



UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PAULISTA  
FEG – FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ

LUIZA FERNANDES MARTINS DOS SANTOS

# **SIG E ÁLGEBRA DE MAPAS NA ELABORAÇÃO DE UM MAPA DE POTENCIAL DE EROSÃO EM ÁREAS DE SILVICULTURA**

Guaratinguetá

2011

LUIZA FERNANDES MARTINS DOS SANTOS

# SIG E ÁLGEBRA DE MAPAS NA ELABORAÇÃO DE UM MAPA DE POTENCIAL DE EROSÃO EM ÁREAS DE SILVICULTURA

Projeto Integrado apresentado na  
Disciplina Projeto integrado II do  
Departamento de Engenharia Civil  
da Faculdade de Engenharia do  
Campus de Guaratinguetá,  
Universidade Estadual Paulista  
como parte dos requisitos para  
obtenção do diploma de Graduação  
em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Jorge Coelho Simões

Guaratinguetá  
2011

Santos, Luiza Fernandes Martins dos

S237 SIG e álgebra de mapas na elaboração de um mapa de potencial de  
s erosão em áreas de silvicultura / Luiza Fernandes Martins dos Santos –  
Guaratinguetá : [s.n], 2011.  
75 f. : il.  
Bibliografia : f. 69-75

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade  
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.  
Orientador: Prof. Dr. Sílvio Jorge Coelho Simões

1. Solos – erosão I. Título

CDU 624.131.6

**unesp** UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

**SIG E ÁLGEBRA DE MAPAS NA ELABORAÇÃO DE UM  
MAPA DE POTENCIAL DE EROSÃO EM ÁREAS DE  
SILVICULTURA**

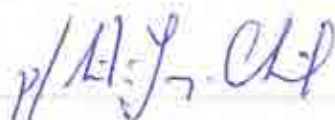
**LUIZA FERNANDES MARTINS DOS SANTOS**

ESTE PROJETO INTEGRADO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"

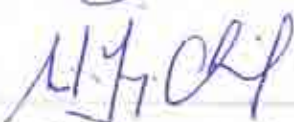
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Prof. Dr. Sílvio Jorge Coelho Simões  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Doutorando Celso de Souza Catelani

  
Profa. Dra. Isabel Cristina de B. Tramin

  
Prof. Dr. Sílvio Jorge Coelho Simões

Dezembro de 2011

## **Agradecimentos**

A todos aqueles que fizeram desses anos de graduação inesquecíveis e certamente incríveis. Pelo amor, apoio, incentivo, companhia, aprendizado.

Um sincero, obrigada.

SANTOS, L.F.M. **SIG e álgebra de mapas na elaboração de um mapa de potencial de erosão em áreas de silvicultura**. 2011. 75f. Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2011.

### **Resumo**

Esse trabalho objetivou a geração de um mapa de potencial de erosão para a Fazenda Santa Edwirges localizada no município de Lorena/SP. Foi realizada a classificação dos resultados obtidos em baixo, moderado, alto e muito alto potencial de erosão e posteriormente foi comparado o mapa gerado com outros mapas já existentes para a área de estudo. A metodologia proposta baseia-se em uma aplicação qualitativa simples da Equação Universal de Perda de Solo (USLE ou EUPS), considerando as parcelas da equação: erodibilidade, topografia e uso e manejo do solo, e integrando os dados através da álgebra de mapas no ambiente SIG do ArcGIS. Para representação de cada um destas parcelas utilizou-se um Mapa de Formações Superficiais, gerado a partir de uma releitura do Mapa Geológico, um Mapa de Declividade e um Mapa de Uso de Solo, atribuindo pesos de importância para cada das classes desses mapas no processo erosivo e na álgebra realizada. Os resultados obtidos apresentaram coerência entre as zonas identificadas como mais críticas e a situação encontrada em campo. A fazenda foi identificada como de potencial moderado de erosão, sendo a porção sul da fazenda mais crítica, seguida pela faixa guiada pela zona de cisalhamento e as planícies próximas aos rios a área mais estável com o menor potencial. Da comparação dos resultados desse trabalho e de outros anteriormente realizados para área, utilizando parâmetros geotécnicos na representação da erosividade do solo, foi possível constatar resultados semelhantes, principalmente nas zonas de maior e menor potencial de erosão. Da discussão e análise dos resultados obtidos, acredita-se na validação da metodologia proposta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Potencial de Erosão, Equação Universal de Perda de Solos, Álgebra de Mapas, Sistema de Informações Geográficas.

**SANTOS, L.F.M. SIG et l'algèbre de carte pour générer une carte du potentiel d'érosion dans une zone de sylviculture.** 2011. 75f. Rapport de Fin d'études (Graduation em Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2011.

### **Resume**

Cette étude visait à générer une carte du potentiel d'érosion pour la Ferme Santa Edwirges, située à Lorena /SP. Les résultats ont été classifiés en faible, modéré, élevé et très élevé potentiel d'érosion et la carte obtenue a été comparée par rapport aux autres cartes existantes pour la zone d'étude. La méthodologie proposée se basant sur une application qualitative simple L'équation Universelle de Perte de Sol (USLE ou EUPS), en considérant les parties de l'équation: érodibilité, la topographie et l'utilisation des terres. Les données ont été intégrées par l'algèbre de carte dans l'environnement SIG de ArcGIS. Pour la représentation de chacune de ces parcelles, nous avons utilisé une carte des formations superficielles de la ferme, générée à partir d'une ré-interprétation de la carte géologique, une carte de la pente et une carte d'utilisation des terres, attribuant un poids d'important pour chaque catégorie de ces cartes dans le processus d'érosion et dans l'algèbre proposée. Les résultats obtenus sont compatibles avec les zones identifiées comme les plus critiques sur terrain. La ferme a été identifiée comme de potentiel d'érosion modérée et la partie sud de la ferme le plus critique, suivi du groupe conduit par la zone de cisaillement, par contre les plaines proches des rivières ont été identifiées comme la zone plus stable avec moins de potentiel d'érosion. De la comparaison des résultats de ce travail et d'autres qui ont fait antérieurement dans la zone d'intérêt, qui ont utilisé les paramètres géotechniques dans la représentation de l'érosivité des sols, nous avons pu voir des résultats similaires, en particulier dans les zones à potentiel élevé et faible pour l'érosion. De la discussion et analyse des résultats, la méthodologie proposée a été validée.

**MOTS CLÉS:** Potentiel d'érosion, Équation Universelle de Perte des Sols, Algèbre de cartes, Système d'Information Géographique

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1–Esquema dos mecanismos de erosão: Capacidade de infiltração de água no solo e zonas de escoamento. - FONTE: CASSANELAS, 1994.....                                                                                         | 17 |
| FIGURA 2 - Classes de operações geográficas.....                                                                                                                                                                                   | 28 |
| FIGURA 3 – Localização da área de estudo :Fazenda Santa Edwirges, município de Lorena(SP), (Santos, 2006) .....                                                                                                                    | 32 |
| FIGURA 4 - Mapa geológico da Fazenda Santa Edwirges (Rodrigues & Milanesi, 2005) .....                                                                                                                                             | 33 |
| FIGURA 5 - Modelo Digital de Terreno, demonstrando as três formas de relevo existentes na Fazenda Santa Edwiges: Escarpas Alongadas (marrom), Morros e Morrotes Arredondados (bege) e Colinas Alveolares (verde) Lima (2005). .... | 35 |
| FIGURA 6 – Mapa Pedológico da Fazenda Santa Edwirges- FONTE: Fíbria Papel e Celulose .....                                                                                                                                         | 37 |
| FIGURA 7 – Mapa de Uso de Solo da Fazenda Santa Edwirges no Município de Lorena, SP (SANTOS, 2006). ....                                                                                                                           | 41 |
| FIGURA 8 - Precipitação na Fazenda Santa Edwirges em Lorena (SP) –(SILVA, 1999). ....                                                                                                                                              | 42 |
| FIGURA 9 – Esquema ilustrativo da metodologia aplicada à criação do Mapa de Potencial de Erosão da Fazenda Santa Edwirges em Lorena (SP). ....                                                                                     | 46 |
| FIGURA 10 – Tabela de Atributos – Ponderação : Mapa Geológico.....                                                                                                                                                                 | 47 |
| FIGURA 12- Mapa de Formações Superficiais da Fazenda Santa Edwirges, Município de Lorena-SP .....                                                                                                                                  | 52 |
| FIGURA 13- Mapa de Declividade da Fazenda Santa Edwirges (SANTOS, 2006). ....                                                                                                                                                      | 54 |
| FIGURA 14- Mapa de Uso do Solo da Fazenda Santa Edwirges no Município de Lorena – SP (SANTOS, 2006). ....                                                                                                                          | 55 |
| FIGURA 15 – Mapas no formato Raster, baseados na ponderação das classes. (a)Mapa de Declividade, (b) Mapa de Uso do Solo e (c) Mapa Formações Superficiais da Fazenda Santa Edwirges, Lorena - SP .....                            | 57 |

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 16 – Mapas de Suscetibilidade Natural à Erosão para a Fazenda Santa Edwirges, em Lorena (SP).....                                               | 59 |
| FIGURA 17 – Mapas de Potencial de Erosão para a Fazenda Santa Edwirges, em Lorena(SP).....                                                             | 60 |
| FIGURA 18 – Mapa do Potencial de Erosão para a Fazenda Santa Edwirges , Classificação em Índices de Erosão da Fazenda Santa Edwirges, Lorena (SP)..... | 62 |
| FIGURA 20 - Mapa do Potencial de Erosão, definido pelo índice de dispersão (granulometria ) (SANTOS, 2006). ....                                       | 64 |
| FIGURA 21 - Mapas de Potencial de Erosão definidos pela plasticidade: (a) #40; (b) #200 (SANTOS, 2006).....                                            | 65 |
| FIGURA 22 - Mapas de Potencial de Erosão definidos pela resistência à tração: (a) $\omega < 30\%$ ; (b) $\omega > 30\%$ , (SANTOS, 2006). ....         | 65 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1 – Relação entre Unidades Geológicas e Formações Superficiais .....          | 49 |
| TABELA 2- Ponderação de classes para o Mapa de Formações Superficiais .....          | 53 |
| TABELA 3- Ponderação de classes para o Mapa de Declividade .....                     | 54 |
| TABELA 4- Ponderação de classes para o Mapa de Uso do Solo.....                      | 56 |
| TABELA 5- Qualificadores dos índices de erosão e intervalos de pesos propostos ..... | 61 |

