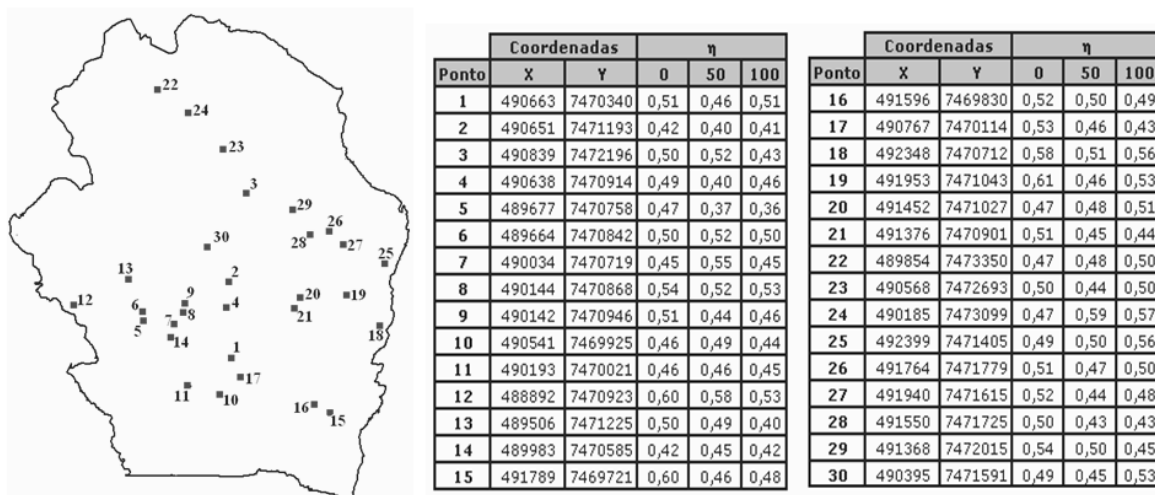


Figura 25- Locais das 30 primeiras amostras e valores da porosidade

Com base nesse banco de dados inicial de 30 amostras, uma primeira análise foi realizada para produzir um mapa de predição da porosidade superficial e também do erro associado à estimativa. A Figura 26 apresenta o primeiro dos mapas preliminares que foram gerados. As linhas e superfícies mais escuras representam onde há maior erro de previsão e maior porosidade, respectivamente.

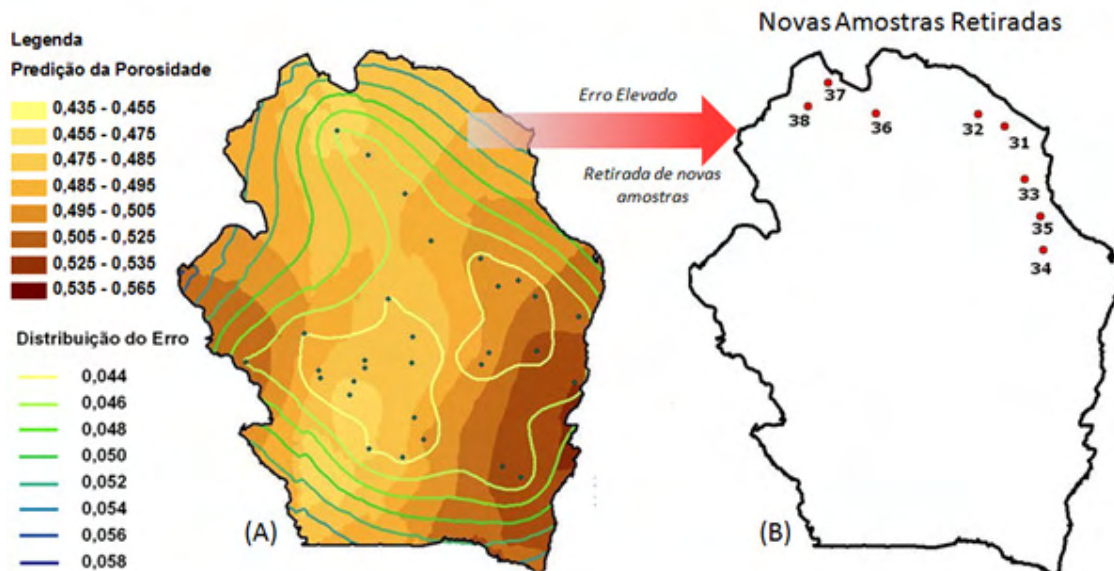


Figura 26 - (A) Predição da porosidade superficial e distribuição do erro associado; (B) novos locais para amostragem.

Neste primeiro mapa preliminar, apresentado na Figura 26(A), as regiões próximas do limite físico da área de estudo identificaram as áreas com maior incerteza, sobretudo na porção norte. Por essa razão, um novo conjunto de amostras de solo foi retirado nesta localidade, como ilustrado Figura 26(B).

Estes novos pontos amostrados permitiram verificar também se a quantidade de amostras era representativa em relação às diferentes unidades geológicas e geomorfológicas existentes na área de estudo, orientando o processo de amostragem realizado.

Estas oito novas amostras foram também submetidas a ensaios laboratoriais para sua caracterização. A partir dos resultados obtidos destes ensaios, foi feita uma comparação entre os valores de porosidade estimados por krigagem (Figura 26A) e os valores reais, determinados a partir de exames laboratoriais (Tabela 1).

Tabela 4 - Comparação entre os valores de porosidade do solo, obtidos por análises laboratoriais e estimados através da Krigagem.

Sample	Estimated Value	Real Value	Real Error	Estimated Error
31	0,49	0,474	0,016	0,033
32	0,495	0,52	0,025	0,048
33	0,495	0,465	0,03	0,160
34	0,51	0,414	0,096	0,188
35	0,505	0,42	0,085	0,169
36	0,482	0,489	0,007	0,015
37	0,475	0,459	0,016	0,034
38	0,492	0,477	0,015	0,031

Pode ser verificado que somente dois pontos (34 e 35), apresentaram valores reais muito discrepantes daqueles estimados por krigagem. Esta disparidade está relacionada com o fato de que nestas localidades foram constatados outros tipos de solo, não encontrado nas demais regiões da área de estudo. No ponto 34, o solo na superfície foi caracterizado como *residual jovem arenoso siltoso marrom* e no ponto 35 como *colúvio marrom, acima da linha de seixos*.

Desta forma, levando em consideração o tamanho da área de estudo e o baixo número de amostras nesta etapa, esta primeira comparação entre os dados reflete uma qualidade considerável do modelo utilizado e aponta para possibilidade da aplicação da krigagem.

Mesmo considerando aceitável a qualidade destes resultados preliminares, elaborou-se novamente um mapa de predição do erro utilizando o novo banco de dados, com 38 pontos amostrais, com o intuito de ainda se identificar área que necessitassem de mais amostras para tornar o modelo representativo. Os mapas (A) e (B) da Figura 27 representam a distribuição do erro para o banco de dados com 30 e 38 amostras, respectivamente.

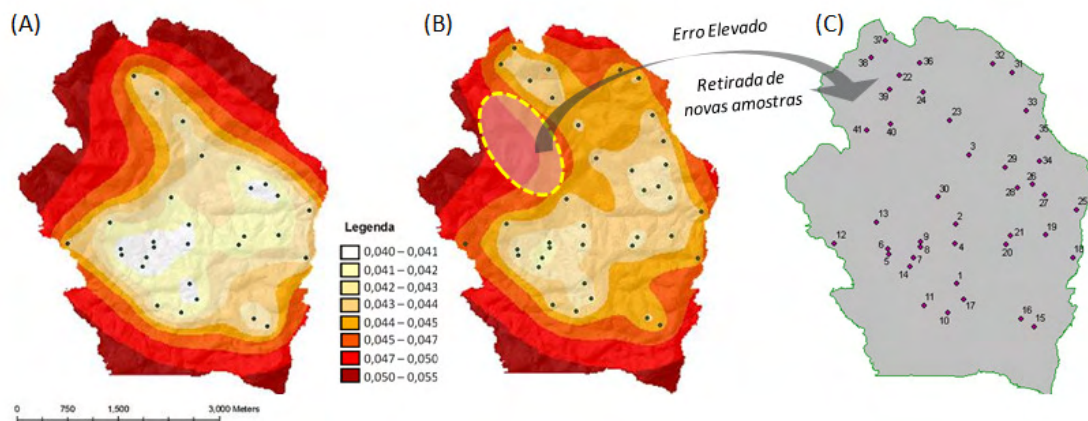


Figura 27 – Mapas do erro associado na predição da porosidade superficial: (A) banco de dados com 30 amostras; (B) 38 amostras. O mapa (C) localiza as 3 novas amostras coletadas.

Analisando o mapa (B) apresentado na Figura 27, a Noroeste da fazenda ainda foi possível constatar a existência de uma região com erro elevado, ou seja, com baixa representatividade diante do modelo elaborado. A partir desta observação, objetivou-se a retirada de três novas amostras nesta região, indicadas pelas amostras 39, 40 e 41 no mapa da direita da Figura 27.

Minimizadas as áreas com alto erro elevado dentro da região de estudo, nesta etapa da pesquisa o processo de amostragem foi finalizado, contando com 41 amostras. As suas

coordenadas espaciais e os valores da porosidade para as três profundidades analisadas estão apresentadas na Tabela 5. Nesta tabela também estão apresentados os valores para a textura, provenientes das análises táctil-visuais e dos conceitos *fuzzy* apresentados no item 3.2.3.

Tabela 5 – Banco de dados final utilizado neste trabalho.

Amostra	Coordenadas em UTM		porosidade (η)			Textura
	X	Y	superfície	50cm	100cm	
1	490663	7470340	0,51	0,46	0,51	0,20
2	490651	7471193	0,42	0,40	0,41	0,50
3	490839	7472196	0,50	0,52	0,43	0,40
4	490638	7470914	0,49	0,40	0,46	0,20
5	489677	7470758	0,47	0,37	0,36	0,50
6	489664	7470842	0,50	0,52	0,50	0,95
7	490034	7470719	0,45	0,55	0,45	0,80
8	490144	7470868	0,54	0,52	0,53	0,00
9	490142	7470946	0,51	0,44	0,46	0,90
10	490541	7469925	0,46	0,49	0,44	0,10
11	490193	7470021	0,46	0,46	0,45	0,80
12	488892	7470923	0,60	0,58	0,53	1,00
13	489506	7471225	0,50	0,49	0,40	1,00
14	489983	7470585	0,42	0,45	0,42	0,30
15	491789	7469721	0,60	0,46	0,48	0,30
16	491596	7469830	0,52	0,50	0,49	0,10
17	490767	7470114	0,53	0,46	0,43	0,00
18	492348	7470712	0,58	0,51	0,56	0,10
19	491953	7471043	0,61	0,46	0,53	0,00
20	491452	7471027	0,47	0,48	0,51	0,00
21	491376	7470901	0,51	0,45	0,44	0,30
22	489854	7473350	0,47	0,48	0,50	0,90
23	490568	7472693	0,50	0,44	0,50	1,00
24	490185	7473099	0,47	0,59	0,57	1,00
25	492399	7471405	0,49	0,50	0,56	1,00
26	491764	7471779	0,51	0,47	0,50	0,00
27	491940	7471615	0,52	0,44	0,48	0,40
28	491550	7471725	0,50	0,43	0,43	0,80
29	491368	7472015	0,54	0,50	0,45	0,70
30	490395	7471591	0,49	0,45	0,53	1,00
31	491471	7473389	0,47	0,48	0,48	0,20
32	491194	7473517	0,52	0,49	0,39	0,90
33	491673	7472839	0,47	0,56	0,51	0,15
34	491873	7472103	0,41	0,44	0,43	1,00
35	491839	7472453	0,42	0,38	0,42	1,00
36	490129	7473522	0,49	0,49	0,57	1,00
37	489625	7473842	0,46	0,42	0,53	1,00
38	489422	7473598	0,48	0,51	0,46	0,90
40	489707	7472633	0,45	0,51	0,55	1,00
39	489670	7473159	0,48	0,54	0,51	1,00
41	489361	7472539	0,51	0,52	0,50	0,90

Antes de executar a interpolação dos dados através da krigagem, houve a necessidade de se analisar a qualidade dos dados, verificar se estes apresentavam uma boa dependência espacial e se suas características espaciais que estão de acordo com os princípios básicos da *geoestatística*. Estas análises estão apresentadas nos próximos itens.

4.1.2 Histogramas

Para as análises da qualidade dos dados, alguns autores, como Folegatti (1996), propõem a utilização de *histogramas*. É afirmado que, para o ajuste dos variogramas, a normalidade dos dados é somente desejável, mas não se trata de um pré-requisito. Caso a distribuição não seja normal, mas seja razoavelmente simétrica, podem-se admitir as hipóteses necessárias à construção do semivariograma.

Entretanto, os histogramas tradicionais só apresentam a frequência de algumas faixas de valores da variável (por exemplo, pontos que possuem porosidade entre 0,41 e 0,43), deixando de lado a distância entre as amostras e sua localização. Portanto, mesmo não sendo de prática comum utilizá-los desta forma, procurou-se estabelecer relações entre os intervalos de maior frequência do histograma e a localização das amostras que compõem este intervalo (Figura 28). Esta análise ajuda a identificar se as amostras mais similares estão localizadas próximas ou distantes entre si.