## SUMÁRIO

|       |                                                        |    |
|-------|--------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO.....                                        | 13 |
| 1.1   | Objetivos.....                                         | 14 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral .....                                   | 14 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos .....                            | 14 |
| 2     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                             | 15 |
| 2.1   | O Processo Erosivo.....                                | 16 |
| 2.2   | Vulnerabilidade à Erosão Laminar .....                 | 18 |
| 2.2.1 | Chuva.....                                             | 19 |
| 2.2.2 | Cobertura Vegetal.....                                 | 19 |
| 2.2.3 | Tipo de Relevo .....                                   | 19 |
| 2.2.4 | Solos .....                                            | 20 |
| 2.3   | Modelos de avaliação da susceptibilidade a erosão..... | 21 |
| 2.4   | Equação universal de perdas de solo .....              | 21 |
| 2.4.1 | Erosividade (R).....                                   | 23 |
| 2.4.2 | Erodibilidade (K).....                                 | 24 |
| 2.4.3 | Declividade e Comprimento de Rampa (LS) .....          | 25 |
| 2.4.4 | Cobertura de solo e Práticas de conservação (CP) ..... | 26 |
| 2.5   | Álgebra de Mapas.....                                  | 27 |
| 2.6   | SIG e Erosão .....                                     | 29 |
| 3     | MATERIAIS E MÉTODOS.....                               | 32 |
| 3.1   | MATERIAIS .....                                        | 32 |
| 3.1.1 | ÁREA DE ESTUDO .....                                   | 32 |
| 3.1.2 | Banco de Dados .....                                   | 42 |

|       |                                                     |    |
|-------|-----------------------------------------------------|----|
| 3.2   | MÉTODOS.....                                        | 43 |
| 3.2.1 | Criação de um mapa de formações superficiais .....  | 43 |
| 3.2.2 | Criação de um mapa de potencial de erosão.....      | 43 |
| 3.2.3 | Comparação entre mapas gerados e já existentes..... | 47 |
| 3.3   | Softwares utilizados.....                           | 48 |
| 4     | RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                        | 49 |
| 4.1   | Mapa de Formações Superficiais.....                 | 49 |
| 4.2   | Mapa de Potencial de Erosão.....                    | 51 |
| 4.2.1 | Ponderação de classes.....                          | 51 |
| 4.2.2 | Mapas de Potencial de Erosão .....                  | 58 |
| 4.3   | Comparação entre os mapas .....                     | 63 |
| 5     | CONCLUSÕES .....                                    | 68 |
| 6     | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                    | 69 |

# 1 INTRODUÇÃO

Segundo Teixeira Guerra e Cunha (2007) um dos objetivos das pesquisas sobre erosão dos solos é o de procurar resolver os problemas oriundos desses processos que, em última análise, geram uma série diversificada de impactos ambientais.

A erosão do solo é um problema que gera graves danos ao ambiente e também para a sociedade. Para a agricultura as perdas de nutrientes e matéria orgânica, as alterações na textura e estrutura do solo afetam o meio ambiente e a produção agrícola. O assoreamento de rios é a consequência direta do acúmulo de sedimentos que também pode ter sérias consequências ambientais como as apontadas por Carvalho (2008).

Ainda no âmbito urbano, a erosão pode estar associada a problemas de deslizamentos, queda de taludes em estradas, além da transferência de solos em vertentes, depositados em reservatórios e estruturas de contenção de inundação (piscinões).

Por esses motivos, determinar zonas com alto potencial erosivo pode auxiliar no planejamento da ocupação do solo de maneira a prevenir, evitar ou desacelerar estes processos. Neste sentido, em algumas partes do mundo, tem-se encontrado formas alternativas, inteligentes e eficazes de combater, com sucesso, esse problema e garantir a produção agrícola e a sobrevivência das sociedades e manter o equilíbrio do meio ambiente (Silva, 2003).

A Equação Universal de Perda de Solo é um modelo empírico, baseado em grandes bases de dados de campos, que estimam a erosão distribuída e concentrada com base em valores a quatro grandes fatores intervenientes no processo erosivo: erosividade, erodibilidade, topografia e uso e manejo do solo (Ward e Elliot, 1995).

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), por sua vez, têm sido amplamente aplicados para diversos tipos de manipulação de dados geoespaciais. Ao integrar informações espacializadas de determinada área, eles permitem uma análise da perda de solo por erosão laminar.

Portanto, com o auxílio de um SIG, como ferramenta de manipulação de dados, aplicou-se os princípios da álgebra de mapas em três diferentes mapas para a área de estudo, cada um deles representando um dos fatores determinantes para erosão e cuja interação identificasse as zonas com maior potencial à erosão.

A fazenda Santa Edwirges, localizada no município de Lorena, interior de São Paulo, foi utilizada como área de estudo para a aplicação dos conceitos e da metodologia proposta no estudo desenvolvido no Laboratório de Análise Geo-Espacial (LAGE) do Departamento de Engenharia Civil da FEG/UNESP.

Diversos estudos na área de geoprocessamento já foram realizados para essa região apresentando resultados significativos para a criação de um banco de dados interessante para estudos complementares. Dentre tais estudos encontra-se o desenvolvido por Santos (2006), que também utiliza a álgebra de mapas para geração de mapas de potencial de erosão, porém aplicando diferentes variáveis na sua elaboração.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral produzir um mapa de potencial de erosão laminar para a Fazenda Santa Edwirges, localizada no município de Lorena-SP, por meio de uma análise qualitativa de mapas, baseada nos fatores que influenciam o processo erosivo e que são parcelas da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS).

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar um Mapa de Formações Superficiais baseado numa releitura do Mapa Geológico da área de estudo (Milanezi & Rodrigues, 2005);
- Elaborar um mapa de potencial de erosão, aplicando álgebra de mapas e utilizando os mapas de Formações Superficiais, de Uso do Solo (Santos, 2006) e de Declividade (Lima, 2005);
- Comparar os mapas de potencial de erosão obtidos os gerados por Santos (2006) para área de estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A erosão é um dos principais fenômenos geológicos que ocorre na Terra e se processa de várias formas se considerarmos seu ambiente de ocorrência (Rodrigues et al. 1982).

A erosão modifica a paisagem e pode gerar consequências custosas para a sociedade e para o ambiente. Através da degradação de recursos naturais como a água e o solo, a erosão pode gerar problemas como assoreamento e poluição de cursos d'água; prejudicar a saúde humana e animal; destruir estradas, pontes e bueiros, afetar a geração de energia em barragens ou a capacidade de contenção de barragens e diques; e ainda gerar a redução da produtividade agrícola, alteração no traçado de rios, enchentes e assoreamento de reservatórios (Silva et al., 2003).

Por esses motivos, entender o processo erosivo, estudá-lo e, se possível, identificar áreas com potencial de risco de ocorrência é tão importante quanto à proposição de práticas de conservação, prevenção e delimitação de áreas de riscos.

Com o surgimento dos SIGs, o uso, tratamento e manipulação de dados geológicos espaciais se tornou mais fácil, preciso e o número de opções e operações muito maior.

A aplicação desses recursos na determinação de regiões com potencial de erosão, integrando mapas e informações disponíveis, pode gerar resultados interessantes para análises qualitativas e quantitativas.

Os estudos de erosão hídrica laminar contam hoje com modelos de predição, que associados a essas técnicas de geoprocessamento possibilitam a previsão de perdas de solo, análises espaciais do fenômeno, e seleção de práticas para controle, facilitando a adoção de medidas pontuais, planejamento ambiental, uso e ocupação do solo, práticas de controle da erosão e priorização das ações de pesquisa (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1999; ROUSSEVA, 2003 e ZHANG, 2009).

Esse trabalho propõe, justamente, a integração de mapas no ambiente SIG, utilizando conceitos de álgebra de mapas e ponderando algumas variáveis da equação universal de perdas de solo na elaboração de um mapa de potencialidade qualitativa de erosão do solo, sendo alguns desses conceitos abordados a seguir.

## 2.1 O PROCESSO EROSIVO

A erosão consiste em um conjunto de processos pelos quais os materiais da crosta terrestre são degradados, dissolvidos ou desgastados e transportados de um ponto a outro pelos agentes erosivos. Na erosão por precipitação, distinguem-se como agentes a gota que se precipita e o escoamento superficial resultante (Vilar e Prandi, 1993).

A erosão hídrica envolve uma série de transferências de energia e matéria, desde a energia cinética da gota ao cair, o impacto desta ao encontrar o solo e então o desequilíbrio gerado por ela no solo, liberando ou não partículas. Ou seja, um desequilíbrio do sistema água/solo/cobertura vegetal pode resultar numa perda progressiva do solo.

A energia da chuva é aplicada à superfície do terreno e, a partir de um limite de resistência ao cisalhamento do solo, iniciam-se as transferências de matéria por processos de desestabilização dos agregados do solo, de movimentação e transporte de partículas e de sedimentação em zonas mais rebaixadas da topografia (Mafra et al., 1999).

Segundo Elisson, (1947) apud Silveira (2002), a dinâmica do processo erosivo pode ser esquematizada por quatro sub-processos:

- a) Destacamento de partículas pela gota de chuva;
- b) Transporte do sedimento pela gota;
- c) Destacamento pelo fluxo superficial e
- d) Transporte pelo fluxo.

A gota da chuva possui papel desagregador, que através do impacto desestabiliza, desagrega e assim libera as partículas do solo para transporte.

Além disso, o impacto da gota sobre o solo pode provocar a compactação e selamento da superfície, diminuindo sua capacidade de infiltração e, conseqüentemente, levando ao escoamento superficial da água (Sohr, 2007; Schaefer, 2002; Lal, 1974 e Richart, 2005). Outras vezes, ainda, o limite de saturação do solo é atingido e, mais uma vez, se principia o escoamento da água.

A formação desses fluxos de escoamento, por sua vez, além de transportar sedimentos já desagregados, arrasta novas partículas contribuindo para o processo erosivo. Contrapondo-se à força de desagregação e arraste da chuva, o solo e a vegetação impõem resistência ao

processo, podendo, dependendo das características, tanto do solo, quanto do uso feito daquele solo, oferecer maior ou menor resistência.

Portanto, a erosão depende das relações existentes entre a capacidade erosiva da chuva e os fluxos de superfície e subsuperfície, assim como da suscetibilidade dos materiais a serem erodidos (Mafra et al, 1999).

Este processo apresenta feições extremamente complexas. havendo condições favoráveis ao escoamento superficial e à remoção das partículas de solo, observa-se o transporte das partículas liberadas por escoamento laminar ou difuso ou ainda concentrado em linhas de fluxo d água.

A água começa a escoar na superfície, primeiramente em lençol, depois através de fluxos lineares, que evoluem para microravinas, podendo formar cabeceiras, e algumas dessas cabeceiras podem bifurcar, formando novas ravinas.

Na figura 1 é apresentado um esquema do desenvolvimento destas etapas para um modelo hipotético de vertente, apresentando as mesmas condições de erodibilidade do solo.

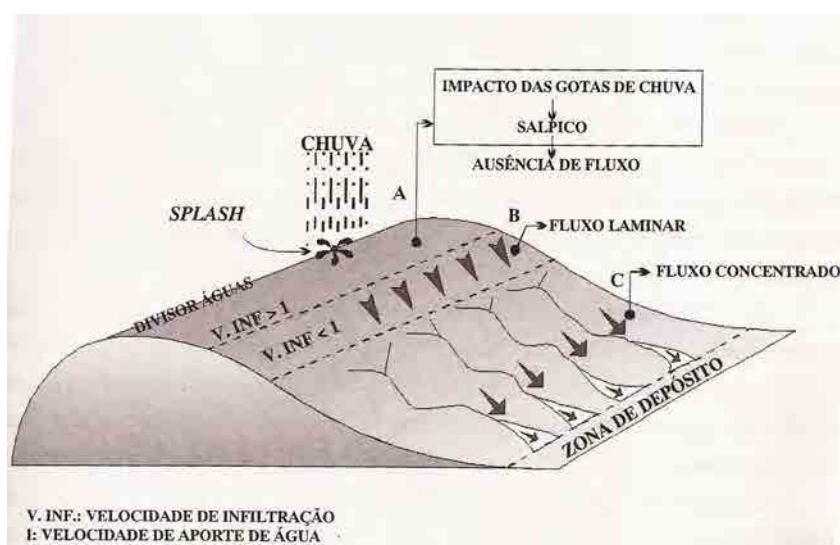


FIGURA 1—Esquema dos mecanismos de erosão: Capacidade de infiltração de água no solo e zonas de escoamento. - FONTE: CASSANELAS, 1994.

O escoamento superficial é tanto mais intenso quanto menor for a taxa de infiltração das águas pluviais no terreno. Por sua vez, a infiltração relaciona-se diretamente à permeabilidade do terreno, variando em função da compactação promovida pela ocupação do solo, pela intensidade e frequência das chuvas, natureza e organização do solo, e inclinação, geometria e comprimento das vertentes (Bertoni e Lombardi Neto, 1985).

Dependendo da forma em que se dá o escoamento superficial ao longo da vertente, como citado por Salomão (1999), pode-se desenvolver dois tipos de erosão:

- erosão laminar ou em lençol, quando causada por escoamento difuso das águas de chuva, resultando da remoção progressiva e relativamente uniforme dos horizontes superficiais do solo; e
- erosão em sulcos, quando causada por concentração das linhas de fluxo das águas de escoamento superficial, resultando em pequenas incisões na superfície do terreno, que podem evoluir, por aprofundamento, a ravinas.

O que se propõe nesse trabalho é o estudo de zonas com potencialidade de erosão laminar, onde esse processo ainda não é visualmente identificável.

A erosão hídrica laminar é uma forma de erosão menos perceptível, que quando notada, já apresenta perda significativa de solos, o que torna mais perigosa e faz da elaboração de um mapa desse caráter algo ainda mais interessante e necessário.

## 2.2 VULNERABILIDADE À EROSÃO LAMINAR

A suscetibilidade à erosão laminar dos terrenos pode ser cartograficamente determinada, com base na análise dos fatores naturais influentes no desenvolvimento dos processos erosivos. As perdas de solo por erosão laminar são comandadas por diversos fatores relacionados às condições naturais dos terrenos, destacando-se a chuva, a cobertura vegetal, a topografia e os tipos de solos (Salomão, 1999).

No caso da erosão superficial, os efeitos ocorrem, quase que exclusivamente, na superfície dos solos e o desenvolvimento dos processos erosivos está condicionado por fatores como:

- Características dos solos (erodibilidade);
- Agressividade das chuvas (erosividade);
- Tipos de relevo (que determinam os tipos de escoamento) e;
- Cobertura vegetal e tipos de uso e manejo do solo.

A combinação desses fatores determina a maior ou menor predisposição de uma área à erosão superficial.

### 2.2.1 CHUVA

A água da chuva, como já mencionado, influencia o processo de erosão pelo impacto da gota no solo, que desagrega as partículas ou pode promover o selamento de sua superfície diminuindo a permeabilidade do solo.

A velocidade, energia cinética da gota, a frequência e intensidade da chuva e também o escoamento da água determinam sua influência na erosão laminar. Sua ação erosiva depende da distribuição pluviométrica, mais ou menos regular, no tempo e no espaço, e sua intensidade.

O índice que expressa a capacidade da chuva de provocar erosão laminar é conhecido como erosividade e será melhor explorado mais adiante.

### 2.2.2 COBERTURA VEGETAL

A cobertura vegetal é a defesa natural de um terreno possui contra a erosão. Entre os principais efeitos da cobertura vegetal, Bertoni e Lombardi Neto (1985) destacam os seguintes:

- Proteção contra o impacto direto das gotas de chuva;
- Dispersão e quebra da energia das águas de escoamento superficial;
- Aumento da infiltração pela produção de poros no solo por ação das raízes;
- Aumento da capacidade de retenção de água pela estruturação do solo por efeito da produção e incorporação de matéria orgânica.

### 2.2.3 TIPO DE RELEVO

A influência da topografia do terreno na intensidade erosiva verifica-se principalmente pela declividade e comprimento de rampa. Esses fatores interferem diretamente na velocidade das enxurradas.

Segundo Resende (1985), a erosão dos solos aumenta das formas côncavas para as convexas, passando pela linear que apresenta maior estabilidade. De acordo com este autor, as formas côncavas apresentam remoção ineficiente de sedimento, principalmente na base de suas encostas, sendo forma de maior convergência de água, enquanto a forma convexa apresenta maior divergência.

A declividade se relaciona com a erosão por atuar sobre a velocidade de escoamento da água gerada pela declividade. Assim, quanto maior a declividade, maior a velocidade, e,

conseqüentemente, maior será o volume carregado devido à força erosiva. No caso do comprimento da rampa, esta é diretamente proporcional ao volume de água e à velocidade de escoamento que podem favorecer o processo erosivo.

Em alguns casos, entretanto, o comprimento da rampa diminui o efeito erosivo, considerando-se que a capacidade de infiltração e a permeabilidade do solo reduz o efeito.

#### 2.2.4 SOLOS

O solo, por influenciar e sofrer a ação dos processos erosivos, conferindo maior ou menor resistência, constitui o principal fator natural relacionado à erosão. Sua influência deve-se às suas características físicas, principalmente, textura, estrutura, permeabilidade e densidade e às suas propriedades químicas, biológicas e mineralógicas (Salomão et al., 1999).

A *textura*, ou seja, o tamanho das partículas, influi na capacidade de infiltração e de absorção de água da chuva, inferindo no potencial de enxurradas, e em relação a maior ou menor coesão entre as partículas.

A *estrutura*, modo como se arranjam as partículas de solo, igualmente à textura, influencia na capacidade de infiltração e absorção da água de chuva e na capacidade de arraste das partículas do solo.

A *permeabilidade* determina maior ou menor capacidade de infiltração da água de chuva, estando diretamente relacionada com a porosidade do solo. A *densidade* do solo é inversamente proporcional a porosidade e permeabilidade. Por efeito de compactação, observa-se um aumento da densidade, reduzindo macroporos e tornando o solo mais erodível.

As propriedades físicas, químicas, biológicas e mineralógicas do solo influenciam no estado de agregação das partículas do solo, aumentando ou diminuindo a resistência do solo à erosão.

## 2.3 MODELOS DE AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE A EROSÃO

A modelagem da erosão do solo é uma forma de descrever matematicamente o processo de desprendimento, transporte e deposição de partículas. Assim, torna-se uma ferramenta eficaz para avaliar as estratégias de ação a serem adotadas, visando o controle da degradação dos solos.

Para a estimativa dos processos erosivos podem ser empregados diferentes modelos e abordagens que se diferenciam, basicamente, por objetivar quantificar as perdas de solo por erosão ou realizar uma avaliação qualitativa do comportamento erosivo de uma área de interesse.

Segundo Chaves (1994), a análise quantitativa permite a estimativa da erosão absoluta, facilitando o planejamento conservacionista. Entretanto, os modelos quantitativos exigem um maior conhecimento por parte do usuário, além de requerer mais informações do que os modelos qualitativos.

Por outro lado, a análise qualitativa tem como principal vantagem a facilidade de manipulação dos fatores selecionados em termos de grau de risco a erosão e sua posterior combinação para a obtenção dos graus de severidade erosiva. Sendo qualitativa, entretanto, a estimativa da erosão não permite a obtenção de valores numéricos, importante para a estimativa da degradação do solo e da sedimentação.

Com o desenvolvimento dos SIGs a aplicação de modelos qualitativos foi amplamente facilitada pela possibilidade de integração de informações espaciais com maior eficiência e simplicidade de manipulação dos dados.

## 2.4 EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDAS DE SOLO

Para estudar o fenômeno da erosão existem métodos diretos, baseados na coleta do material erodido, em campos experimentais e/ou em laboratório, e métodos indiretos, por meio de modelagem matemática.