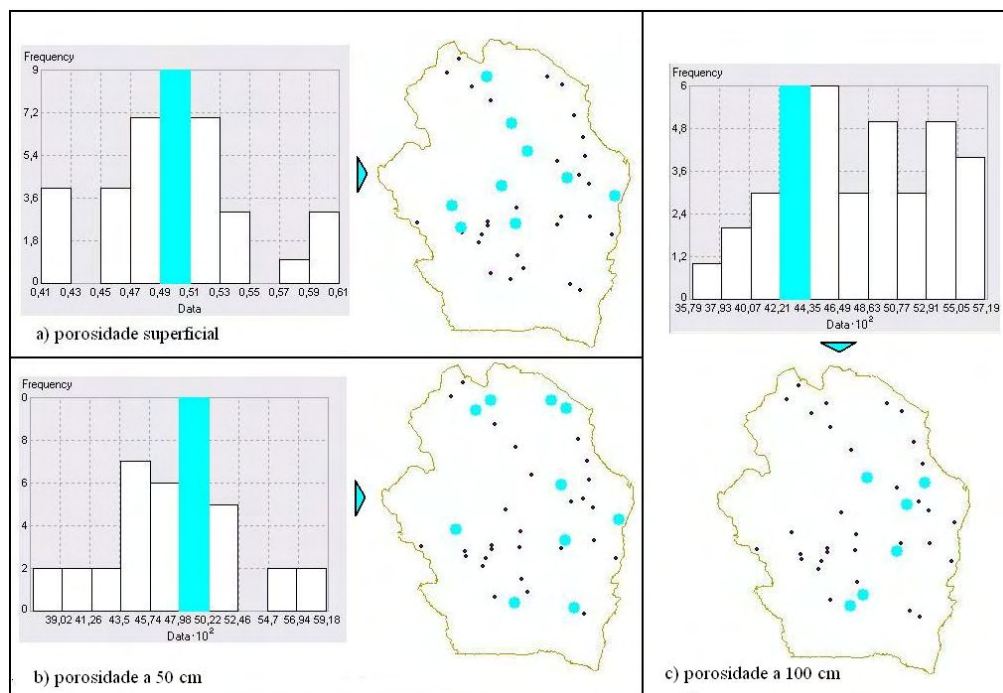


Figura 28 - Histogramas associados a distribuição espacial das amostras.

Observando os três casos nota-se que, tanto na superfície quanto a 100 cm de profundidade, as amostras com valores mais semelhantes (em destaque) estão relativamente próximas entre si, o que está em concordância com o princípio básico da geoestatística. Por outro lado, para a profundidade de 50 cm, as amostras semelhantes estão espalhadas por toda a região e estão afastadas uma das outras, indicando uma dependência espacial fraca.

4.1.3 Semivariogramas

Em seguida, é feita a análise que visa identificar o modelo de semivariograma que melhor se ajusta à distribuição dos pontos. Esta verificação é feita utilizando o programa ArcGIS[®], o qual procura estabelecer um semivariograma aproximado através da distribuição observada. A Figura 29 representa esta análise e, quando foram identificados, destacou-se os parâmetros que os definem: (a) alcance; (C) patamar e (C_0) efeito pepita.

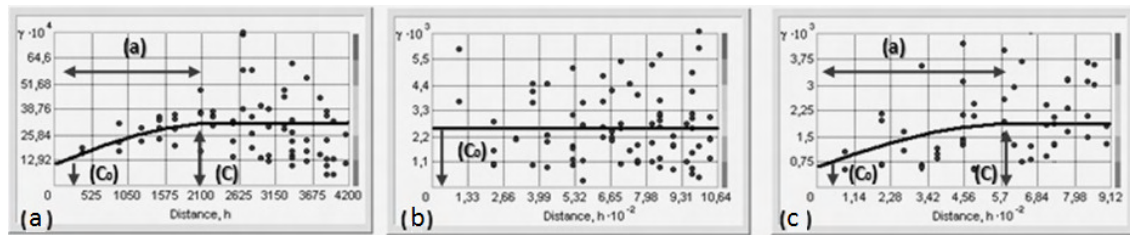


Figura 29- Semivariogramas para as profundidades: (a) superfície, (b) a 50 cm e (c) a 100 cm

É possível observar na Figura 29 que os dados coletados na superfície (Figura 29-a) e na profundidade a 100 cm (Figura 29-c) mostraram uma distribuição espacial que permitiu ajustes para um modelo de semivariograma. Por outro lado, a dispersão dos dados observada na profundidade a 50 cm (Figura 29-b) impossibilitou a ajustar qualquer variograma. Por esta razão, torna-se impossível a criação de mapas de previsão utilizando a krigagem para a porosidade a 50 cm de profundidade, sob o risco de gerar resultados inconsistentes.

Portanto, análises mais aprofundadas foram realizadas somente para as outras duas outras profundidades, ou seja, a interpolação dos dados foi aplicada para estimar a distribuição espacial somente para a porosidade superficial e a 100cm de profundidade.

Uma das etapas mais importantes consiste em encontrar um variograma experimental (circular, esférico, gaussiano, etc.) que se aproxime da distribuição observada. É a partir deste modelo de variograma escolhido que será efetuada a interpretação da estrutura de correlação espacial a ser utilizada nas inferências de krigagem (Silva, 2005). Em seguida é

recomendável buscar, através de testes direcionais sobre todas as amostras, um conjunto que melhor represente o todo, a fim de melhorar a qualidade dos dados que serão utilizados na estimativa.

Utilizando a ferramenta *Geostatistical Wizard* - que compõe a extensão *Geostatistical Analyst* do ArcGIS® - analisou-se a variável nas duas profundidades (superfície e 100cm) e obteve-se os variogramas apresentados na Figura 30, ambos utilizando o modelo Esférico como modelo para o variograma experimental.

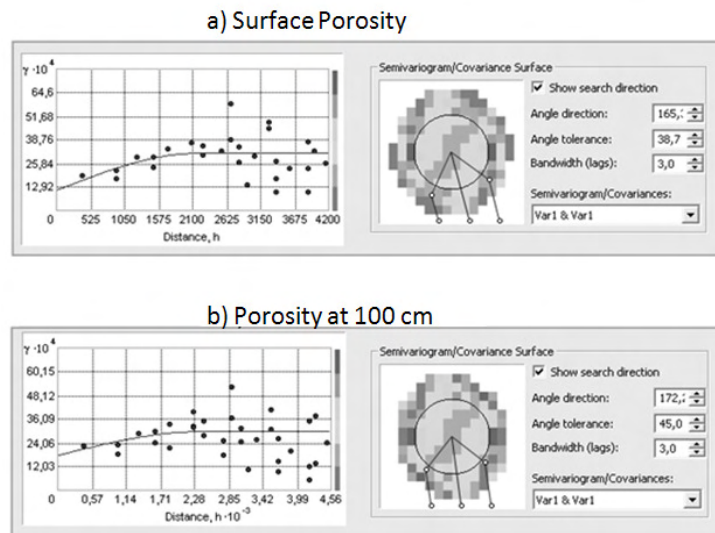


Figura 30– Variogramas direcionais obtidos para amostras de solo na: a) superfície e b) a 100cm de profundidade.

4.1.4 Definindo a Vizinhança de Busca

Nos estudos que envolvem a geoestatística, é prática comum especificar as características da *vizinhança de busca* (*search neighborhood*), que limitará o número e a configuração dos pontos (amostras) que serão utilizados na estimativa de cada ponto não-amostrado. Existem dois mecanismos para limitar a quantidade de pontos (amostras) que serão utilizados: especificar a forma da vizinhança e estabelecer a quantidade de pontos que estão dentro ou fora dela (ESRI, 2001).

Através da ferramenta *Geostatistical Wizard* é possível escolher o número de amostras vizinhas que influenciarão nas estimativas para locais não-amostrados (*Neighbors to Include*), isto é, o número de amostras que estarão contidas dentro da *vizinhança de busca* e que serão consideradas para o cálculo das estimativas. Estes ajustes são realizados pelo usuário, geralmente através do processo de tentativa e erro, verificando quais ajustes

forneem um maior *root-mean-square* (RMS) que se aproxima do valor 1, que seria o caso onde os valores estimados possuem uma maior adesão perante os valores reais conhecidos.

O tamanho da vizinhança de busca é dado pelo parâmetro *alcance* (a) do variograma, que corresponde ao raio de busca que o modelo utiliza para identificar quais amostras entram neste cálculo, cabendo ao usuário do programa decidir um número específico delas. Diante disto, optou-se por dividir a área de busca em 4 setores iguais, e foram incluídas no cálculo 3 amostras por setor, sempre utilizando no mínimo 2, pois em alguns locais a área de busca especificada não consegue englobar amostras suficientes, sendo necessário extrapolá-la (Figura 31)

Ainda nas etapas que precedem a geração do mapa, é possível alterar a forma geométrica da área de busca, geralmente circular, com o eixo maior e o eixo menor iguais ao parâmetro *range*. Entretanto, para os dois casos (superfície e 100cm), optou-se por aplicar um fator de anisotropia, gerando uma elipse, e rotacioná-la em 40° . Esta alteração justifica-se pelo fato de que, nesta direção, em praticamente toda a área de estudo, é possível encontrar amostras com maior grau de semelhança. Outro fator condicionante utilizado para esta orientação foi a zona de cisalhamento regional (que divide a fazenda em duas partes) observada no Mapa Geológico apresentado na Figura 15, que possui orientação semelhante. Com isso, diminui-se a probabilidade de amostras com diferentes propriedades influenciarem nas estimativas, melhorando a qualidade dos resultados.

A Figura 31 mostra a forma de elipse utilizada para a *vizinhança de busca* configurada para os dados de porosidade superficial, com 1500m e 800m para o semi-eixo maior e menor, respectivamente. O valor de 1500 é, praticamente, o mesmo valor do parâmetro *alcance* observado nos variogramas direcionais (apresentados na Figura 30).

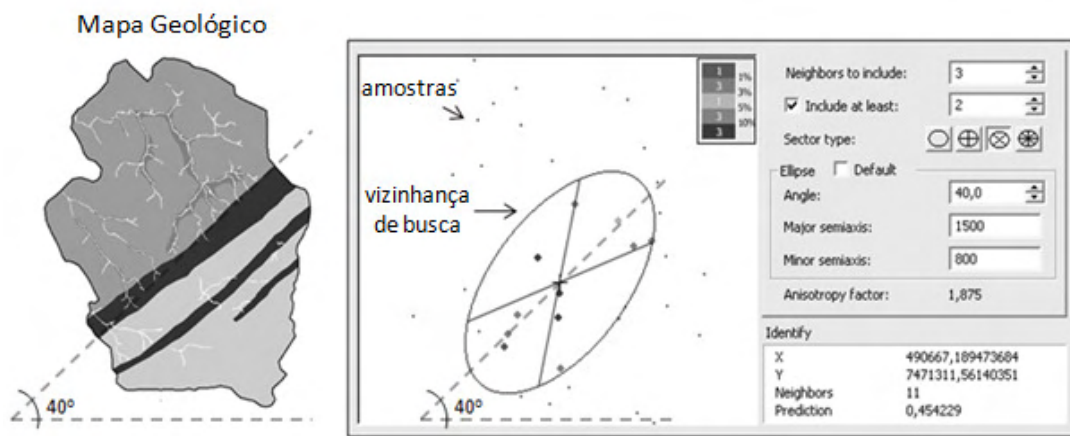


Figura 31 – Mapa Geológico e ajustes realizados para configurar a vizinhança de busca.

Os mesmos critérios foram utilizados para as configurações da *vizinhança de busca* para dados de porosidade na profundidade de 100cm. A única alteração foi o valor adotado pelo maior e menor semi-eixo, que foi definido para 1200 e 600 m, respectivamente. Essa redução foi necessária porque valores maiores para o semi-eixo implicou em RMS mais baixos, além de que os valores previstos para a porosidade apresentaram valores praticamente iguais em toda a área (baixa variabilidade), fato não condizente com a realidade observada.

4.1.5 Mapas de Predição para a Porosidade

A próxima etapa foi a aplicação da krigagem com os parâmetros estabelecidos anteriormente, tais como: o semi-variograma e sua respectiva direção, o tamanho e a forma da *vizinhança de busca* e o número de amostras vizinhas incluídas. Com essas definições, o software ArcGIS® é capaz de executar o algoritmo matemático para calcular o valor da variável porosidade para toda a área de estudo. A Figura 32 apresenta os dois mapas de predição gerados para porosidade (superfície e 100cm) e que serão utilizados posteriormente na etapa de Álgebra de Mapas.

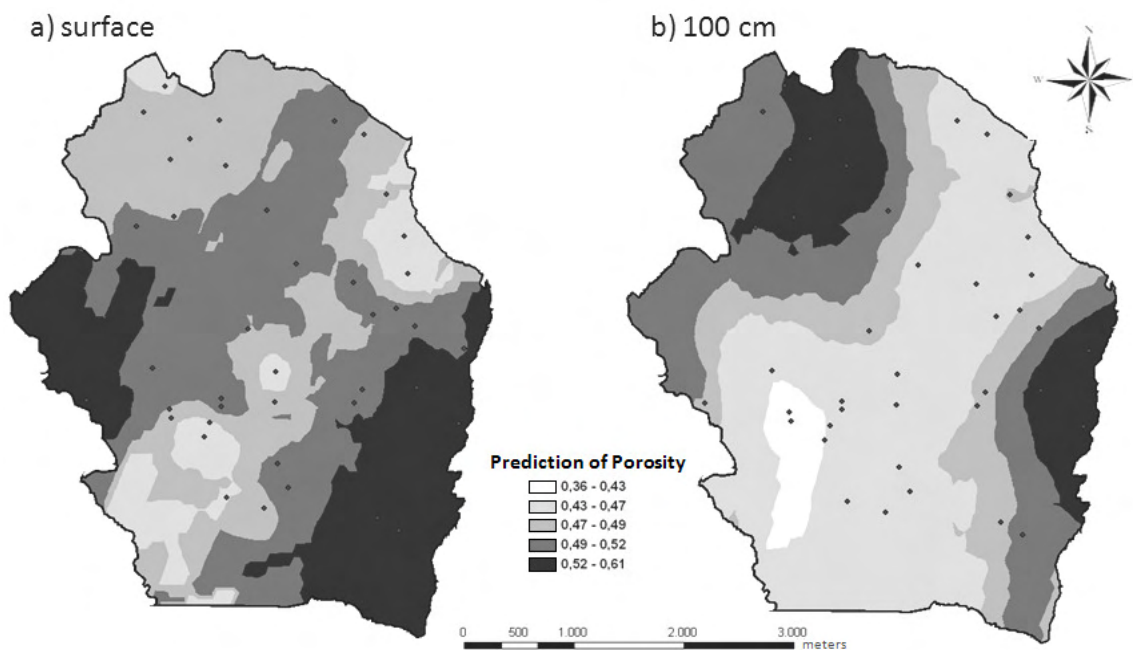


Figura 32 - Mapas de predição elaborados para a porosidade na a) superfície e b) a 100cm de profundidade.

4.2 Geoestatística para o Mapa de Textura do Solo

As técnicas empregadas para gerar o mapa de predição para a textura do solo seguem os mesmos princípios utilizados nos mapas de porosidade apresentados anteriormente. São necessárias as mesmas análises quanto à verificação da dependência espacial para que o método de interpolação krigagem possa ser aplicado. A base de dados utilizada para estes estudos é aquela que está apresentada na Tabela 5, onde os valores numéricos da textura expressam o quanto as amostras são predominantemente argilosas (valores próximos a 1) ou predominantemente arenosas (próximos de zero), conforme explicado no item 3.2.3.