Dentre esses modelos matemáticos, a Equação Universal de Perda de Solos (EUPS ou USLE), proposta por Wischmeier e Smith (1978), quando espacializada por meio de um SIG, permite uma análise da perda de solo por erosão laminar, possibilitando contextualizar os resultados obtidos em função do uso e ocupação das terras. (Paes, 2010)

A Equação Universal da Perda de Solos (EUPS) começou a ser implantada no final da década de 1950 pelo Serviço de Conservação dos Solos dos Estados Unidos. Trata-se de um modelo empírico, baseado dados de campo, que estimam a erosão distribuída e concentrada, em função de quatro grandes fatores intervenientes no processo erosivo (Ward e Elliot, 1995).

- erosividade climática,
- erodibilidade dos solos,
- topografia, e
- uso e manejo da terra

A equação foi projetada como um método para a predição da média anual de perda de solo causada por erosão laminar, e não se adequa para a estimativa para um evento pluviométrico específico (USDA, 1996). Sendo definida por:

$$A = R . K . L . S . C . P , \quad (1)$$

onde:

$A$  = perda de solo, em  $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ ;

$R$  = fator erosividade da chuva, em  $MJ.mm. ha^{-1}. h^{-1}.ano^{-1}$ ;

$K$  = fator erodibilidade do solo, em  $t.h.MJ^{-1}.mm^{-1}$ ;

$L$  = fator comprimento de rampa, baseado nos valores, em metros, do comprimento de rampa (adimensional);

$S$  = fator declividade, baseado nos valores, em porcentagem, da declividade (adimensional);

$C$  = fator uso e manejo (adimensional); e

$P$  = fator práticas conservacionistas (adimensional).

Embora não desenvolvida para este fim, esta equação tem sido utilizada como pano de fundo para estudos qualitativos da vulnerabilidade natural dos ambientes, refletida na predisposição natural das terras à erosão superficial, visto que contempla todos os fatores predisponentes deste tipo de processo erosivo. Dentro da EUPS, alguns fatores são considerados intrínsecos do solo, e determinam sua suscetibilidade natural a erosão, e outros

fatores são dependentes das formas de ocupação e unidos com a suscetibilidade relacionam a potencialidade erosiva do solo.

Fatores dependentes das condições naturais

$$A = R \quad K \quad LS \quad C \quad P$$

Fatores relacionados a forma de ocupação

O potencial natural à erosão laminar (PNE), refere-se à parte da equação que considera as condições naturais e, portanto, a suscetibilidade natural da área analisada à erosão. Ele representa a integração dos principais fatores naturais do meio físico intervenientes no processo de erosão laminar sendo fornecido por:

$$PNE = K.R.LS \quad (2)$$

Onde:

R é a erosividade ( $\text{MJ mm. ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ),

K é a erodibilidade ( $\text{t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ) e

LS é o fator relevo.

#### 2.4.1 EROSIVIDADE (R)

Segundo Lal (1988), a força dirigente dos agentes de erosão que causam a desagregação do solo e seu transporte, é denominada de erosividade. Parte da erosividade da chuva é devida ao impacto direto das gotas de chuva, e outra ao escoamento que a chuva gera.

A capacidade da chuva de causar erosão do solo é atribuída à proporção e distribuição das gotas de chuva, segundo a carga de sua energia. Assim, a erosividade de uma chuva é atribuída à sua energia cinética, parâmetros facilmente relacionados às suas intensidade e quantidade total.

O Fator R é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva em provocar erosão, em uma área sem proteção (Bertoni e Lombardi Neto, 1993). O índice representa a

perda de solo, como produto da energia cinética da chuva pela sua intensidade máxima em 30 minutos (Catâneo *et al.*, 1982).

Para regiões intertropicais, Bertoni e Lombardi Neto, 1993 propõem a seguinte equação para determinação de um valor médio do índice de erosividade por meio da relação entre a média mensal e a média anual de precipitação:

$$EI_{30} = 67,355 (r^2 / P)^{0,85} \quad (3)$$

Onde:

$EI_{30}$  = média mensal do índice de erosividade, em MJ.mm.ha<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>;

$r$  = média do total mensal de precipitação, em mm;

$P$  = média do total anual de precipitação, em mm,

Para determinação de R, soma-se o resultado dos valores mensais do índice de erosividade em cada estação pluviométrica:

$$R = \sum_{j=1}^{12} EI_{30j} \quad (4)$$

Os parâmetros para a definição da erosividade da chuva dependem do volume total de chuva, porém também interferem, a intensidade, as variações no tempo e espaço e a energia cinética dos eventos chuvosos.

#### 2.4.2 ERODIBILIDADE (K)

A erodibilidade do solo é a propriedade do solo que representa a sua susceptibilidade à erosão, podendo ser definida como a quantidade de material que é removido por unidade de área, quando os demais fatores determinantes da erosão permanecem constantes (Freire *et al.*, 1992).

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1985), determina-se a erodibilidade de um solo por meio de suas propriedades intrínsecas, que vêm afetar a velocidade de infiltração de água no solo, bem como sua capacidade de absorção e permeabilidade.

Essas características do solo são determinadas por suas propriedades, como por exemplo pela distribuição do tamanho das suas partículas, estabilidade estrutural, conteúdo de matéria orgânica, natureza dos minerais de argila e constituintes químicos. Além dessas propriedades, alguns parâmetros do solo que afetam a sua estrutura, como hidratação e as características da circulação da água, também afetam sua erodibilidade.

O fator erodibilidade dos solos refere-se, principalmente, às propriedades físico-químicas dos solos, tais como:

- I) Velocidade de infiltração;
- II) Permeabilidade e capacidade de armazenamento;
- III) Resistência às forças de dispersão, abrasão e transporte pelas águas da chuva e escoamento superficial.

#### 2.4.3 DECLIVIDADE E COMPRIMENTO DE RAMPA (LS)

O relevo da encosta exerce forte influência sobre a erosão do solo, sendo representado pelo comprimento, declive e forma da encosta.

O fator LS é um dos fatores mais importante da Equação Universal de Perdas de Solo, porque influencia mais na variação da erosão bruta, do que qualquer um dos outros fatores, exceto o fator manejo do Solo (Williams & Berndt, 1977, apud Fornelos & Neves, 2006).

O comprimento da vertente (L) representa a distância entre o ponto onde se origina o escoamento superficial até o ponto onde a declividade decresce o suficiente para que ocorra a deposição de sedimentos, ou onde a água entra no sistema de canais de drenagem naturais ou artificiais. O gradiente de declividade (S) refere-se à variação de declividade em intervalos de vertentes, sendo expresso em porcentagem.

Embora sejam calculados separadamente, estes parâmetros são representados para aplicação prática, como um único fator topográfico (LS) sendo definido como a taxa de perda de solo por unidade de área de uma parcela-padrão (Wischmeier & Smith, 1978).

### **Fator L - Comprimento de Rampa**

O fator comprimento de rampa tem grande importância na perda de solo, uma vez que quanto maior for a sua extensão, maior será a velocidade do escoamento. A EUPS, utiliza o comprimento de rampa adimensional, adotando o valor médio em metros.

### **Fator S – Declividade**

O volume e a velocidade das enxurradas estão diretamente relacionados ao grau de declividade do terreno (Bertoni e Lombardi Neto, 1985). A EUPS utiliza o fator declividade como uma das variáveis topográficas, adimensional, baseada nos valores obtidos em porcentagem.

### **Fator LS – Fator topográfico**

O Fator LS expressa as relações do relevo com o processo de perdas de solos. Em muitos trabalhos que usam geoprocessamento na determinação dos fatores da EUPS, o fator comprimento de rampa e o fator declividade aparecem associados, representados pela variável LS. Essa associação pode ser feita por meio da equação desenvolvida por Bertoni (1985), para a cidade de Campinas, mas que se adequa bem às condições brasileiras (Baptista, 1997).

$$LS = 0,00984. L^{0,63} . S^{1,18} \quad (5)$$

Onde:

LS : fator topográfico

L: comprimento de rampa em metros

S: grau de declive em porcentagem.

#### **2.4.4 COBERTURA DE SOLO E PRÁTICAS DE CONSERVAÇÃO (CP)**

A influência da cobertura vegetal na determinação das perdas de solo por erosão laminar em áreas cultivadas é definida pelos fatores “uso e manejo do solo (C)” e “prática conservacionista (P)”.

A cobertura vegetal reduz a quantidade de energia cinética que chega ao solo durante uma chuva e atua também na redução dos processos erosivos nas formas de escoamento superficial e transporte de sedimentos.

Guerra (1998) salienta que, em áreas com menos de 70% de cobertura vegetal, o impacto da gota da chuva aumenta substancialmente, fazendo com que a perda de solos e água também aumente proporcionalmente.

As práticas de conservação dos solos (Fator P) também atuam nos processos erosivos e nas perdas de solos. Os valores de P variam conforme o tipo de cultura agrícola e as práticas conservacionistas adotadas na área de estudo. Trata-se da relação entre a intensidade esperada de perda de solo com determinada prática conservacionista ou quando a cultura está disposta no sentido do declive.

O fator C de uso e manejo de solo é a relação esperada entre as perdas de solo de um terreno cultivado em determinadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto.

Bertoni e Lombardi Neto (1985) determinam, a partir de dados experimentais, valores de perdas de solo por erosão laminar em função dos diferentes fatores de uso e manejo de solo e prática conservacionista.

## 2.5 ÁLGEBRA DE MAPAS

O conceito de *álgebra de mapas* ou *álgebra de campos* pode ser visto como uma extensão da álgebra tradicional, com um conjunto de operadores, onde as variáveis manipuladas são campos geográficos (Berry, 1993).

O termo álgebra de mapas foi popularizado pelo livro *Geographic Information System and Cartographic Modeling* (Tomlin, 1990). Este autor apresentou os mapas como elementos que associam um valor quantitativo (escalar, ordinal, cardinal ou intervalar) ou qualitativo (nominal) para cada local de uma área de estudo; e defendeu a realização de operações matemáticas entre esses elementos de acordo com a vontade e bom-senso do modelador.

Geo-campos são definidos como elementos que associam a cada local, um valor quantitativo ou qualitativo. As operações sobre geo-campos podem ser classificadas como: pontuais, zonais e de vizinhança (Tomlin, 1990).

Os *geo-campos origem* podem ser definidos como as variáveis do tipo campo, usadas nas operações. O *geo-campo resultante* da operação é denominado de geo-campo destino.