4.2.1 Histogramas

Com o intuito de verificar se as amostras que compõem o maior conjunto observado no histograma estão espacialmente próximas entre si, estudou-se os histogramas juntamente com sua localização espacial. Desta forma, Figura 33 apresenta as amostras com característica de solos predominantemente argilosos (textura > 0,80) e sua localização dentro da Fazenda Santa Edwiges.

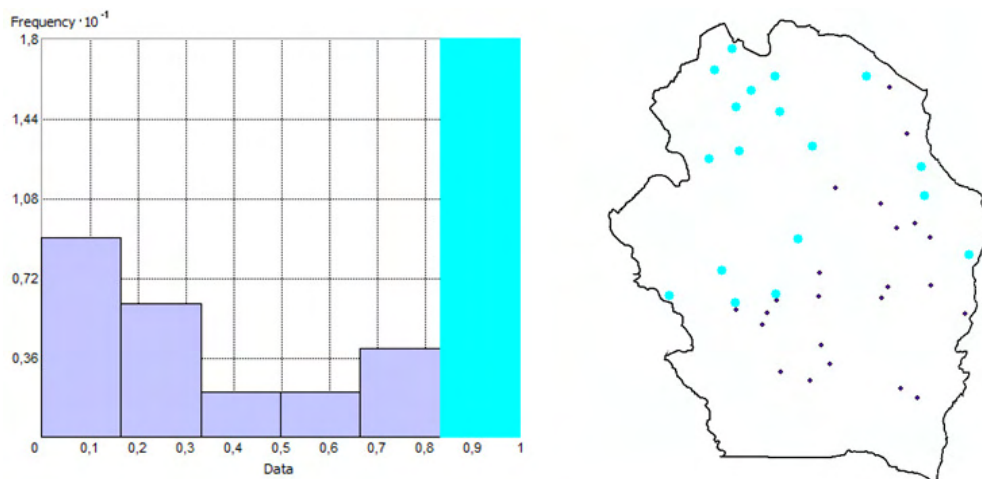


Figura 33 - Histograma associado à localização das amostras para a textura do solo.

Através da Figura 33 nota-se que a maioria das amostras com características de solo argiloso tendem a estar na porção Norte da fazenda e localizam-se bem próximas entre si. Algumas delas também podem ser encontradas na parte central da fazenda, de modo que não são encontradas amostras predominantemente argilosas na parte Sul. Desta forma, a distribuição espacial da textura está de acordo com o esperado, uma vez que a geologia e

geomorfologia da área de estudo apresentam características notoriamente diferentes nestes dois extremos (Norte e Sul).

Outro característica observada é que a distribuição dos dados de textura não seguem a forma normal (onde o histograma se parece com um sino). Entretanto, percebe-se que os dados apresentam uma certa simetria quanto aos valores extremos encontrados, característica essa esperada em estudos geoestatísticos, conforme já discutido no item 4.2.1.

Portanto, quanto à avaliação feita através do histograma, as características espaciais observadas para a variável textura indicam a possibilidade da aplicação da krigagem, lembrando que para confirmar tal fato ainda foi necessário realizar as análises seguintes, sobretudo para encontrar um semivariograma que se ajuste aos dados.

4.2.2 *Semivariograma*

Ao avaliar a distribuição espacial da textura do solo, constatou-se que os dados realmente possuíam dependência espacial, permitindo que um semivariograma pudesse ser ajustado. O modelo teórico utilizado foi o modelo Esférico e suas demais características podem ser observadas através da Figura 34.

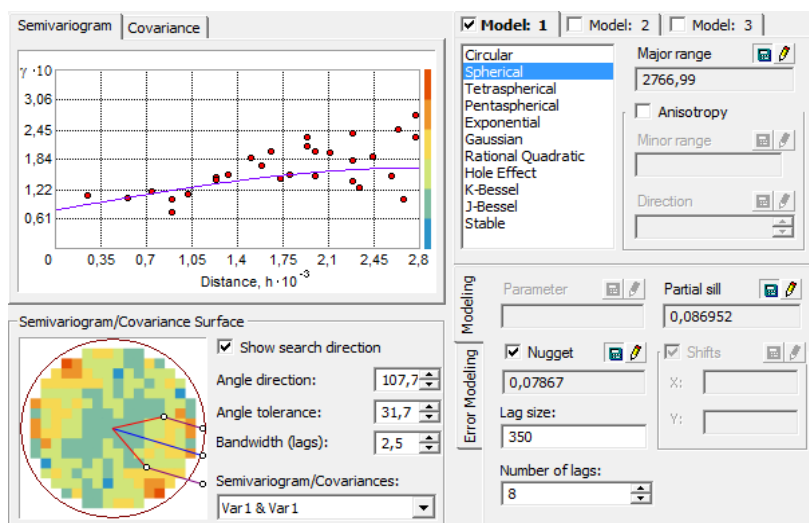


Figura 34 - Semivariograma ajustado para os dados da textura do solo.

4.2.3 *Definindo a Vizinhança de busca*

Perante ao que foi observado nas análises de ajuste do semivariograma e, principalmente, através dos histogramas, notou-se que a distribuição espacial da textura do solo apresenta uma forte dependência espacial, de modo que os principais grupos de amostras, argilosas e arenosas, estão localizadas nas porções Norte e Sul, respectivamente.

Isto permite que a forma da *vizinhança de busca* seja simples quando comparadas com o caso da porosidade, que possuía uma grande variabilidade dentro da área de estudo. Com isso, a *vizinhança de busca* não foi dividida em setores, apenas aplicando a forma elipsoidal rotacionada em 40°, de forma a agrupar amostras mais semelhantes nas estimativas da textura para os locais não amostrados. A justificativa para isso pode ser encontrada no item 4.1.4, que leva em consideração o mapa geológico da área de estudo.

Assim, a elipse utilizada possui 2000m para o maior semi-eixo e 1000m para o menor, onde a referência para tais ajustes foi o valor do parâmetro *alcance* observado no semivariograma da Figura 34, em torno de 2500m

Para melhorar a qualidade do mapa gerado, ainda aplicou-se a técnica de *Suavização* (*Smooth*) da interpolação. A técnica de *Suavização* gera mapas com mudanças menos abruptas de uma localidade para outra, sendo recomendada para os casos em que a variável analisada apresenta forte dependência espacial, como no caso da textura do solo na área de estudo.

Diferente do caso utilizado para a porosidade, esta técnica utiliza todas as amostras que estão dentro da *vizinhança de busca*, independente de quantas amostras sejam. Para realizar as estimativas, elipses concêntricas são geradas, onde as amostras que estão mais próximas do ponto a ser estimado (representado por uma cruz na Figura 35) recebem um peso maior no cálculo da estimativa. Conseqüentemente, aquelas que estão nas elipses mais distantes recebem um peso menor. A Figura 35 representa os ajustes realizados para configurar a *vizinhança de busca* utilizada na estimativa da textura do solo.

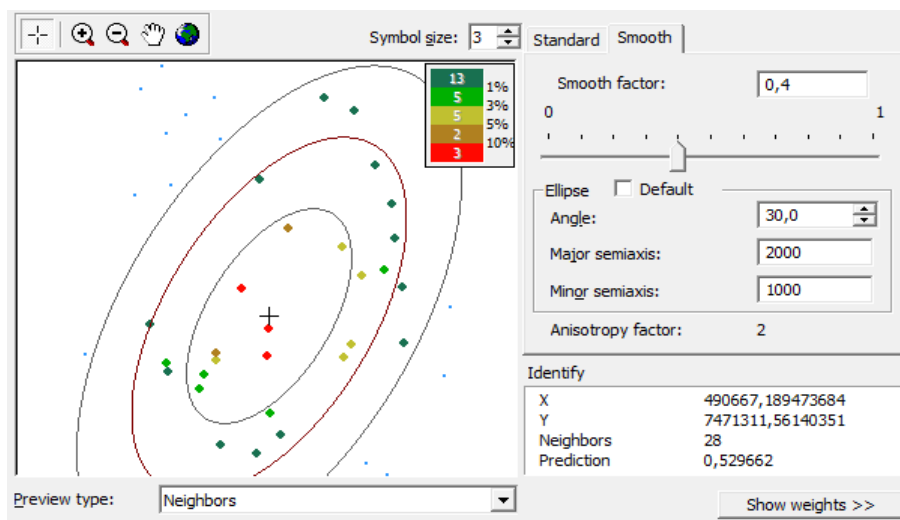


Figura 35 - Configuração da vizinhança de busca para os dados da textura do solo.

4.2.4 Mapa de Predição para a Textura do solo

Após todas as análises que verificaram a dependência espacial da textura do solo na área de estudo, o método de interpolação krigagem pode ser rodado através do software ArcGIS®, tendo como base o semivariograma e *vizinhança de busca* apresentados anteriormente. O mapa de predição da textura do solo para a Fazenda Santa Edwiges é apresentado na Figura 36, de modo que procurou-se dividir os resultados em quatro classes principais. Este mesmo mapa foi utilizado na etapa de Álgebra de Mapas, somando-o com os demais pertinentes ao estudo do processo de infiltração.

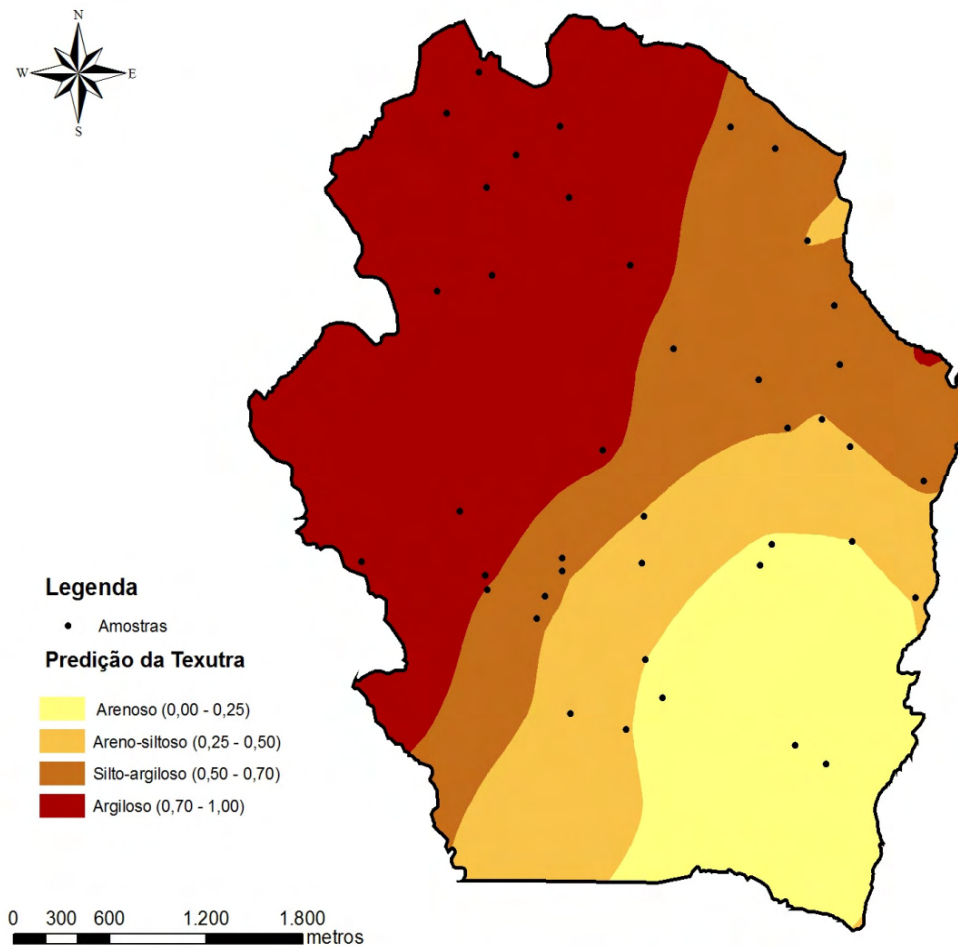


Figura 36 - Mapa de predição da Textura do Solo.

4.3 Mapa de Densidade de Escoamento Superficial

O Mapa de Densidade de Escoamento Superficial, apresentado na Figura 37, foi gerado a partir das linhas de escoamento levantadas por Bustamante (2005). Os procedimentos realizados no ArcGIS® seguem a metodologia apresentada no item 3.3. O raio de busca (*search radius*) utilizado foi de 90m, abaixo do valor normal proposto pelo software, que era de 170m. Desta forma, a densidade de escoamento para um ponto qualquer é calculada englobando somente as linhas de escoamento que estão até esta distância. Ao fundo do mapa foi colocada a superfície que representa o relevo sombreado (*hillsahde*) da área de estudo, com o intuito de melhorar a visualização do resultado.

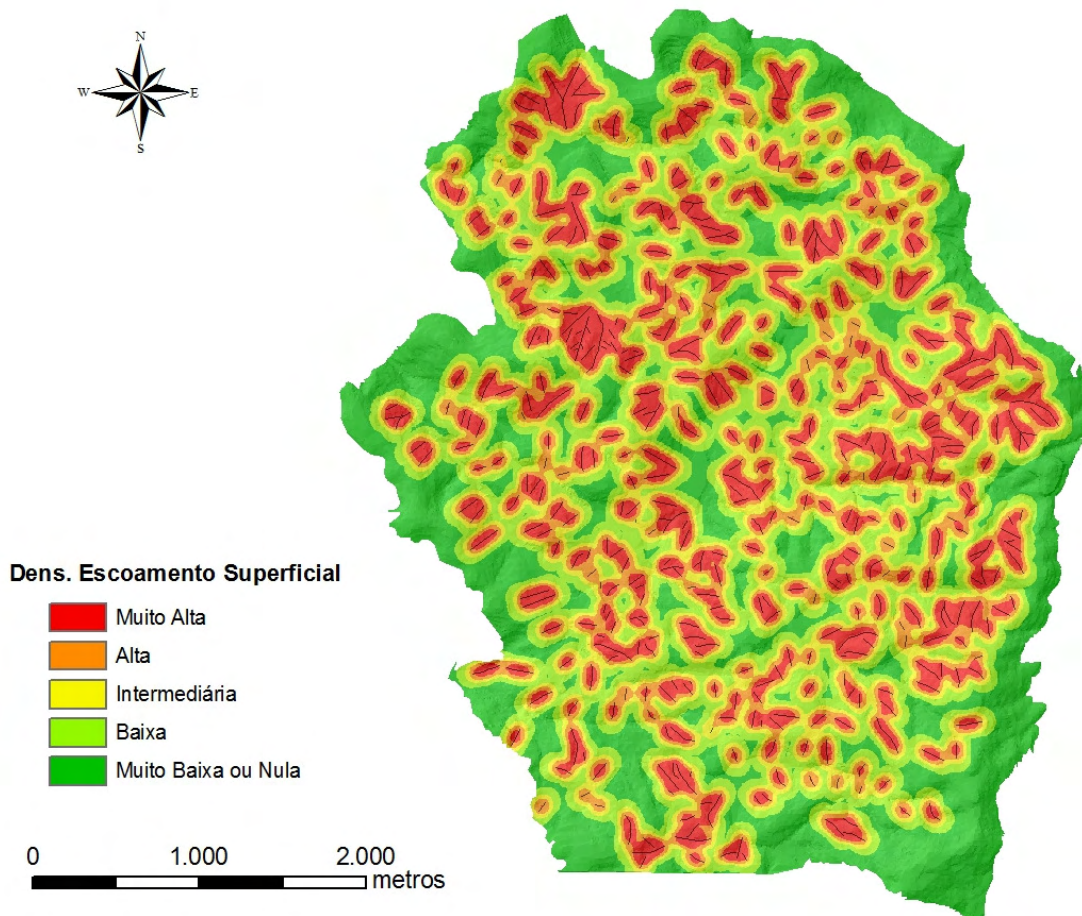


Figura 37 - Mapa de Densidade de Linhas de Escoamento.

4.4 Mapa de Densidade de Drenagem

O Mapa de Densidade de Drenagem apresentado na Figura 38 foi gerado a partir da rede de drenagem disponibilizada pela Fibria, que pode ser visualizada na Figura 18. Os procedimentos realizados no ArcGIS® seguem a metodologia apresentada no item 3.3. O raio de busca (*search radius*) utilizado foi o proposto pelo software, com 180m. Desta forma, a densidade de Drenagem para um ponto qualquer é calculada englobando somente as linhas de drenagem que estão até esta distância. Ao fundo do mapa também foi colocado o relevo sombreado, bem como as superfícies de drenagem utilizadas como base para o cálculo da densidade.

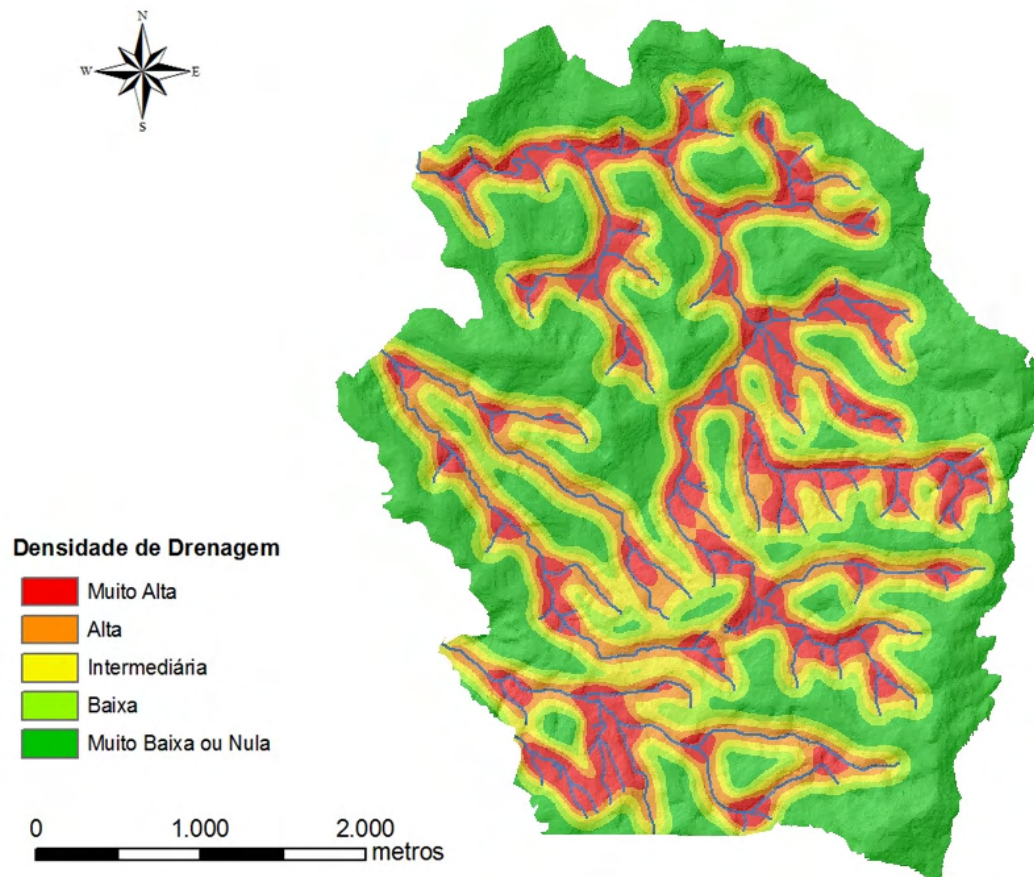


Figura 38 - Mapa de Densidade de Drenagem.

4.5 Álgebra de Mapas

Tendo em mãos todos os mapas necessários para o estudo da infiltração, foi possível seguir para a etapa de cruzamento das informações, através da Álgebra de Mapas. Para isso, primeiramente foi necessário classificar (ponderar) as classes de cada um dos mapas quanto à facilidade ou dificuldade que estas impõem ao processo de infiltração.

É importante ressaltar que cada mapa foi analisado de forma separada, não procurando correlacionar estas classes com outras provenientes de outros mapas. Por exemplo, embora as declividades acima de 100% sejam consideradas áreas de preservação permanente (APP's), ou seja, possuem grandes chances de estarem cobertas por vegetação, esta faixa de declividade é considerada a que mais dificulta o processo de infiltração.

4.5.1 Ponderação das classes dos mapas utilizados

4.5.1.1 Mapa de Declividade

Os valores associados às classes do mapa de declividade foram estabelecidos seguindo o princípio de que quanto menor a declividade, mais chances a água terá para infiltrar. Quando a água toca o solo em terrenos mais íngremes, a tendência é que ela escoe mais rapidamente pela superfície, diminuindo o tempo de contato entre a água e a superfície do terreno e, conseqüentemente, a disponibilidade para ser infiltrada nestes locais. Por outro lado, em declividades mais baixas onde os terrenos são planos ou possuem pequenas ondulações, o escoamento superficial é retardado, propiciando condições para que a água infiltre, uma vez que a tendência é que a água permaneça nestes locais por mais tempo. Desta forma, ponderou-se as faixas de declividade como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Ponderação para o mapa de Declividade

FAIXA DE DECLIVIDADE (%)	PONDERAÇÃO DAS CLASSES
0 - 3	5
3 - 15	4
15 - 25	3
25 - 50	2
50 - 100	1
> 100	0

4.5.1.2 *Mapa de Densidade de Escoamento Superficial*

As classes de Densidade de Escoamento Superficial do mapa apresentado na Figura 37 foram ponderadas de forma simples. As regiões que possuem maior quantidade de linhas de escoamento e, portanto, maior densidade, são consideradas aquelas que menos favorecem o processo de infiltração, uma vez que são regiões por onde a água escoar. Por outro lado, as regiões com densidade baixa ou nula são aquelas que, sob a análise que este mapa permite, favorecem o processo de infiltração. A ponderação das classes deste mapa segue como apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Ponderação da Densidade de Escoamento Superficial.

DENSIDADE DE ESCOAMENTO SUP.	PONDERAÇÃO DAS CLASSES
Muito Baixa	5
Baixa	4
Intermediária	3
Alta	2
Muito Alta	1

4.5.1.3 *Mapa de Densidade de Drenagem*

Segundo Soares (2005), 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. Sabe-se que solos que facilitam a infiltração apresentam um padrão pouco denso em detrimento do baixo deflúvio. Já os solos que oferecem maior resistência à infiltração, favorecem o escoamento superficial, criando um padrão de drenagem mais denso. Desta forma, as classes do Mapa de Densidade de Drenagem (Figura 38) foram ponderadas conforme a Tabela 8.

Tabela 8- Ponderação da Densidade de Drenagem.

DENSIDADE DE DRENAGEM	PONDERAÇÃO DAS CLASSES
Muito Baixa	5
Baixa	4
Intermediária	3
Alta	2
Muito Alta	1

4.5.1.4 *Mapa Geológico*

As unidades geológicas encontradas na Fazenda Santa Edwiges foram classificadas com base em suas características, descritas no item 3.1.1, levando em consideração, principalmente, o tipo de solos que tendem a ser encontrados nestas unidades. O Complexo Embú tende a formar solos mais finos e argilos, que dificultam a infiltração, enquanto os Granitóides do Quebra-Cangalha tendem a gerar solos arenosos, mais grosseiros, que favorecem a infiltração.

Para a unidade Terraços Fluviais, uma reflexão diferente deve ser feita, pois estas regiões localizam-se próximas do principais cursos d'águas encontrados na área de estudo e eventualmente estão saturadas. Nestas condições, os terraços não favorecem a infiltração, sendo consideradas as calhas da microbacia. Desta forma, as ponderações para as unidades geológicas seguem como apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Ponderação para as Unidades Geológicas

UNIDADES GEOLÓGICAS	PONDERAÇÃO DAS CLASSES
Granitóides	4
Zonas Milonitizadas	3
Complexo Embú	2
Terraços Fluviais	1

4.5.1.5 *Mapa da Porosidade Superficial e a 100cm*

Embora que os solos argilosos tendam apresentar porosidades mais elevadas que os solos arenosos, a avaliação destes mapas só leva em consideração a lógica de quanto mais poros, maior será facilidade a água encontrará para infiltrar. Obviamente que esta suposição é intimamente ligada à natureza do solo em questão. Entretanto, estas informações são fornecidas tanto pelo Mapa Geológico quanto pelo Mapa de Textura gerado.

É neste ponto que a avaliação de processos naturais através da Álgebra de Mapas é importante, pois não será apenas uma ou outra característica que determinará o comportamento do solo perante à infiltração, mas sim, o conjunto todo analisado perante uma lógica embasada em conhecimentos técnico-científicos.

Portanto, a ponderação elaborada para a porosidade superficial e a 100cm seguem a mesma lógica, de modo que as cinco principais classes apresentadas no Mapa da Figura 32 foram aquelas levadas em consideração, como segue na Tabela 10.

Tabela 10- Ponderação para as classes de porosidade.

POROSIDADE DO SOLO	PONDERAÇÃO DAS CLASSES
Muito Alta (0,52 - 0,61)	5
Alta (0,49 - 0,52)	4
Intermediária (0,47 - 0,49)	3
Baixa (0,43 - 0,47)	2
Muito Baixa (0,36 - 0,43)	1

4.5.1.6 *Mapa da Textura do solo*

As ponderações quanto à textura do solo seguem as explicações apresentadas no item 2.4.2.1 que, resumidamente, apontam que a infiltração é dificultada em solos predominantemente argilosos e facilitada nos solos predominantemente arenosos. As classes ponderadas não são necessariamente as mesmas que estão no Mapa de Textura (Figura 36). Naquela ocasião, o resultados da interpolação estão agrupados em quatro classes principais somente para facilitar a visualização dos resultados e sua correlação com a geologia, que possui orientação aparente. Já na ponderação, optou-se por utilizar cinco classes. Isto pode ser feito de forma simples através do ArcGIS®, que apresenta os resultados da interpolação em quantas classes forem necessárias. Assim, a ponderação para a textura do solo segue a lógica apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Ponderação para a textura do solo.

TEXTURA DO SOLO	PONDERAÇÃO DAS CLASSES
Muito Argilosa (1,0 - 0,8)	1
Argilosa (0,8 - 0,6)	2
Intermediária (0,6 - 0,4)	3
Arenosa (0,4 - 0,2)	4
Muito Arenosa (0,2 - 0,0)	5

4.5.1.7 *Mapa da Cobertura Vegetal*

As classes do mapa de cobertura vegetal seguem os princípios discutidos no itens 2.4.2.3 e 3.1.6. As condições impostas em locais com a vegetação em bom estado de conservação, sobretudo as matas nativas, favorecem a infiltração. O eucalipto, após seu crescimento, apresenta condições semelhantes às matas nativas, recebendo também um valor alto na ponderação.

As áreas por onde passam as estradas e as torres de transmissão (chamados de Elementos Lineares no mapa da Figura 20) receberam um pontuação intermediária, por serem áreas geralmente desprovidas de vegetação natural.

As áreas úmidas, próximas aos terraços fluviais e aos corpos d'água superficiais receberam uma pontuação baixa, por já serem áreas que normalmente estão saturadas.

Os afloramentos rochosos, as erosões em estágio avançado e as construções são os casos mais críticos e, embora ocupem uma pequena área, receberam a pontuação mais baixa.

É válido lembrar que no período de crescimento do eucalipto, enquanto só a serrapilheira ocupa a porção superficial do solo, o escoamento superficial é mais elevado. Nesta situação, às áreas referidas ao plantio de eucalipto devem receber um pontuação mais baixa que no caso em que já está adulto, após 3º ou o 4º ano de plantio.

Seguindo esta linha de raciocínio, as ponderações utilizadas para as classes da cobertura vegetal está apresentada na Tabela 12.

Tabela 12- Ponderação para as classes da cobertura vegetal.

COBERTURA VEGETAL	PONDERAÇÃO DAS CLASSES
Mata Nativa	5
APP's e Reservas Legais	5
Eucalipto	4
Eucalipto logo após o plantio	2
Elementos Lineares	3
Área Úmida	2
Afloramento Rochoso	1
Erosão	1
Construções	1

4.5.2 Hierarquização dos layers (mapas)

As informações que são utilizadas neste estudo, para a avaliação do processo de infiltração, podem estar relacionadas tão fortemente ao ponto de causarem algum tipo de redundância ao cruzá-las na forma de mapas. Por outro lado, algumas informações podem ser tratadas como mais pertinentes que outras, necessitando de avaliações quanto a sua influência de forma específica.