A Figura 3 ilustra a classificação das possíveis operações entre geo-campos, que é baseada na forma como os valores dos atributos nos geo-campos origem são obtidos para

processamento, sendo identificado se o valor atribuído a uma determinada posição geográfica do geo-campo destino é função:

- dos valores na mesma posição geográfica nos geo-campos origem;
- dos valores de uma região geográfica nos geo-campos origem ou;
- dos valores de uma vizinhança da posição nos geo-campos origem.

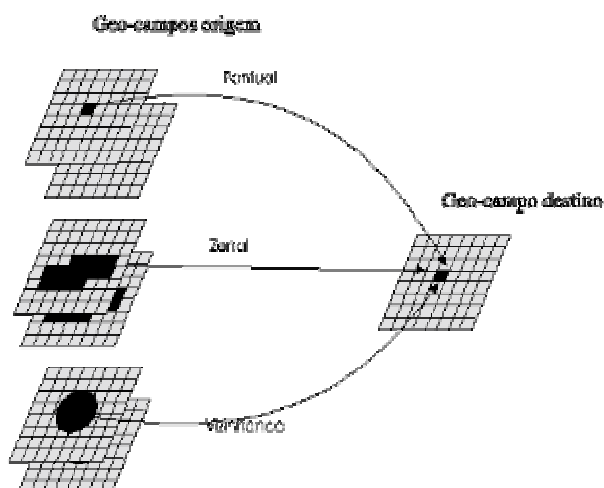


FIGURA 2 - Classes de operações geográficas

### Operações de vizinhança

Em muitos processos naturais, o valor do fenômeno observado em uma determinada posição é influenciado pelas condições de sua vizinhança. Normalmente, conceitua-se vizinhança como aquela área circular próxima a uma determinada posição. Mas para propósito de análise ambiental, vizinhança deve ser definida como uma área adjacente a uma determinada localização geográfica, cujas condições, afetam o processo em estudo naquela posição (Barbosa, 1997).

### Operações zonais

Uma região é um conjunto de posições geográficas com características similares ou delimitadas pelo homem. Por exemplo, num mapa de solos, cada tipo de solo delimita uma região. No processamento por região, o valor de cada posição geográfica do geo-campo destino depende do valor do atributo em todas as posições geográficas que compõem a região no geo-campo origem.

As operações de transformações zonais ou por região operam sobre um geo-campo origem e um conjunto de regiões delimitadas por polígonos na forma matricial ou vetorial. Diferente das transformações de vizinhança, onde cada posição geográfica possui sua própria vizinhança, representada por uma máscara que se desloca sobre os dados, nas transformações zonais as regiões são estáticas, ou seja, não se deslocam sobre a região geográfica de estudo.

### Operações pontuais

Nas transformações pontuais, o valor resultante em cada posição geográfica do geo-campo destino depende somente dos valores na mesma posição geográfica dos geo-campos origem.

Dentre os tipos de operações possíveis estão a soma, subtração, divisão, multiplicação, média e também combinação booleana, fatiamento, reclassificação, ponderação.

A operação de ponderação consiste em obter um campo numérico a partir de um campo temático, de tal modo que cada local de uma área de estudo fique associada a um valor, indicando o peso de cada classe temática diante de uma operação quantitativa que se deseje modelar.

Nesse trabalho será realizada a ponderação entre os dados dos mapas disponíveis, e posteriormente, a soma entre os pesos adotados para cada uma das características de cada mapa.

## 2.6 SIG E EROSÃO

Os SIGs são sistemas computacionais que manipulam dados geográficos e permitem a conversão de dados em informações a partir de manipulações e consultas interativas sobre os dados armazenados.

Segundo Câmara Neto (1995) há pelo menos três grandes maneiras de utilizar um SIG:

1. *como tecnologia de gerenciamento de uma base de dados geográficos:*

Os SIGs possuem ferramentas que permitem a integração, em uma única base, de informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo, cadastro urbano e rural, imagens de satélite.

## *2. como suporte para análise espacial de fenômenos:*

No estudo de sistemas ambientais, a interação entre processos deve ser considerada. Os SIGs oferecem mecanismos para manipular simultaneamente vários dados. Estes mecanismos vão desde a consulta, a recuperação e a visualização, até a combinação das variáveis para análise. O processo de análise dos dados é, geralmente, aquele no qual as relações e significados que estão implícitos em um conjunto de dados são extraídos e mostrados de forma explícita.

## *3. como ferramenta para produção cartográfica:*

Por possuir facilidades de edição, visualização, acesso rápido, registro geográfico dos dados, os SIGs estão se tornando uma ferramenta de trabalho nos órgãos responsáveis por produção cartográfica.

Normalmente, utilizam-se formalismos matemáticos bem definidos para expressar o desenvolvimento de um modelo e com isto provar a sua validade. No entanto, no caso de dados geográficos não existe ainda uma maneira formal de expressar as transformações e manipulações necessárias na etapa de análise dos dados geográficos.

A utilização do SIG para tratamento de dados sobre erosão tem sido mais usualmente aplicada, propondo análises quantitativas ou qualitativas de dados disponíveis. SIGs têm sido utilizados para estimar a erosão espacial devido à facilidade de manipular e analisar dados espaciais e também por possibilitarem aos usuários identificar as áreas mais favoráveis à erosão (Lim et al., 2005).

Entre os procedimentos de quantificar a erosão, a Equação Universal de Perdas do Solo (EUPS), e suas variantes mais atuais, tem sido amplamente utilizada em regiões, nas quais predominam erosão laminar e ravinas e onde o processo de formação e de desenvolvimento de voçorocas seja secundário (Lal, 1994).

As facilidades oferecidas pelo SIG permitem comparar características lhes oferecendo pesos, bem como tratar os dados existentes de maneira quantitativa, somando-os, multiplicando-os e aplicando às equações propostas por diferentes modelos matemáticos e obtendo quantificações reais. Como exemplo deste tipo de aplicação de modelos

quantitativos, temos a estimativa da perda de solo por erosão laminar desenvolvida por diversos autores.

Este trabalho propõe um estudo qualitativo dos dados embora baseie no modelo matemático da Equação Universal de Perda de Solos. A limitação na representação de todos os fatores da equação limita o trabalho em termos quantitativos direcionando-o para um caráter qualitativo, também importante para planejamento do uso do solo e adoção de medidas de prevenção e controle de áreas de risco.

Diferentes SIGs como o ArcGIS (comercial) e o SPRING (domínio público) têm sido utilizados para gerar mapas de vulnerabilidade, ligados aos processos erosivos utilizando como elemento de referência os parâmetros da EUPS (Simoes et al., 2007; Farinasso et al., 2006; e Macedo et al., 2000).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 ÁREA DE ESTUDO

###### 3.1.1.1 Localização

A região de estudo desse trabalho compreende a área da fazenda Santa Edwirges, para qual a será analisado o potencial de erosão, com base em mapas já existentes da fazenda.

A fazenda, pertence à Fibria Celulose e Papel e é utilizada para plantio de eucalipto, com uma área de 22 km<sup>2</sup> e situa-se entre as latitudes 485.535,56 UTM e 497.741,72 UTM e entre as longitudes 7.480.000.00 UTM e 7.466.000.00 UTM, na região leste do Estado de São Paulo, no Vale do Paraíba, município de Lorena, conforme se observa na figura 3.

A área encontra-se próxima ao divisor de águas da Serra Quebra Cangalha, onde estão localizadas as nascentes do ribeirão Taboão com predominância de morros de elevadas declividades.

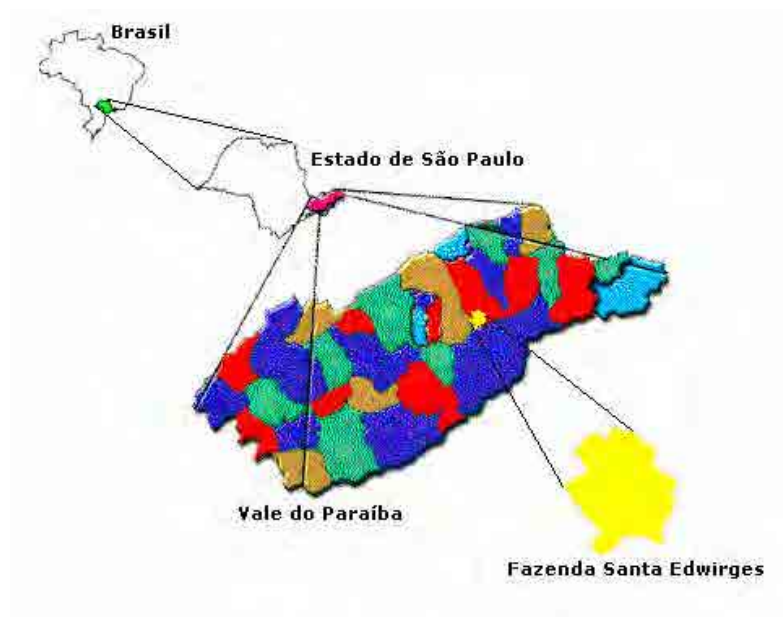


FIGURA 3 – Localização da área de estudo :Fazenda Santa Edwirges, município de Lorena(SP), (Santos, 2006)

Para criar o mapa de potencial de erosão é preciso conhecer as características da área que influem no processo erosivo. Portanto, é interessante conhecer informações sobre a geologia, geomorfologia, pedologia, uso do solo, clima da região, entre outros parâmetros para que ocorra um trabalho mais aprofundado.

#### 3.1.1.2 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

A fazenda Santa Edwirges encontra-se em um contexto geológico complexo, formado por rochas cristalinas de idade pré-cambriana (>500 milhões de anos).

Rodrigues e Milanesi (2005) elaboraram um mapa lito-estrutural (escala 1:10.000) apresentado na figura 4, no qual é possível identificar as diferentes unidades geológicas encontradas na região.