Para isso, procurou-se dividir as informações utilizadas em grupos diferentes, relacionando-as de forma diferenciada e estabelecendo pesos diferentes para cada um dos

mapas e, conseqüentemente, para cada um dos grupos. Esta hierarquização segue conforme apresentado na Figura 39.

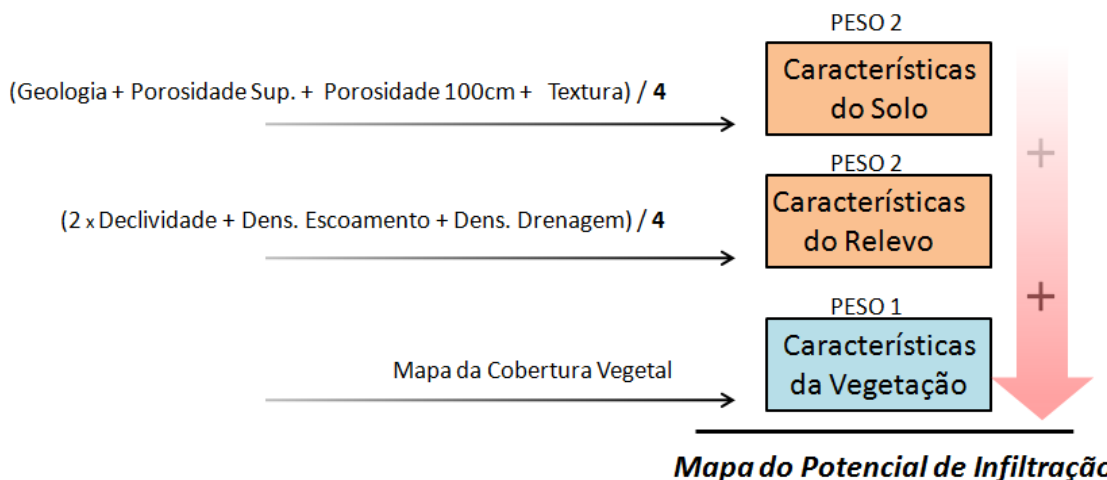


Figura 39- Hierarquização dos mapas utilizados para a Álgebra de Mapas.

Para que não haja qualquer erro de interpretação nos pesos estabelecidos para cada *layer*, elaborou-se a Tabela 13, onde é importante destacar o peso estabelecido para declividade e para a cobertura vegetal. A textura do solo também é um fator de grande influência no processo de infiltração, mas este *layer* não recebeu um peso maior devido ao fato de que a geologia local reforça as informações quanto a textura do solo.

Tabela 13 - Hierarquização dos layers utilizados.

GRUPO	LAYERS UTILIZADOS (MAPAS)	PESO DE CADA LAYER PARA A ÁLGEBRA DE MAPAS	
Solo	Geologia	10%	40%
	Porosidade Sup.	10%	
	Porosidade 100cm	10%	
	Textura	10%	
Relevo	Declividade	20%	40%
	Dens. Drenagem	10%	
	Dens. Escoamento	10%	
Veget.	Cobertura Vegetal	20%	20%

4.5.3 Mapas de Potencial de Infiltração

Após a aquisição dos mapas necessários ao estudo da infiltração, a elaboração dos demais mapas que ainda não existiam, a ponderação de suas classes e a hierarquização entre eles, é possível aplicar a Álgebra de Mapas para gerar o Mapa Potencial de Infiltração.

Utilizando a Calculadora Raster (Raster Calculator) da ferramenta Spatial Analyst do ArcGIS®, inseriu-se os pesos que cada mapa recebeu (Tabela 13) para que o cálculo fosse efetuado.

O software apresenta uma imagem como resultado onde cada pixel (que neste estudo possui resolução de 5m) possui um valor numérico referente ao somatório dos mapas utilizados. Considera-se necessário classificar os valores em intervalos diferentes para uma melhor análise. Optou-se por dividir em 7 classes de intervalos iguais e, ao fundo, inseriu-se o mapa de relevo sombreado (*Hillshade*).

Os resultados finais para a simulação dos dois cenários propostos, com o eucalipto adulto e na situação logo após o plantio, podem ser observados na Figura 40 e Figura 41. É importante ressaltar que, embora praticamente todos os mapas utilizados neste trabalho apresentem um limite maior para a Fazenda Santa Edwiges, o resultados apresentados correspondem apenas ao limite físico da bacia de cabeceira em que ela está inserida, que possui uma área um pouco menor. Esta também é a área atual de atuação da empresa Fibria e, por esse dois motivos, os resultados foram apresentados dentro destes limites.

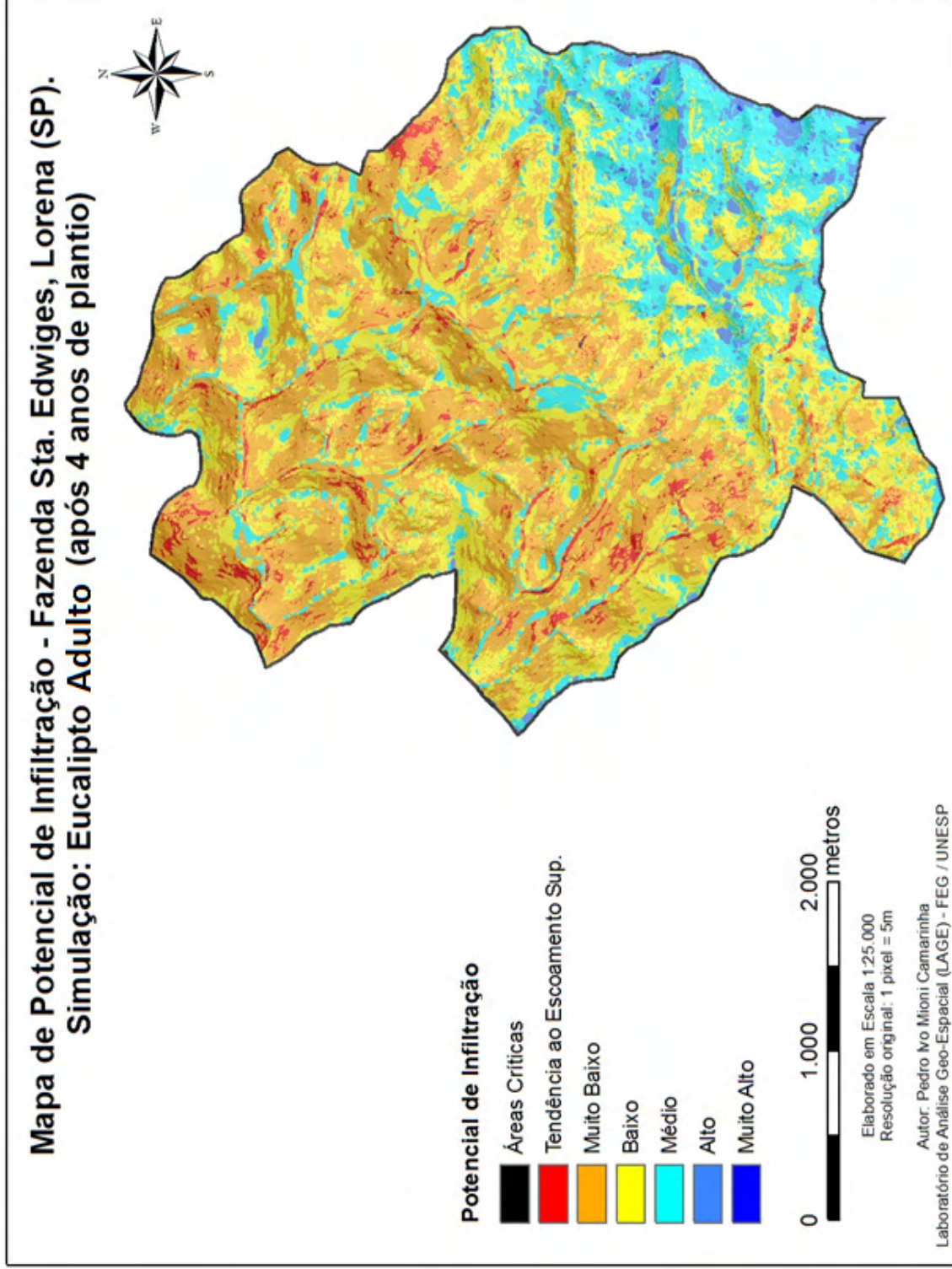


Figura 40 - Mapa de Potencial de Infiltração, simulando a situação com o eucalipto adulto, após 4 anos de plantio.

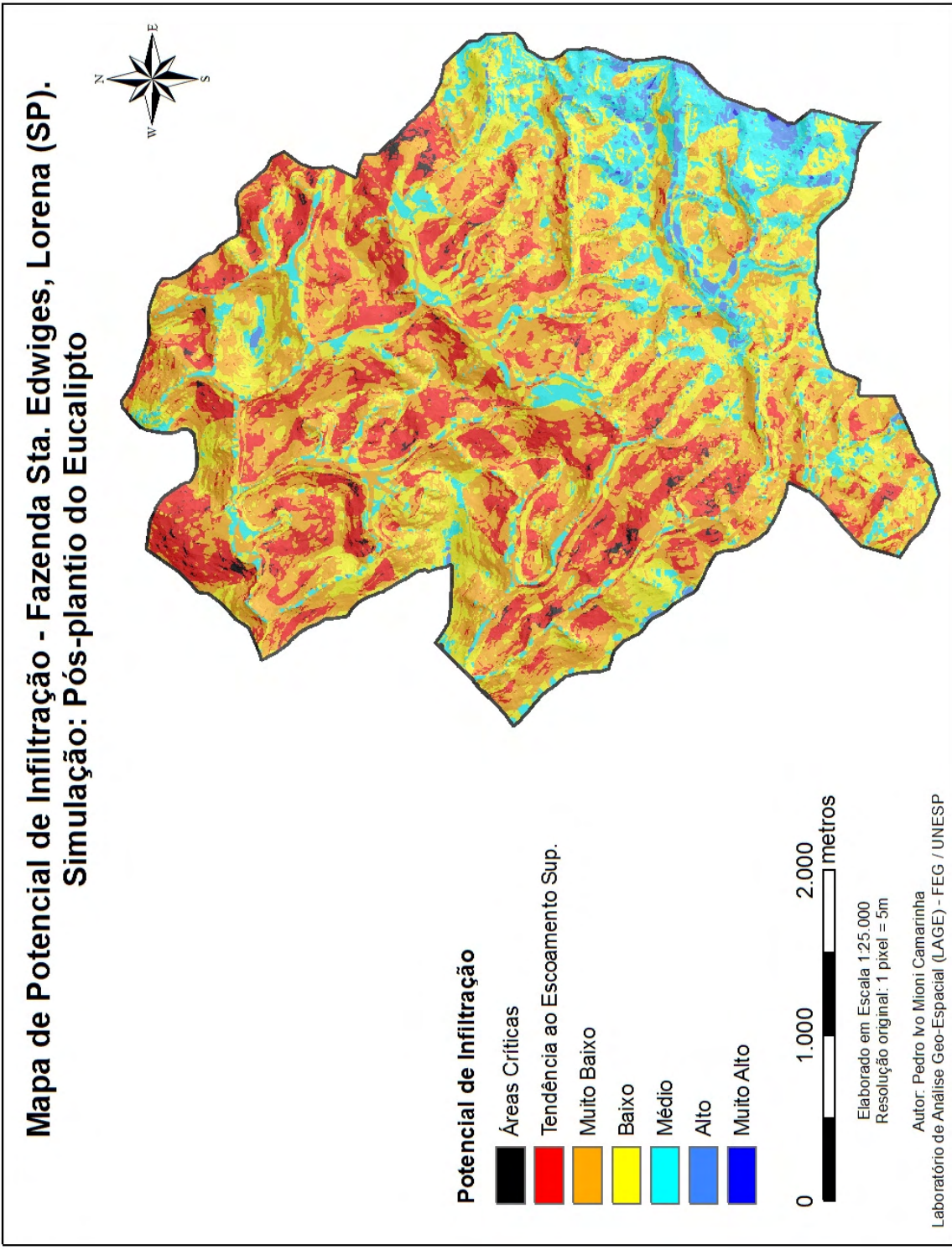


Figura 41 - Mapa de Potencial de Infiltração simulando s situação com o eucalipto ainda pequeno, logo após o plantio.

5 DISCUSSÕES

5.1 Geoestatística para porosidade do solo

Para a análise geoestatística, o aumento do número de amostras resulta em uma melhor representatividade da variável no modelo proposto, reduzindo a propagação do erro.

A fim de evitar a insuficiência de dados ou atividades de campo excessiva, a metodologia geoestatística proposta, intercalando etapas de campo e escritório, permitiu a identificação de áreas com algumas peculiaridades, que é indicada pela comparação dos valores do erro associado às estimativas e o erro real. Esse comportamento foi observado nos pontos 34 e 35, onde as porosidades foram diferentes das amostras da sua vizinhança, o que exigiu o aumento do processo de amostragem nestas regiões, tornando as interpolações mais consistentes. Esta área específica pode também caracterizar uma determinada condição geológica, que deverá ser considerada individualmente.

A análise geoestatística feita a partir de parâmetros coletados na superfície e na profundidade de 100 centímetros correspondeu a uma boa dependência espacial, permitindo o ajuste de um modelo de semivariograma e, portanto, a utilização de krigagem para a predição da porosidade nestes dois casos. Entretanto, esta análise não foi possível para a profundidade de 50 centímetros devido à dispersão dos valores dos pontos amostrados. Neste caso, uma investigação de campo mais detalhada é necessária para compreender a razão de tal variabilidade. Dependendo da geomorfologia, a variabilidade pode ser atribuída também à espessura da camada intermediária de solo, necessitando de uma investigação de detalhe em pequenas áreas.

A estimativa da porosidade à 100cm de profundidade apresentou valores inferiores quando comparada com a porosidade da superfície. Este fato pode ser explicado pela interferência do sistema radicular das plantas em profundidade rasa que contribui para solos mais porosos na superfície, enquanto a compactação natural das camadas mais profundas, que rearranjam as partículas do solo, podem diminuir a quantidade de poros.

5.2 Correlações entre porosidade, textura e geologia.

Comparando os mapas de porosidade e de textura com o mapa geológico desenvolvido em escala 1:10.000 (Figura 15), é possível fazer algumas considerações a respeito dos resultados das análises geoestatísticas e das as unidades geológicas.