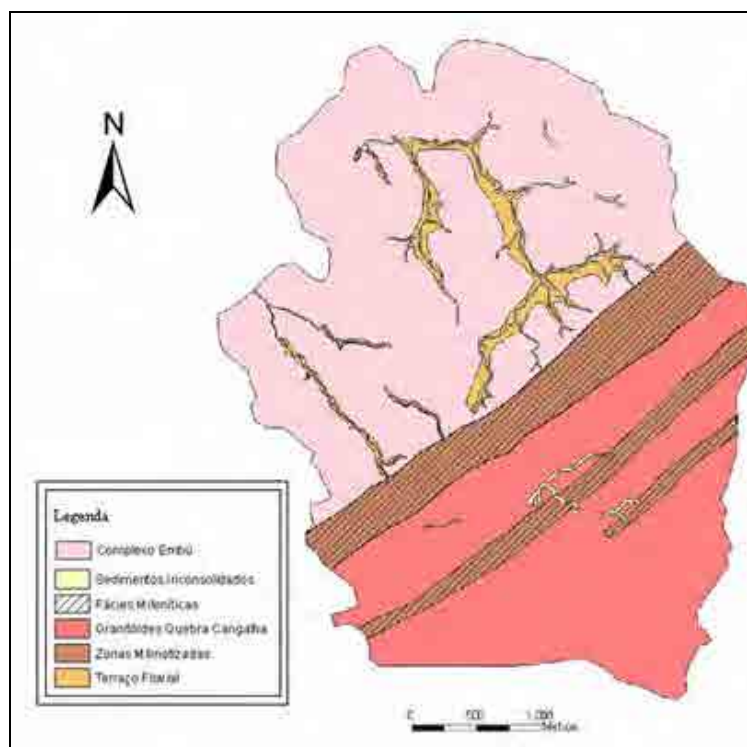


FIGURA 4 - Mapa geológico da Fazenda Santa Edwirges (Rodrigues & Milanesi, 2005)

- **Complexo Embu - rochas metamórfica:**

Essa formação corresponde a cerca de 60% da área de estudo, localizada na porção centro-norte do mapa sendo composta principalmente por rochas metamórficas (xistos,

gnaisse e migmatitos) formadas, em sua maior parte, por materiais facilmente alteráveis como micas e feldspatos.

O solo proveniente da alteração destas rochas é normalmente fino, predominando minerais argilosos que favorecem o desenvolvimento de solos mais impermeáveis e mais homogêneos e, portanto, menos suscetíveis a processos erosivos acelerados.

O contato desta unidade com a unidade Granitóide Quebra-Cangalha é transicional por meio da zona de cisalhamento NE (Lima, 2005).

- **Complexo Quebra-Cangalha - rochas ígneas:**

Composto predominantemente por rochas graníticas leucocráticas (claras), essa unidade corresponde a 35% da área da fazenda na porção sul do mapa geológico. Esta unidade corresponde às maiores elevações topográficas que estão presentes na região.

Estas rochas deram origem a solos de coloração esbranquiçada, de constituição areno-argilosa e com a presença significativa de frações minerais mais grosseiras. A textura grossa destes solos e a ausência parcial de uma cobertura vegetal fornecem as condições favoráveis à ocorrência de processos erosivos.

- **Zonas milonitizadas:**

Correspondem às faixas de alta deformação, ou zonas de cisalhamento, representando em torno de 10% da área de estudo. Estas regiões 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. A alteração destas rochas produz solos com elevada proporção de argila.

- **Terraços fluviais e Sedimentos inconsolidados:**

São compostos de silte e argila e localizados no leito do curso dos rios; e ocupam 5% do mapa geológico representando a 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. No aspecto geotécnico constituem-se solos de baixa resistência, saturados em água e propícios à inundação.

### 3.1.1.3 GEOMORFOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

Ainda que seja uma área relativamente pequena, devido à grande diversidade geológica, a Fazenda Santa Edwiges apresenta uma variação geomorfológica significativa, podendo-se identificar relevos de escarpas associados às rochas ígneas, morros e morrotes associados ao Complexo Embu e Colinas Alveolares, associadas a pequenas bacias sedimentares de pequena proporção.

Regionalmente, a área está inserida na unidade geomorfológica do Planalto do Médio Vale do Paraíba (PONÇANO *et al.*, 1981). Segundo os estudos realizados por Lima (2005), foi possível identificar três principais unidades de relevo na região da Fazenda Santa Edwiges, as quais podem ser visualizadas a partir do MDT (Modelo Digital de Terreno) (figura 5).

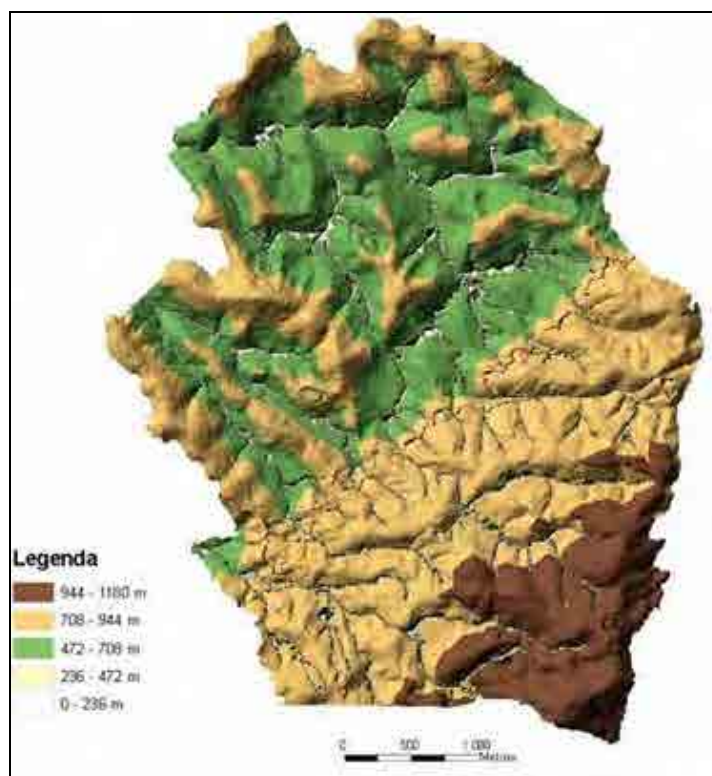


FIGURA 5 - Modelo Digital de Terreno, demonstrando as três formas de relevo existentes na Fazenda Santa Edwiges: Escarpas Alongadas (marrom), Morros e Morrotes Arredondados (bege) e Colinas Alveolares (verde) Lima (2005).

**Escarpas Alongadas :** Representa o terço superior da fazenda, com maior concentração de curvas de níveis, declividades mais altas (>30%) e grandes amplitudes (>300m). Caracteriza-se por topos estreitos e alongados, afloramentos esporádicos de blocos de rochas e vales estreitos e encaixados. O substrato destas rochas é formado principalmente pelas rochas graníticas da Unidade Quebra-Cangalha. Os solos possuem composição areno-argilosos.

**Morros e Morrotes Arredondados :** Com declividades dominantes entre 20 e 30%, amplitudes variando entre 100 e 300m e topos arredondados, esse tipo de relevo ocupa a parte centro-norte da área estudada. Neste relevo se observa uma menor intensidade dos processos de dissecação que no relevo de Escarpas Degradadas. Formado por rochas gnáissicas e migmatíticas, os solos associados são normalmente argilosos, espessos e de coloração avermelhada.

**Colinas Alveolares :** Ocupam a faixa de direção sudoeste/nordeste na região central da bacia. São a transição entre os relevos de escarpas e os de morros e morrotes sendo formadas por áreas de dissipação com sedimentos consolidados. Apresentam declividades baixas (<15%) e as áreas de relevo plano (planícies aluvionares) com amplitudes menores que 100m. Depósitos de sedimentos recentes (Terciários/Quaternários) correspondentes à unidade geológica Terraço Fluvial podem ser encontrados, sendo eles de grande influência na dinâmica hidrológica da bacia por possuírem o nível freático próximo da superfície e serem um local apropriado para a formação de bacias de retenção.

#### 3.1.1.4 PEDOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

A pedologia da região foi levantada em um estudo realizado pela própria Fíbria, proprietária da Fazenda Santa Edwirges. Diferentemente do Mapa Geológico, detalhado em escala 1:10.000, o Mapa Pedológico representa uma re-leitura do Mapa Geológico Regional em escala 1:500.000 (Figura 6). Devido a sua escala este mapa que o torna pouco representativo para área de estudo e não é será utilizado nesse trabalho, sem apresentado somente para caráter explicativo.

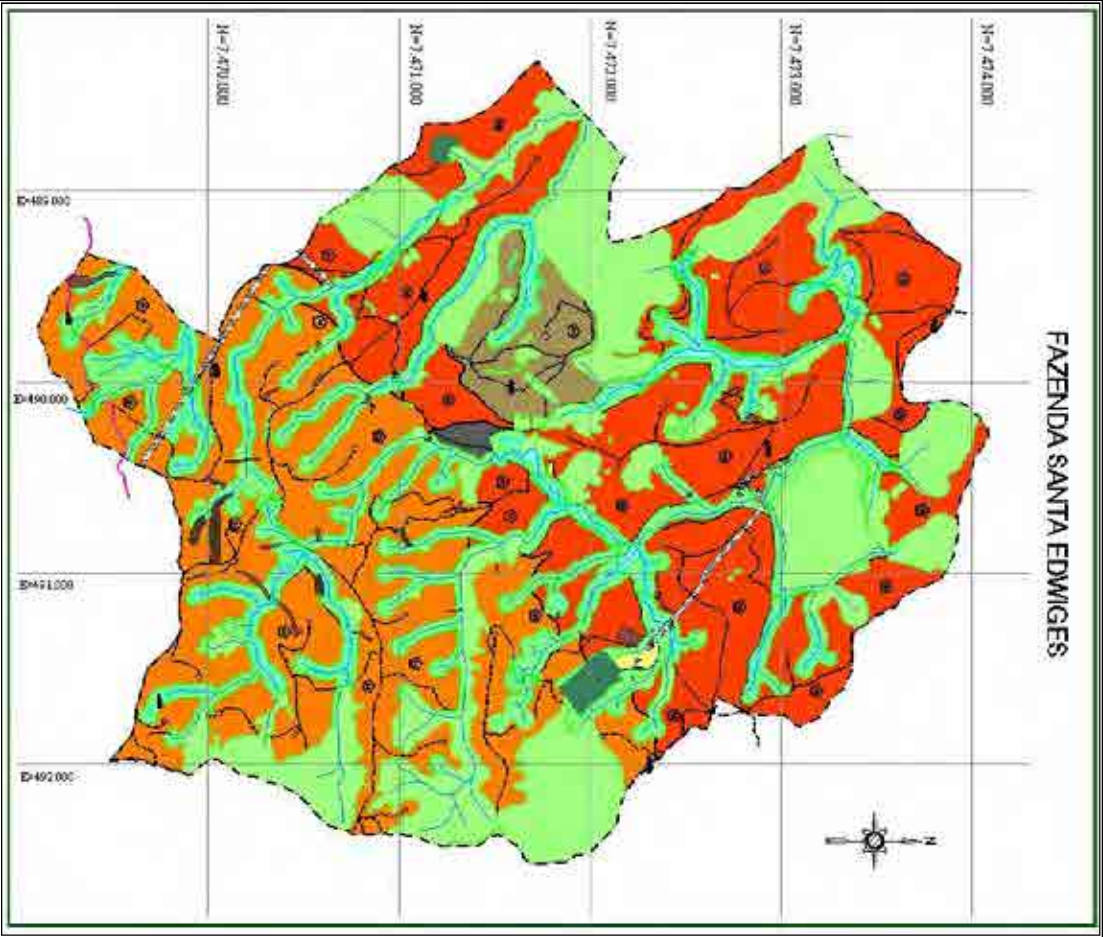


FIGURA 6 – Mapa Pedológico da Fazenda Santa Edwiges- FONTE: Fibria Papel e Celulose

|                                           |                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SÍMBOLO DA UNIDADE DE MAPEAMENTO SAMPLES  | UNIDADES DE MAPEAMENTO COMPOSTA (Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - EMBRAPA - SOLOS a partir de julho de 1999)                                                                           |
|                                           | CAMBISÓLO HAPLIC TO (Quarta figura A, notação: dlt, notação: argila)                                                                                                                                           |
|                                           | MECISÓLO FAULTO + CLIMACILO                                                                                                                                                                                    |
| SÍMBOLO DA UNIDADE DE MAPEAMENTO COMPOSTA | UNIDADES DE MAPEAMENTO COMPOSTA (Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - EMBRAPA - SOLOS a partir de julho de 1999)                                                                           |
| ASSOCIAÇÃO 1                              | LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO A moderado a extremamente, Arg, textura argila (a mais argila) (argila > 35 %)<br>+<br>CAMBISÓLO HAPLIC TO Cambisil moderado A, notação no primeiro, dlt, notação: argila        |
| ASSOCIAÇÃO 2                              | ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO tipo A, notação no primeiro, notação: notação: dlt, notação: argila<br>+<br>CAMBISÓLO HAPLIC TO Cambisil tipo A, notação no primeiro, dlt, notação: argila na 2ª notação: argila |

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

|  |                          |  |                        |
|--|--------------------------|--|------------------------|
|  | ESTRADA MUNICIPAL        |  | PRESERVAÇÃO PERMANENTE |
|  | DIVISA DA FAZENDA        |  | RESERVA LEGAL          |
|  | ÁREA DA SEDE CONSTRUÇÕES |  | NATIVA                 |
|  | NÚMERO DO TALHÃO         |  | EROSÃO                 |
|  | RIOS, CORREGOS           |  | EUCALÍPTO VELHO        |
|  | LAGOAS, REPRESAS         |  | PEDRA                  |

No mapa da figura 6, é possível observar que dois tipos de unidades compostas se destacam, a associação 1 e a associação 2, ocupando juntas cerca de 90% da área da fazenda.

### **Argissolos**

Os argissolos são solos que apresentam horizonte B textural, ou seja, muito heterogêneo com subhorizontes facilmente delimitáveis e estrutura em forma de blocos ou prismática. Esses solos são formados por material mineral com argila de baixa atividade.

Estes solos possuem textura média a argilosa, com baixo grau de floclulação nos horizontes mais superficiais. Em geral, são moderadamente a bem drenados.

Os argissolos são muito profundos, pois não apresentam qualquer impedimento físico à penetração do sistema radicular. O horizonte A possui espessura considerável e textura arenosa, enquanto o horizonte B apresenta de baixa a média permeabilidade, baixa compressividade e moderada resistência ao desmoronamento.

A mudança abrupta da textura entre os horizontes gera má aeração durante o período chuvoso uma vez que no topo do horizonte B textural há uma menor condutividade hidráulica, isso torna esse tipo de solo suscetível a saturação. E é também essa relação textural entre os horizontes que torna esse solo mais vulnerável à erosão, pois a erodibilidade é maior em solos com mudança textural brusca.

Tais solos ocorrem comumente em relevos movimentados de serras ou relevos aplainados com vertentes mais declivosas. Essas características tornam esses solos impróprios para desenvolvimento de atividade agrícola e pastoril.

No caso da subordem argissolo vermelho, registrado na área de estudo, a cor avermelhada deve-se 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.

### **Latossolos**

Os latossolos caracterizam-se por apresentar a seqüência de horizontes A-B-C com pouca diferença textural entre os horizontes A e B. O horizonte B latossólico bem definido encontra-se imediatamente após o A de espessura geotecnicaamente desprezível. Sendo que a textura do horizonte B é predominantemente.

O horizonte B desse tipo de solo, conhecido como solo maduro, é bastante espesso, poroso e homogêneo com estrutura do tipo granular, microagregada ou maciça-porosa, e pode apresentar certa quantidade de argila com alto grau de floclulação. O horizonte C ou

solo residual é normalmente bem espesso devido a dificuldade de intemperismo dos minerais primários que dão origem ao solo.

Os perfis são muito porosos (50 - 60%), permeáveis e muito friáveis, quando úmidos e bem a fortemente drenados. São, normalmente, bastante resistentes à erosão, em decorrência da baixa mobilidade da fração argila, do alto grau de flocculação e da grande permeabilidade e porosidade e drenagem interna mesmo na textura argilosa.

Como são caracterizados por terem elevada permeabilidade interna e à baixa capacidade adsorptiva, esses solos se qualificam como pouco filtrantes. Tal atributo permite esperar que, apesar de sua espessura, sejam grandes as possibilidades de contaminação dos aquíferos por material tóxico neles depositados.

### **Cambissolos**

Os Cambissolos caracterizam-se pela presença do horizonte câmbico incipiente Bi, constituído de fragmentos de rocha com teores de 4% ou mais de minerais primários facilmente intemperizáveis, pelo menos na areia fina, logicamente dependendo do tipo de rocha.

Por definição, os cambissolos são constituídos por material mineral, que apresentam horizonte A ou hístico com espessura menor que 40 cm, seguido de horizonte B incipiente.

Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd), encontrado na área de estudo, compreende solos medianamente profundos com algumas características morfológicas semelhantes às dos Latossolos. Correspondem a solos bem drenados, com elevados teores de alumínio trocável. Ocorre caulinita e gibbsita, o que indica nos Cambissolos distróficos uma dessilicação intensa, com tendência para a alitização. O material originário é proveniente do intemperismo de migmatitos e gnaisses.

Quando encontrados em terrenos acidentados como, em geral, o da Fazenda Santa Edwiges, apresentam sérias restrições quanto ao uso agrícola; e os localizados em terrenos escarpados ainda apresentam limitações mesmo ao uso pastoril e florestal devido à sua elevada capacidade de degradação.

De uma maneira geral, os cambissolos apresentam boas propriedades físicas tais como boa permeabilidade interna, facilidade de preparo do terreno para plantio. A profundidade efetiva é satisfatória mesmo nos solos que apresentam o horizonte Cr pouco profundo o que não oferece resistência física ao enraizamento das plantas.

### **Gleissolos e Neossolos**

Os gleissolos são solos hidromórficos, esses solos ocupam terrenos baixos em cabeceira de drenagens. Eles se desenvolvem próximos à zona de saturada e, portanto em condições de umidade onde o lençol freático está bem próximo à superfície.

Esse solo caracteriza-se pela presença do horizonte *glei* de coloração cinza, conferida a ele pelo ferro na forma reduzida, e com manchas de intensidade variada. Correspondem a solos com baixa drenabilidade uma vez que se encontram perto da zona saturada, dessa forma são inundáveis em períodos chuvosos e impróprios como material de aterro, já que possuem inexpressiva zona de aeração.

Os neossolos flúvicos, subordem dos neossolos, 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.

Em média, porém, pode-se dizer que predominam os solos profundos, sendo o fator limitante a presença do lençol freático, o qual, contudo, está sempre mais profundo do que nos gleissolos com os quais os neossolos se associam na paisagem, fato este constatado pelo levantamento feito.

Mesmo os identificados como de textura argilosa, média ou arenosa, os neossolos apresentam estratos, sendo os de textura arenosa e de textura média aqueles que oferecem, em geral, boa permeabilidade. Por tal fator e também a presença do lençol freático relativamente pouco profundo, os neossolos flúvicos, bem como os gleissolos, apresentam limitações moderadas a severas como áreas para depósito de efluentes e tampouco indicados para aterro sanitário.

#### **3.1.1.5 USO DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDO**

No trabalho de Santos (2006) um dos aspectos analisados foi o uso do solo da região e, para tanto, foi realizado um levantamento de campo, gerando como resultado o mapa da figura 7.

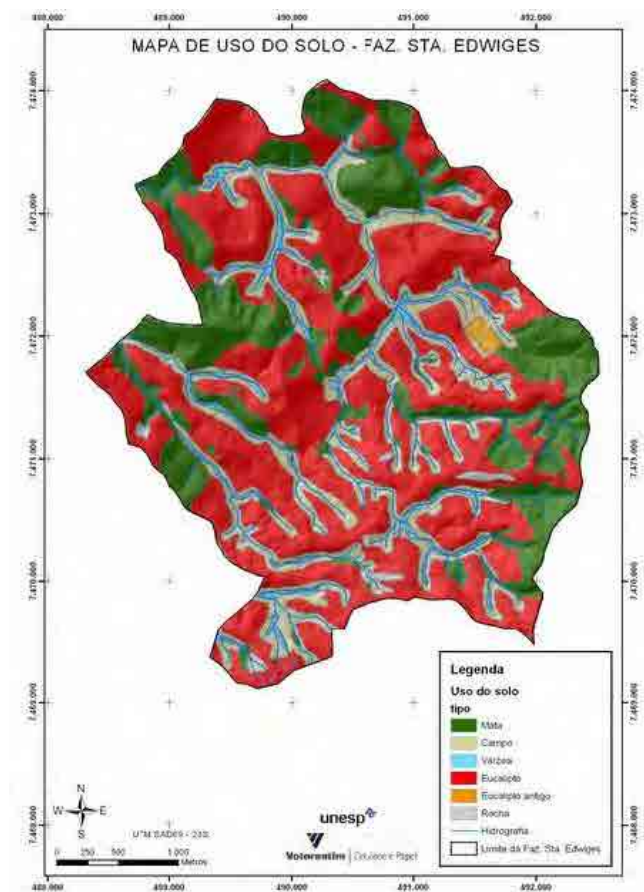


FIGURA 7 – Mapa de Uso de Solo da Fazenda Santa Edwiges no Município de Lorena, SP (SANTOS, 2006).