5.2.1 Granitóides Quebra-Cangalha

A unidade geológica " Granitóides Quebra-Cangalha " é composta principalmente de leuco-granitos, que ocupam todo o Sudoeste da região de estudo. Os solos desta unidade geológica tendem, em geral, possuir grande quantidade de materiais grosseiros (areia) características de solos residuais jovens, espessura fina, heterogêneo e que poderiam ser classificados como Cambissolos. Desta forma, o modelo utilizado para estimar a textura do solo utilizando conceitos *Fuzzy* e técnicas geoestatísticas apresentou resultados condizentes, de modo que em toda a área inserida nos Granitóides foram estimados solos predominantemente arenosos.

Segundo a literatura, espera-se que esses solos apresentem porosidade na ordem de 50% na superfície e redução com a profundidade. Observando os mapas de porosidade da Figura 32, é possível observar que a porosidade varia de 53% na superfície até 43% a 100 cm de profundidade, de acordo com o esperado.

Esta diminuição de porosidade com o aumento da profundidade é um dos fatores responsáveis pelas condições físicas que impõem restrições ao processo de infiltração de água e pode provocar processos de erosão na Fazenda Santa Edwiges (Santos, 2007). Realmente alguns focos de processos erosivos puderam ser constatados nestas regiões, por meio do Mapa de Cobertura Vegetal (Figura 20).

5.2.2 Zonas Milonitizadas

No mapa geológico (Figura 15) observa-se outra unidade geológica, constituída de rochas miloníticas, na qual está inserida uma zona de cisalhamento com direção SO-NE. Como estas rochas são provenientes de reações de retro-metamorfismo e apresentam muitos planos de foliação, são susceptíveis os processos de alteração em superfície e produzem solos finos, geralmente com predominância de fração argila.

Por outro lado, a facilidade de desgaste destas rochas faz com que estejam, muitas vezes, associadas a relevos relativamente mais baixos em relação às rochas circunvizinhas. De fato, é o que se observa na região de estudo, onde as zonas milonitizadas ocupam áreas de cotas relativamente baixas quando comparadas com as demais unidades geológicas, como os Granitóides Quebra Cangalha e Complexo Embu.

No que se refere à textura, o modelo de predição conseguiu verificar um aumento significativo de teor de argila nestas áreas, estimando solos com textura intermediária entre areia e argila. Porém, esta unidade geológica ocupa uma área relativamente pequena dentro da região de estudo, de modo que a krigagem não é capaz de indicar mudanças abruptas para estas localidades.

A mesma justificativa pode ser empregada para explicar que na área cortada pela zona de cisalhamento, a porosidade não apresentou variação significativa em função da profundidade, variando de 38% para 48% em ambos os casos.

De qualquer forma, esta unidade pode ser considerada como uma área de transição entre a geologia local e também das formas de relevo, de modo que as técnicas geoestatísticas empregadas indicam situações intermediárias tanto para a porosidade, quanto para a textura, validando os modelos utilizados.

5.2.3 Complexo Embu

O Complexo Embu possui uma grande diversidade de tipos litológicos, porém, na porção Norte da fazenda, há predominância de rochas gnáissicas ricas em biotita. Sabe-se que os solos desta unidade são bem desenvolvidos, conhecidos como solos residuais maduros, textura argilosa, espessos e homogêneos, que seriam classificados pedologicamente como Latossolos. Exatamente nestas regiões o modelo gerado de predição da textura indicou solos predominantemente argilosos, em toda a área do Complexo Embu.

A correlação entre a seqüência de rochas gnáissicas e os mapas de previsão de porosidade aponta para um aumento da porosidade com a profundidade, particularmente no extremo Norte da área de estudo. Este aumento poderia estar associado às condições de boa drenagem e de circulação de água no interior destes solos, sendo também um indicativo de que estes não apresentam um alto grau de compactação a um metro de profundidade.

No entanto, na porção leste do Complexo Embu, houve uma situação inversa, onde os valores de porosidade foram maiores na superfície (55%). Essa situação específica deve ser melhor avaliada por estar em uma região onde o erro associado à estimativa foi elevada,

devido a escassez de amostras, exigindo, portanto, um processo de amostragem mais conciso nestas localidades.

5.3 Mapas de Potencial de Infiltração

Os Mapas de Potencial de Infiltração gerados (Figura 40 e Figura 41) apresentaram padrões espaciais bem semelhantes entre si. Isso já era esperado, visto que a única variável alterada de uma simulação para a outra foi a cobertura vegetal, mais especificamente, nos locais destinados ao plantio de eucalipto.

De modo geral, a região Sudeste da Fazenda Santa Edwiges apresentou condições mais favoráveis à infiltração que as demais. Nos extremos Norte, Leste e Sudoeste, próximo ao limite da bacia, foram identificadas as áreas mais críticas, com potencial para a geração do escoamento superficial. Na porção central da fazenda há uma grande variabilidade de condições que favorecem ou dificultam o processo de infiltração, tanto nos aspectos referentes ao solo, nas formas e características do relevo e também da cobertura vegetal. Isto corresponde a resultados também variados, de forma que o potencial de infiltração varia conforme o local. Resumidamente, os topos de morros e as áreas de baixada são os locais que mais favorecem a infiltração, enquanto grande parte das encostas possuem baixo potencial e até mesmo tendência ao escoamento, se não manejadas com devido cuidado.

As áreas onde se encontram os Terraços Fluviais e as APP's de área úmida necessitam uma avaliação específica. Nestes locais, os solos normalmente se encontram saturados, de forma que, sob estas condições, não permitem que o processo de infiltração ocorra e, portanto, receberam uma baixa pontuação na etapa de ponderação. Ao cruzar os diferentes mapas, nota-se que em algumas destas localidades, sobretudo ao Norte e Noroeste, os resultados indicaram uma forte tendência ao escoamento superficial. Entretanto, as reflexões para estas ocorrências não devem ser feitas do mesmo modo que para encostas tendenciosas ao escoamento superficial. No caso dos terraços e as áreas úmidas, estes fazem parte do sistema natural de abastecimento e de direcionamento do fluxo da bacia, enquanto as encostas podem favorecer processos erosivos e, portanto, perda de solo que caracterize assoreamento dos corpos hídricos nas regiões mais baixas.

Alguns locais identificados com tendência ao escoamento superficial e áreas críticas se encontram nos sopés das encostas (ver Figura 42) e, algumas vezes, próximas aos terraços fluviais e áreas úmidas. Sobretudo nas épocas de estiagem, a atenção para estes casos volta-se para que a água, de escoamentos provenientes de cotas mais altas ou até mesmo da própria

chuva, não chegue com alta energia cinética. Isto pode desagregar as partículas de solo que ali estão, sob o risco de desestabilizar a base dos taludes e gerar processos erosivos.

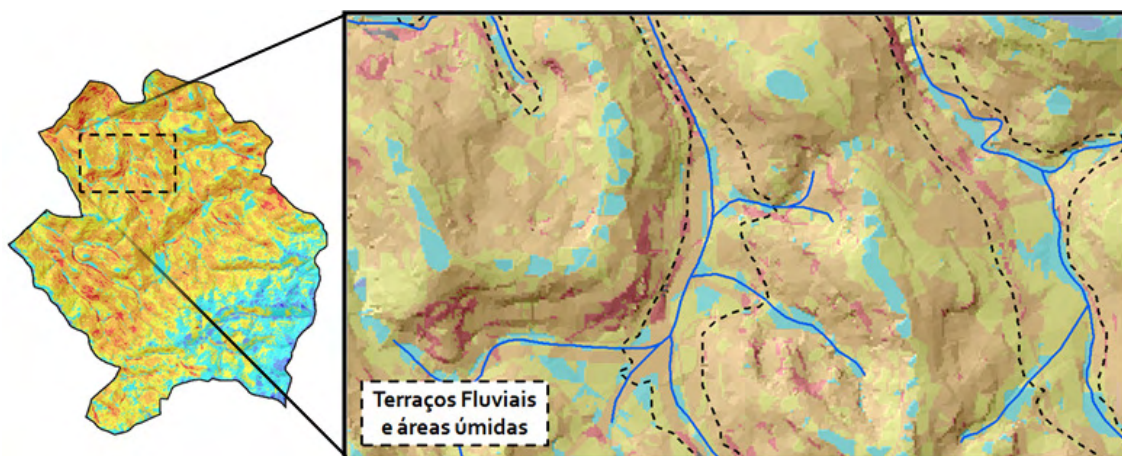


Figura 42 – Exemplo de uma localidade onde o sopé das encostas apresentam tendêcia ao escoamento superficial.

Sob estas perspectivas, o correto planejamento de estradas começam a ter uma importância fundamental para a saúde hídrica da bacia. As técnicas empregadas para a abertura destas estradas fazem com que elas sejam compactadas para promover o fluxo dos caminhões que por ali irão trafegar nas épocas de colheita. Esta compactação e a retirada da cobertura vegetal não só favorece o escoamento superficial destes locais como altera completamente o sistema de drenagem natural da região. Desta forma, o Mapa de potencial de Infiltração pode ser considerado não só uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos mas também para o planejamento do uso e ocupação do solo, visando detectar locais por onde a rede de drenagem artificial construída (canaletas e bocas-de-lobo) devem passar. Um exemplo desta análise segue apresentado na Figura 43.

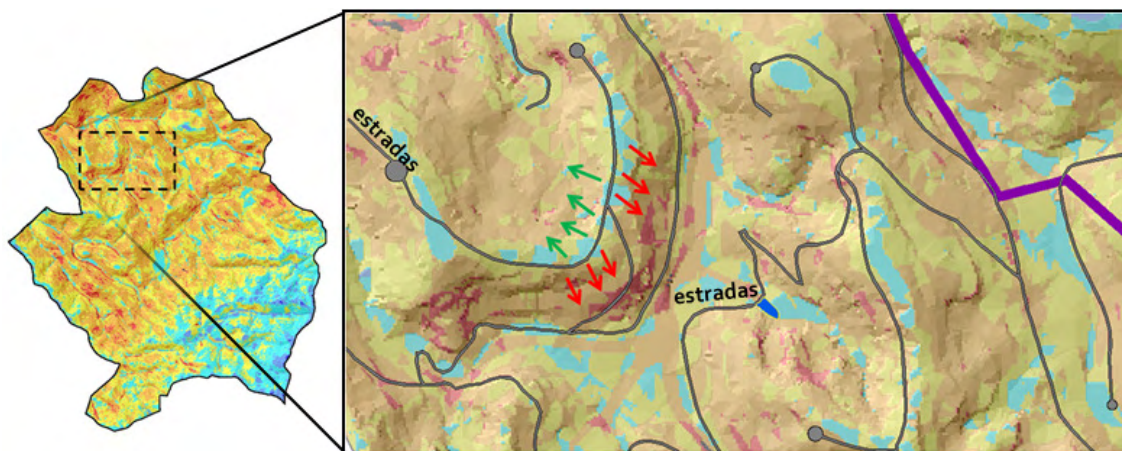


Figura 43 – Exemplo de como os resultados apresentados podem ser utilizados no planejamento do traçado das estradas vicinais e também do sistema de drenagem de águas pluviais. As setas vermelhas indicam para onde não é recomendado o direcionamento do fluxo d’água, enquanto as setas verdes indicam a melhor opção.

Cabe aqui também uma discussão quanto às ocorrências de erosões que foram constatadas dentro da área de estudo, e que estão mapeadas pela Fibria, podendo ser observadas na Figura 20. Quanto à geologia, nota-se que todas estas erosões estão contidas nas regiões próximas à transição das unidades dos Granitóides Quebra-Cangalha e das Zonas Milonitizadas, enquanto o mapa de textura indica que ali se localizam solos variando entre predominantemente arenosos e situações intermediárias com presença de finos. Embora estas situações dificultem o escoamento superficial, fato constatado pelos Mapas de Potencial das Figura 40 e Figura 41, houve o desenvolvimento dos processos erosivos, tornando necessário uma avaliação específica para compreender os motivos destas ocorrências. A explicação para isso pode ser encontrada analisando três aspectos: a densidade de drenagem, a estrutura e a espessura do solo.

Ao analisar o solo propriamente dito, o fato de ser considerado uma área potencial de infiltração não garante, necessariamente, que os processos erosivos sejam minimizados. Em solos arenosos, se sua espessura for fina e as camadas inferiores apresentarem porosidade inferior que as subjacentes, a tendência é que o fluxo de água seja deslocado subsuperficialmente, em direções paralelas as encostas. Nestes casos, o potencial de infiltração (que inclui a também facilidade de movimentação da água na subsuperfície) pode favorecer escorregamentos translacionais, caso o aporte de água que chegue nesta localidade seja muito grande. Desta forma, ao analisar a localização destas erosões no mapa de Dinâmica do Escoamento Superficial (Figura 18), constata-se que tal fato realmente acontece.

Ou seja, as erosões se encontram em locais onde os fluxos do escoamento superficial são direcionados.

Portanto, a utilização da Álgebra de Mapas de forma sistêmica deve ser feita de forma específica para um determinado fenômeno. Em outras palavras, o mapeamento do potencial de infiltração limita-se apenas à compreensão de como os agentes do meio físico e a paisagem agem quanto à infiltração da água no solo, cabendo análises adicionais para outros fenômenos que, embora estejam interligados, agem de forma diferenciada.

Ao analisar os dois cenários simulados, nota-se que o eucalipto, em terrenos acidentados como o da Fazenda Santa Edwiges, favorece manutenção dos recursos hídricos da bacia quando comparado com outros tipos de uso do solo que promovem a retirada da cobertura vegetal. Embora o plantio em sistema de cultivo mínimo deixe o solo em boas condições quando comparados com casos onde se queimam as folhagens, a situação não é tão condicionante para a infiltração quando comparada com o caso em que se possui uma floresta (plantada ou natural) já estabelecida.

Em situações com relevos mais suaves, os resultados indicam que as condições impostas pelos demais fatores referentes ao relevo e ao solo permanecem favorecendo o processo de infiltração, mesmo no cenário pós-plantio.

Cabe ainda ressaltar que as ponderações feitas, sobretudo para o cenário simulado (onde as áreas destinadas ao eucalipto podem assumir dois valores diferentes) obedecem à subjetividade de quem manuseia os dados, podendo assumir resultados finais que variam conforme a avaliação feita. No presente estudo, avaliou-se as relações quanto ao manejo do solo sob a técnica do cultivo mínimo baseado em dados da literatura, de modo que foi verificado que à situação nos primeiros anos de plantio requer um pouco mais de cuidado quanto a avaliação dos processos erosivos e, também, da elaboração de ações mitigadoras, principalmente para minimizar os possíveis impactos causados pelas estradas vicinais.

Ainda é importante ressaltar que a cobertura vegetal recebeu um peso referente a 20% dentro a análise feita, de modo que grande parte do potencial de infiltração e da tendência observada para o escoamento superficial corresponde, portanto, a um conjunto de outros fatores impostos naturalmente pelo meio físico, onde a vegetação se caracteriza como um autor coadjuvante, porém essencial para a manutenção dos recursos hídricos.

De fato, quem determinará se ocorre ou não o escoamento superficial será a intensidade e a duração das chuvas, mas os resultados obtidos nesta pesquisa já dão condições suficientes de se saber, de antemão, a tendência que existente dentro da área de estudo.

5.3.1 Validação dos Resultados

Os dados apresentados por Vasconcellos (2008), possibilitam conhecer a condutividade hidráulica saturada (K_{fs}) do solo em locais da Fazenda Santa Edwiges, todas localizadas em sua porção inferior (Sul). Na Tabela 14 são apresentados tais valores nas três profundidades analisadas. Para sua melhor visualização, inseriu-se estes pontos junto ao Mapa de Potencial de Infiltração para o cenário já com o eucalipto adulto, após o 4º ano de plantio (Figura 44).

Tabela 14 - Condutividade Hidráulica Saturada para alguns pontos da Fazenda Sta. Edwiges.

Ponto	Coordenadas		Kfs sup (m/s)10 ⁻⁷	Kfs 50cm (m/s)10 ⁻⁷	Kfs 100cm (m/s)10 ⁻⁷
	x	y			
1	488992	7470923	1,99	1,22	0,799
2	490651	7471193	0,414	0,41	1,19
3	491790	7469721	5,47	1,97	2,74
4	489587	7440737	0,06	-	-

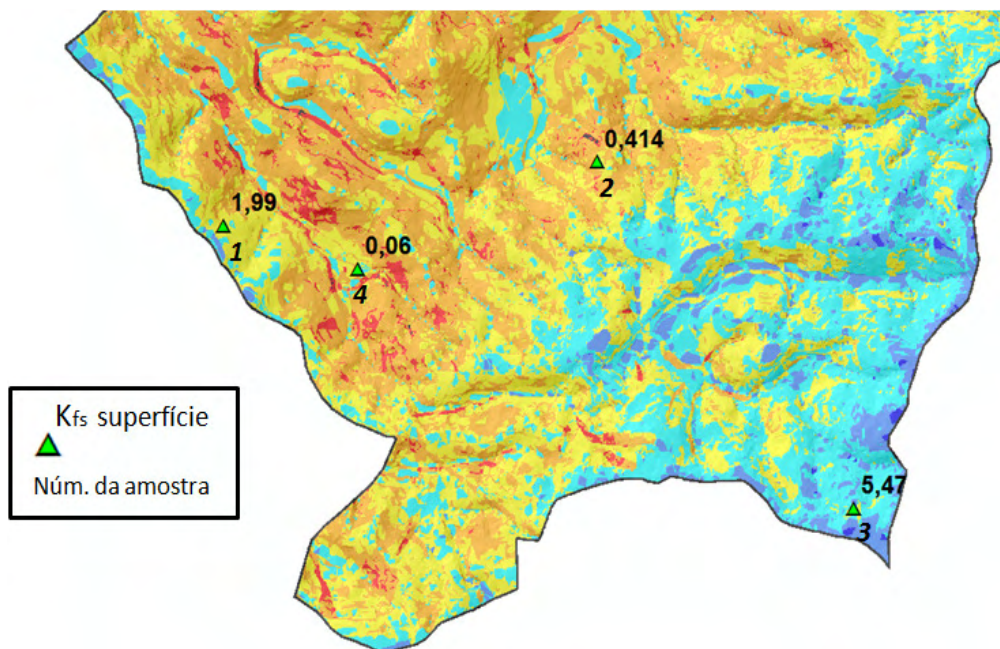


Figura 44- Dados de Kfs inseridos no Mapa de Potencial de Infiltração.

Embora sejam poucos, ao analisar os dados de condutividade hidráulica saturada fornecidos por Vasconcellos (2008), pode-se perceber que o modelo gerado para o potencial de infiltração está em concordância com a realidade da área de estudo.

O Ponto 1 apresenta um valor elevado para K_{fs} , sendo a metade do maior valor mensurado, no Ponto 3. Para este caso, o modelo apresenta-se válido, visto que o Ponto 1

encontra-se próximo aos limites a Sudoeste da bacia, onde estimou-se de alto a médio potencial de infiltração nesta região.

Já o Ponto 2 localiza-se numa região onde predomina baixo potencial de infiltração, tendo em suas proximidades áreas com grande favorecimento ao escoamento superficial. O valor de K_{fs} para este local indica realmente uma condutividade hidráulica baixa.

Dentre os locais que foram mensurados, o ponto que possui maior valor para a condutividade hidráulica foi o Ponto 3, localizado no extremo Sudeste da área de estudo. Nesta região, o Mapa de Potencial de Infiltração da Figura 40 indicou áreas classificadas com potencial de infiltração classificado como “muito alto” ou “alto”.

Por outro lado, o Ponto 4 indicou a menor condutividade hidráulica dentre os pontos amostrados. No local em que ele se insere, o modelo gerado indica áreas com baixo potencial de infiltração, muito próximo de áreas com alta tendência ao escoamento superficial e, portanto, corroborando com o que foi mensurado em campo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interação existente entre os diferentes fatores que agem nos geoeossistemas atuais tornam, cada vez mais, os estudos interdisciplinares fundamentais para se alcançar respostas diferenciadas quanto à dinâmica da água, sobretudo para o processo de infiltração.

Existe uma grande complexidade em avaliar a variabilidade espacial do processo de infiltração devido ao seu caráter sistêmico, principalmente quando estudado somente através de amostras pontuais, obtidas por ensaios de campo. Entretanto, a avaliação de cada um dos elementos que compõe a paisagem e que interferem no processo de infiltração permitem a obtenção de resultados satisfatórios. Para isso, entretanto, é necessário que as peculiaridades de cada um destes elementos sejam consideradas de forma singular, estejam eles ligados ao solo, ao morfologia ou a cobertura vegetal para que, em seguida, possam ser avaliados de forma conjunta.

Neste contexto, pode-se dizer que as geotecnologias são imprescindíveis para alcançar os objetivos almejados, de forma que a utilização de um banco de dados espacial georreferenciado em ambiente SIG permite o manuseio e cruzamento de diversos tipos de informações espaciais de forma prática.

Cabe ressaltar também o potencial do SIG como parte integrante de metodologias que visam a compreender a distribuição espacial das propriedades do solo (no caso a porosidade e a textura) através de amostras pontuais, utilizando a geoestatística.

Neste aspecto, os benefícios observados pela utilização destas tecnologias alcançam todos as etapas de trabalho proposta neste estudo, contribuindo para traçar melhores estratégias de campo, identificando áreas com incertezas, avaliando as características espaciais das variáveis estudadas, permitindo correlações entre os dados utilizados e cruzando as informações espaciais de forma específica, conforme a pertinência do estudo em questão.

A metodologia apresentada permitiu, através das ponderações e da hierarquização dos mapas utilizados, entender como cada elemento atua dentro do processo de infiltração da

água no solo, de modo que o potencial observado para cada localidade reflete todas as interrelações existentes. Seguindo esta linha de raciocínio, é possível entender que quaisquer interferências causadas na paisagem estarão, portanto, desencadeando uma série de perturbações ao equilíbrio ambiental.

No que se refere aos resultados obtidos, nota-se que a variedade geológica e geomorfológica que existe na área de estudo (Fazenda Sta. Edwiges) corresponde a uma diversidade de situações que podem favorecer ou dificultar o processo de infiltração da água no solo. Embora o estudo tenha sido realizado em uma microbacia de cabeceira, pode-se dizer que, sob a geologia e geomorfologia, a área de estudo reflete muito a realidade regional valeparaibana.

As composições formadas na porção Sudeste da fazenda, combinando a geologia dos Granitóides do Quebra-Cangalha, com solos predominantemente arenosos com boa drenagem interna (alta porosidade) e com padrões menos densos da dinâmica de escoamento superficial corresponderam as áreas mais potenciais para o processo de infiltração. Entretanto, devido à alta declividade observada em alguns locais com terrenos escarpados, a fina camada destes solos e camadas menos permeáveis, conforme o aumento da profundidade também caracteriza esta área como tendenciosa a perda de solo e ao desenvolvimento de escorregamentos translacionais, fatos constatados por levantamentos prévios.

Por outro lado, algumas áreas no extremo Norte, Leste e Oeste apresentaram-se como as de menor potencial de infiltração, com grande tendência à geração dos escoamento superficial. Nestes casos, a combinação de declividades acentuadas com solos predominantemente argilosos em locais com alta densidade de linhas de escoamento e de drenagem justificam tal constatação. Nestes locais, contudo, não foram detectados processos erosivos que requeriam notoriedade.

Desta forma, estas duas realidades causam uma contradição curiosa. Nos locais com maior potencial de infiltração é visto também há maior quantidade de processos erosivos, enquanto nos locais mais tendenciosos ao escoamento superficial estão sendo preservados. Isto pode ser explicado pelo fato de que a existência da uma cobertura vegetal densa é fator essencial para manter este equilíbrio. Nas áreas com maior tendência ao escoamento, ainda são preservados fragmentos remanescentes de mata nativa, enquanto nas áreas com erosão isto não é verificado, de modo que foram utilizadas em épocas passadas por outras atividades, como para o cultivo do café.

É visto, portanto, que as ações antrópicas expressam um caráter significativo para definir o comportamento da bacia diante da disponibilidade em qualidade e quantidade dos

recursos hídricos. Embora neste estudo só tenha sido tratada a atividade de silvicultura, nota-se que pequenas alterações causadas por esse tipo de uso do solo interferem na dinâmica da água.

Tendo em visto o atual cenário valeparaibano, composto por mosaicos onde as áreas degradadas alcançam grandes proporções, comumente favorecendo processos erosivos que causam a perda de solo e o assoreamento dos corpos d'água, o plantio do eucalipto sob um manejo adequado é entendido como uma atividade que favorece a manutenção dos recursos hídricos por condicionar o processo de infiltração. Porém, são necessários estudos hidrológicos específicos para aferir sua viabilidade dentro do balanço hídrico, visto que esse tipo de cultura também consome considerável quantidade de água para seu rápido crescimento.

Portanto, a metodologia apresentada pode ser considerada não só uma ferramenta para a gestão dos recursos naturais, mas também como uma ferramenta essencial para tomadas de decisão quanto ao uso e ocupação do solo. Tratando-se de uma área destinada ao plantio de eucalipto, este trabalho dá condições para que reflexões sejam feitas sobre as principais interferências causadas pelos processos antrópicos ali existentes, sobretudo aos impactos que podem ser causados pelas estradas vicinais.

Por fim, a avaliação dos resultados obtidos pelos mapas de potencial de infiltração por meio de estudos prévios e dados de condutividade hidráulica fornecidos por Vasconcellos (2008), indicam sucesso da metodologia proposta neste estudo, visto que as informações geradas quanto ao potencial de infiltração estão em concordância com a realidade da paisagem local. Desta forma, as soluções intermediárias que foram traçadas para que se alcançasse o objetivo principal também se fazem válidas, como no caso da geoestatística e da utilização da Lógica Fuzzy que, por suas vez, também permitiram correlações notórias entre os elementos do meio físico.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Como recomendação para trabalhos subseqüentes a este, propõe-se uma análise de correlação de dados reais (espaciais) do fenômeno da infiltração com o os resultados obtidos, a fim de possibilitar a quantificação do volume de água que efetivamente adentra no solo. Uma análise desta natureza permitirá não só a construção de modelos hidrológicos mais apurados, como também dão suporte para as eminentes discussões quanto ao pagamento por serviços ambientais, sobretudo no aspecto de manutenção das bacias hidrográficas.

A partir de um modelo que consiga quantificar o volume de água infiltrado baseado no potencial de infiltração, fica a recomendação do cruzamento com dados de modelos climáticos, onde é possível atribuir as informações referentes aos eventos de precipitação. Desta forma, além do potencial hidrodinâmico do solo (produto das características da paisagem), será possível estabelecer reflexões quanto ao potencial de recarga e armazenamento de água no solo. Para tal, recomenda-se trabalhar com a espacialização de outras propriedades, tais como o peso específico (seco, natural e saturado) e umidade do solo. No caso desta última, é importante notar seu caráter sazonal, onde sua variabilidade é existente também em escala temporal. Ou seja, neste caso é preciso elaborar uma metodologia que seja capaz de refletir suas características nos períodos de seca, chuvosos e entre estes dois casos.

7 Referências Bibliográficas

AGUIAR, A. B. O emprego do permeâmetro de Gelfo na determinação da permeabilidade do solo, de camada de lixo e sua cobertura - (Tese de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

AHRENDT, A. Movimentos de massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP. 1995. 390f. Tese de Doutorado, USP, São Carlos, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1984, Standard practice for description and identification of soils (visual-manual procedure): ASTM Standard D-2488-84 p. 409-423.

AGRICULTURE AND AGRI-FOOD CANADA, Watersheds and Integrated Water Resources Management, 2007. Disponível em: <<http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1187635073613&lang=eng>> Acessado em: 05 de Dezembro de 2010.

BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; TUSA, G. Factors of measurement the near-saturated soil hydraulic conductivity. Soil Science Society of America Journal, 2000.

BARRELLA, W; et al. As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes. In: RODRIGUES; R.R; LEITÃO FILHO; H.F (Ed.). Matas ciliares: conservação e recuperação. 2.^a ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, FAPESP, 2001. 187p.

BRAS, R. Hidrology: An introduction to hydrologic science. 1990. 643p.

BERTOL, O. J. Conservação de Solos e Água – Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Paraná. Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar. 2009. 28p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO F. Conservação do solo. São Paulo. 1990. 335p.

BONISCH, S; ASSAD, M. L. Lopes; MONTEIRO, A. M. V.; CAMARA, G. Representação e propagação de incertezas em dados de solo: II - Atributos numéricos. Revista Brasileira de Ciências do Solo. Viçosa, v.28, n.1. 2004. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000100004&lng=en&nrm=iso>
Acessado em: 05 de outubro de 2010. doi: 10.1590/S0100-06832004000100004.

BORGES, E. ; SILVA, A. B. Modelagem fuzzy para a geração do mapa de solos do município de Mucugê - Chapada Diamantina - Bahia. In: 12^{do} Encuentro de Geografos da América Latina, 2009, Montivideu. Caminando en una Amárica Latina en transformacion, 2009.

BURROUGH, P. A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Oxford, Clarendon Press, 1998.

BORMANN,F.H.& LIKENS,G.E. Nutrient cycling. *Science* 155: 424-429. 1967.

BUSTAMANTE, A. – Interferência de obras lineares na dinâmica de escoamento superficial com ênfase aos problemas de erosão. Departamento de Engenharia Civil, FEG-UNESP. Relatório Parcial de Iniciação Científica. 2005.

CALIJURI, M.C; BUBEL, A.P.M.Conceituação de Microbacias in: As florestas plantadas e a água. Implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. Organizadores: Walter de Paula Lima; Maria José Brito Zakia. CNPQ. São Carlos – Ed. RiMA, 2006. 226p.

CÂMARA, C.D. – *Crítérios e indicadores para o monitoramento hidrológico de florestas plantadas*. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), USP (Tese de Doutorado). 2004.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; FUKS, D. S.; CARVALHO, M. S. Análise Espacial e Geoprocessamento. Disponível em: www.dpi.inpe.br/cursos/ser301/ementa.html , acessado em 12 de setembro de 2006.

CAMARGO, E. C. G.; MONTEIRO, A. V. M., FELGUEIRAS, C. A.; FUKS, S. D. Integração de Geoestatística e Sistemas de Informação Geográfica: Uma Necessidade, INPE, Texto Didático, 2002. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/geopro/trabalhos/gisbrasil99/geoest_gis/> Acesso em: 28 de outubro de 2006.

CAMARGO, E.C.G. Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigeagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (Spring). São José dos Campos, 1997. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

CAMARINHA, P. I. M.; SIMOES, S. J. C.; BERNARDES, G. P. Análise Geoestatística da variável porosidade e estimação dos valores para pontos não amostrados através do método de interpolação Krigagem – Fazenda Santa Edwiges, Lorena, SP. (Relatório de Iniciação Científica). Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, São Paulo, 2007.

CAMARINHA, P. I. M.; SIMOES, S. J. C.; BERNARDES, G. P. Variabilidade espacial de propriedades físicas dos solos em áreas de relevos acidentados – O médio Vale do Paraíba do Sul, Sudeste do Brasil. IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Coimbra. 2008. p.193-200.

CARVALHO R. P., ASSAD E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação – Jaboticabal, EMBRAPA, 2005 (Artigo).

CARNEIRO, C. D. R.; HASUI, Y.; GIANCURSI, F.D. Estruturas da Bacia do Taubaté na região de São José dos Campos (Structures of the Taubaté Basin region of São José dos Campos region). Brazilian Congress of Geology, 29, Ouro Preto. Scientific publication. v.4, p. 247-256. 1978.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 188 p.

COELHO NETTO, A L. Evolução de Cabeceiras de Drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): Bases para um Modelo de Formação e Crescimento da Rede de Canais sob Controle Estrutural. Rev. Bras. Geomorfologia, 2003, Ano 4(2): p.118-167.

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

DOMINGOS, L. A. Determinação de algumas características geotécnicas do solo superficial da sub-bacia do ribeirão Taboão, Lorena, SP, como subsídio ao estudo das características de infiltração. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, São Paulo. 2005. (Relatório de Iniciação Científica).

DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. *Water in Environmental Planning*. W.H. Freeman and Company, New York. 1978.

ESRI® (2001) ArcGIS™ Geostatistical Analyst: Statistical Tools for Data Exploration, Modeling, and Advanced Surface Generation. An ESRI® White paper. Disponível em: <<http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/geostat.pdf>> Acessado dia 14 de Maio de 2010.

FARRES, P. The role of time and aggregate size in the crusting processes. *Earth Surface Processes*, (3). 243-254. 1978.

FELGUEIRAS, C.A. Modelagem Ambiental com Tratamento de Incertezas em Sistemas de Informação Geográfica: O Paradigma Geoestatístico por Indicação. Dissertação (Tese de Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

FERREIRA, T. F. Avaliação da relação entre a condutividade hidráulica do solo saturado com parâmetros físicos de um latossolo vermelho distrófico submetido a dois diferentes manejos. Ponta Grossa. 2008. (Tese de Mestrado).

FETTER, C.W. *Applied Hydrogeology*. New Jersey, 1994.

- FISHER, R. A. The design of experiments. Oliver and Boyd. Edinburgh, 1935.
- GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89 (1-2), pp.1-45. 1999
- GUERRA, P. A. G. Geoestatística operacional. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral. 145 p.1988.
- GUERRA, A. J. T.; Silva, A.S. e Botelho R.G.M – Erosão e Conservação dos Solo, Livro, editora Bertrand. Rio de Janeiro, RJ, 1999.
- GUELPH PERMEAMETER – Model 2800KI- Operating Instructions, Soilmoisture Equipment Corp, Santa Barbara, CA, 1987.
- GUMIAUX C.; GAPAIS D.; BRUN J. P. Geostatistics applied to best-fit interpolation of orientation data. *Tectonophysics*, 376 (3-4), p.241-259. 2003
- HARDEN, C. P.; SCRUGGS, D. P. Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology*, v55, p.5-24. 2003.
- HORGAN G. W. Simulating diffusion in a Boolean model of soil pores - Edinburgh, University of Edinburgh, 1993 (Artigo).
Disponível em: <www3.interscience.wiley.com/journal/119285291/abstract#ss1>
Acesso em 29 de agosto de 2008.
- HASUI, Y.; SADOWSKI, G. Evolução geológica do precambriano na região sudeste de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 6, p. 187-200, 1976.
- HURTADO, A. L. B. Variabilidade da condutividade hidráulica do solo em valores fixos de umidade e de potencial matricial. (Tese de Doutorado). Piracicaba, São Paulo, 2004.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An Introduction to Applied Geostatistics. New York, Oxford University Press, 1989.
- JAAKKOLA; J. Forest groundwater hydrology: implications for terrain stability in coastal British Columbia. Vancouver, Canadá. Dissertação de Mestrado. 1998. 158p.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 2002.
- KLUTE, A. & DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1986.
- LANDIM, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. São Paulo: Editora da UNESP. 1998.

LANDIM, P.M.B. Análise estatística Espacial de dados geológicos multivariados (Spatial statistical analysis of multivariate geological data). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro (In Portuguese) 158p. 2006.

LANDIM, P. M. B., STURARO, J. R. & MONTEIRO, R. C. Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 2002. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso: 3 de janeiro de 2009.

LANE. C. W. Geology and Ground-water Resources of Kingman County, Kansas. Kansas Geological Survey Bulletin 144. 1960. Disponível em: <<http://www.kgs.ku.edu/General/Geology/Kingman/index.html>> Acessado em 08 de agosto de 2010.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. 2ª ed. Piracicaba, 2000. 509p.

LIMA, A. B.; SIMOES, S. J. C. Desenvolvimento de um mapa geomorfológico como subsídio a um programa de plantio de eucalipto (Fazenda Santa Edwirges, Lorena/SP). Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP, 2005, São Carlos, SP. XIII SIICUSP (CD-ROM), 2005.

LIMA, M. A. Avaliação da Qualidade Ambiental de uma Microbacia no Município de Rio Claro-SP. UNESP, Rio Claro, SP. (Tese de Doutorado). 1994.

LIMA, C.A.G; SILANS, A.P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo Pesq. Agrop. Bras., Brasília. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X1999001100016&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 12 de Fevereiro de 2007. Pré-publicação.

LIMA, W.P.; ZAKIA M.J.B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES; R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) Matas ciliares: conservação e recuperação. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. p.33-43.

LIMA, W.P. Impacto ambiental do eucalipto. 2.ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1996. 301p.

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

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; MARQUES, J. J. G. S. M. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, p.395-403, 2003.

MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its applications. Paris, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleu, 1971.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. Economic Geology, 1963.

MELLO, J. M. de et al. Estudo da Dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. Artigo – Universidade Federal de Lavras, 2005.

MEMÓRIA, J. M. P. Breve História da Estatística. Texto para Discussão 21. Embrapa Informação Tecnológica. Brasília. 116p. 2001

MORIN, J.; BENYAMINI, Y.; MICHAELI, A. The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement on the profile. *Journal of Hydrology* (52). 321-336. 1981.

MORIN, J.; van WINKEL, J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation. *Soil Science Society of America Journal*, v.60, p.1223-1227, 1996.

MOSCA, A.A.O. Caracterização hidrológica de duas microbacias visando a identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental de manejo de florestas plantadas. Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo, SP, 2003. 96p.

ODUM, E.P. *Ecologia*. Rio de Janeiro, Interciência. 1985

OLIVEIRA, J. B. Solos do estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas, Instituto Agrônomo, 1999.

ORTIZ, G. C., Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo. 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PEREIRA, F. A. C.; FONSECA, A. A. O.; ALMEIDA, E. C.; MOREIRA, C. S.; MACEDO, D. J. B.; CRUZ J. D. Comparação entre condutividade hidráulica saturada determinada em campo e laboratório. Cruz das Almas, Bahia, 2001.

PIRES, J.S.R. & SANTOS, J.E. Bacias Hidrográficas - Integração entre meio ambiente e desenvolvimento. *Ciência Hoje* 19 (110): 40-45.1995

PIRES, L. P.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LEITE, F. P.; BRITO, L. F. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na região centro-leste de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2006. vol.41, n.4. pp. 687-695. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2006000400021&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 13 de Agosto de 2010.

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

RAMSAY, J. Shear zones geometry: a review. *Journal of Structural Geology*, Mainz, v. 2, p 83-99, 1980

REICHARDT, K; VIEIRA, S. R.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Campinas, 1986.

REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; CABEDA, M. S. V. Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.16, n.3, p.289-298, 1992.

RIBEIRO JÚNIOR, P.J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo. Piracicaba, Escola Superior "Luiz de Queiroz", 1995. (Tese de Mestrado).

RIZZO, L.T.B. Meio Físico & Solo-Fazenda Santa Edwiges. Relatório Técnico. 2006.

SALES, L. E. O et al. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 1999. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X1999001100016&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 07 de Janeiro de 2007. Pré-publicação.

SAMPER, F. J. S.; RAMIREZ, J. C. *Geoestadística: aplicaciones a la hidrogeologia subterránea*. Barcelona: Gráficas Torres, 1990.

SANTOS, C. M. Proposta Metodológica para a caracterização de áreas com potencial de erosão. Guaratinguetá. UNESP, 2006. 16p (Artigo)

SCHERPINSKI, N. I. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos e do rendimento dos grãos de soja em um latossolo vermelho sob sistema de plantio direto convencional. Cascavel, Paraná, 2003. (Tese de Mestrado).

SCOTT, H. D. Soil Water flow process in the field. In: *Soil Physics – Agricultural and Environmental Applications*, Iowa State University Press. (2000). 421p.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E. Redução do desprendimento das partículas do solo mediante uso de resíduos vegetais de origem urbana. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient. Campina Grande*. v. 6, n. 3, Dec. 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662002000300026&lng=en&nrm=iso> Acessado em 27 de outubro de 2009.

SIMOES, S. J. C. ; BERNARDES, G. P. ; Trannin, I.C.B. ; Soares, P.V. ; Pereira, S.Y. ; ZAKIA, M. J. B. ; DIAS, J. F. . A importância do meio físico para o manejo sustentável de plantio de eucalipto em áreas de terrenos acidentados A fazenda Santa Edwiges, Vale do Paraíba, Sudeste do Brasil. In: II SERHIDRO - 2009. Recuperação de Áreas Degradadas, Serviços Ambientais e Sustentabilidade, 2009, Taubaté. II SERHIDRO - 2009. Recuperação de Áreas Degradadas, Serviços Ambientais e Sustentabilidade, 2009. p. 247-256.

SOARES, P. V.; As interrelações de elementos do meio físico natural e modificado na definição de áreas potenciais de infiltração naporção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul.

Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Geociências. Tese de Doutorado. 2005. 169p.

SOARES, P. V.; PEREIRA, S. Y.; SIMÕES, S. J. C.; BERNARDES, G. P.; BARBOSA, S. A. Mapa de infiltração do alto e médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos do meio físico e na precipitação. *Revista Ambi-Água*, Taubaté, v. 3, n. 1, p. 26-42, 2008.

SOSSAE, F. ; ZANCUL, M. C. S. ; OLIVEIRA, S. C. ; TEIXEIRA, D. Bacia Hidrográfica – Uma abordagem sistêmica. In: III Encontro Estadual de Educação Ambiental, 2007, São José do Rio Preto. *Anais Do III Encontro Estadual de Educação Ambiental*, 2007.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho distrófico sob semeadura em Selvíria (MS). *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, 2001.

TEIXEIRA, W; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILO, T.R.; TAIOLI, F. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

TEODORO, V. L. I; TEIXEIRA, D; COSTA, D. J. L; FULLER, B. B.. O Conceito de Bacia Hidrográfica e a Importância da Caracterização Morfométrica para o Entendimento da Dinâmica Ambiental Local. *Revista Uniara*, n. 20, 2007.

TOMLIN, D. *Geographic information systems and cartographic modeling*. New York, Prentice Hall, 1990. 362p.

USGS (United States Geological Survey) *The Water Cycle, a Quick Summary*. 2010. Disponível em: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>>. Acessado em: 22 de Março de 2010.

VALENTE, J.M.G.P. *Geomatemática - lições de geoestatística*. Ouro Preto: Fundação Gorceix, 1982. v. 6, 323p.

VASCONCELLOS, T. B. Estudo de um perfil de infiltração em região de topos de morro. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, São Paulo, 2008. (Artigo).

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000.

ZADEH, Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), p. 338-353. 1965.

ZAKIA, M. J. B. Identificação e caracterização da zona ripária em uma sub-bacia experimental: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de florestas. 1998. 98 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade Paulista, São Carlos SP.