As classes de uso do solo definidas para a área de estudo são: mata (verde), campo (bege), várzea (azul), eucalipto (vermelho), eucalipto antigo (laranja) e rocha exposta (cinza).

Por se tratar de uma fazenda de plantação de eucalipto a maior área é utilizada para esse fim. As regiões de mata nativa e várzea apresentam menor potencial de erosão devido à proteção que o uso do solo lhes oferece.

#### 3.1.1.6 CLIMA DA ÁREA DE ESTUDO

Trabalhos realizados anteriormente na área de estudo revelaram algumas características do clima da região. Estudos realizados por Silva (1999) e citado por Santos (2006) apresentaram características da dinâmica atmosférica local e a distribuição das chuvas da região “oriental” aparecem três diferentes unidades pluviométricas que coincidem justamente com as unidades geomorfológicas: Serra da Mantiqueira, Vale do Paraíba e Litoral Norte.

O estudo revela que a pluviosidade anual média da região é de 1300mm, apresentando uma classificação climatológica que varia de úmida (60% da área) a muito úmida (35% da área).

A figura 8 apresenta um histórico de 30 anos de precipitação na região. O gráfico apresenta os valores das médias mensais e nele é possível observar que a curva atinge valores altos durante o verão e valores próximos de zero no período mais seco do inverno.

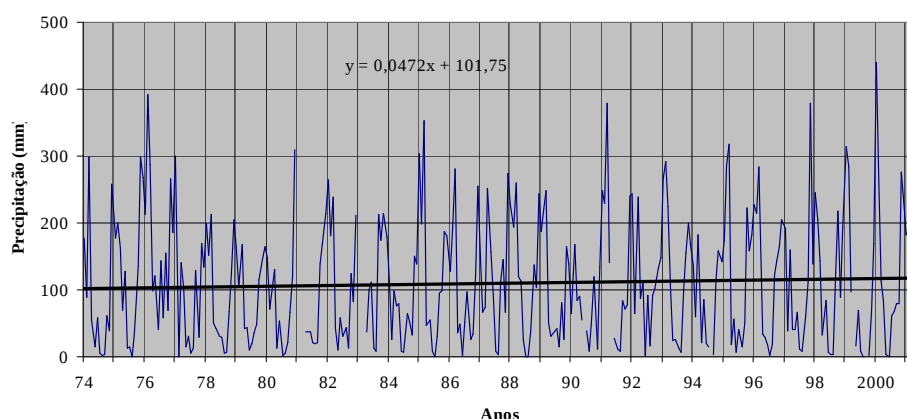


FIGURA 8 - Precipitação na Fazenda Santa Edwirges em Lorena (SP) –(SILVA, 1999).

### 3.1.2 BANCO DE DADOS

Para a aplicação da álgebra de mapas são necessários essencialmente diferentes mapas para a região de estudo. Portanto, foi criado um banco de dados dos mapas já existentes da Fazenda Santa Edwirges e separados aqueles cujas características eram interessantes para o estudo de potencial de erosão.

Diversos outros trabalhos já foram realizados no Laboratório de Análise Geo-Espacial (LAGE) da FEG-UNESP, sobre a área de estudo. Como resultado, muitos mapas foram digitalizados, espacializados ou criados. Entre esses mapas, o Mapa Geológico (Milanezi & Rodrigues, 2005), o Mapa de Uso do Solo (Santos, 2006) e o Mapa de Declividade (Lima, 2005), todos em escala 1:10.000 foram utilizados neste estudo.

A seleção destes mapas baseou-se no princípio de que são mapas já disponíveis no banco de dados existente e por representarem as variações dos parâmetros da EUPS.

Para representação do fator erodibilidade do solo da EUPS o mapa pedológico apresentado no item 3.1 deste trabalho não foi utilizado. Tal mapa, fornecido pela Fibria Papel e Celulose, encontra-se em escala 1:500.000 não sendo provavelmente representativo para área de estudo que possui uma área de 22km<sup>2</sup>. Haveria a necessidade de um maior

detalhamento das classes de solo para que o mapa pedológico pudesse ser utilizado na metodologia proposta.

Portanto, a fim de representar essa característica na equação, foi gerado um mapa de formações superficiais da fazenda a partir de uma releitura do mapa geológico, das características conferidas pelas rochas ao solo e pela situação conhecida de campo.

Para a segunda fase deste trabalho foram utilizados os mapas produzidos por Santos (2006), elaborados a partir de procedimentos geotécnicos e geoespaciais para comparação com os mapas resultantes deste estudo.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 CRIAÇÃO DE UM MAPA DE FORMAÇÕES SUPERFICIAIS

O mapa de formações superficiais foi criado a partir de uma releitura do mapa geológico já existente para a fazenda Santa Edwirges elaborado por Milanezi e Rodrigues (2005).

Como a maior parte da área da fazenda é composta por solos residuais, com exceção das planícies aluvionares, as características de cada uma das formações foram definidas baseadas nas em suas unidades geológicas de origem e nas observações feitas em campo.

### 3.2.2 CRIAÇÃO DE UM MAPA DE POTENCIAL DE EROSÃO

A erosão dos solos varia temporal e espacialmente, e essa variabilidade deve-se ao fato das diferenças nas condições da superfície do solo ao longo da bacia, que afetam diretamente o escoamento superficial.

A criação de um mapa de potencial de erosão proposto nesse trabalho basea-se na Equação Universal da Perda de Solos (EUPS) e no potencial natural à erosão laminar (PNE). Dessa forma, os diferentes fatores que influenciam o processo erosivo laminar puderam ser representados pelas equações 1 e 2 já apresentadas no capítulo 2 deste estudo.

Buscou-se no banco de dados disponível para a área de estudo mapas que pudessem representar espacialmente essas características para uma análise qualitativa. Para que a partir do cruzamento dos mapas, no ambiente SIG, fosse possível gerar um mapa o potencial de erosão.

Os mapas que avaliam o potencial de erosão laminar costumam considerar quatro fatores: erosividade, erodibilidade, fator topográfico e uso do solo. Para este estudo cada um desses fatores foi representado por mapas da maneira que segue:

### **Erodibilidade**

Como já discutido o mapa pedológico existente para área de estudo é pouco detalhado, apresentando uma escala de 1:500.000 e, portanto, não sendo representativo para a manipulação proposta.

Por esse motivo, para a representação da influência das características do solo no processo erosivo foi elaborado um mapa de formações superficiais baseado no mapa geológico existente da fazenda.

As diferentes formações geológicas conferem características muito peculiares a cada área, e por se tratar de uma região de solos predominantemente residuais essas características influenciam diretamente o tipo de solo, a composição química, a permeabilidade e sua textura, fatores que determinam a suscetibilidade do solo à erosão.

Dessa maneira, a erodibilidade do solo foi analisada a partir do mapa de formações superficiais baseado em uma releitura mapa geológico da fazenda.

### **Fator topográfico**

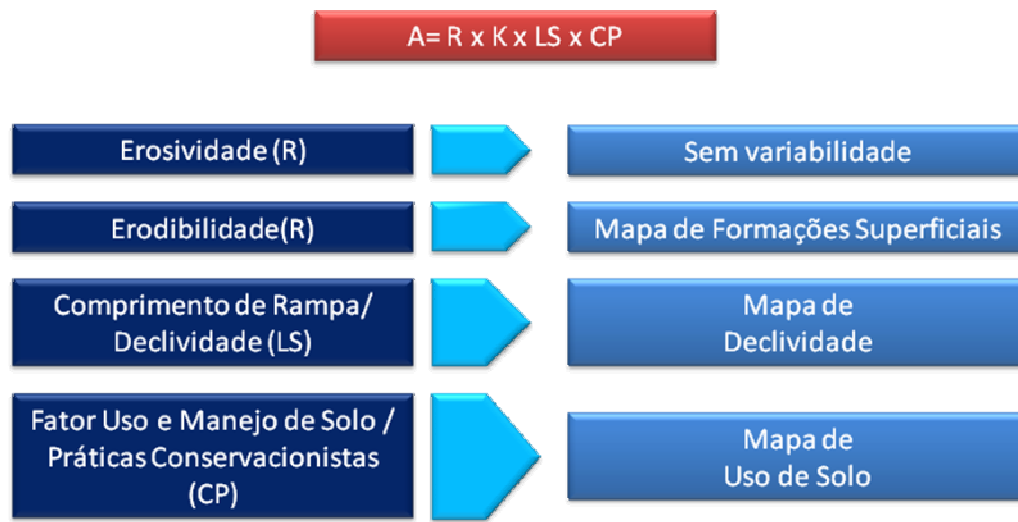
O fator topográfico pode ser representado pelo mapa de declividade da fazenda.

### **Erosividade**

Como o objetivo deste estudo é avaliar os processos erosivos espacialmente, o parâmetro *erosividade* não foi considerado por se tratar de uma área pequena (em torno de 22km<sup>2</sup>) e não existir dados adequados que possibilitem avaliar a variabilidade espacial.

### **Fator Uso e Manejo do Solo**

O mapa de uso do solo equivalente ao fator CP da equação, foi utilizado na sua representação.



Como citado por Salomão (1999):

*“... para a definição de classes de capacidade de uso de terras, para utilização no planejamento de práticas de conservação do solo, tendo em vista o controle da erosão,... consideram-se a erodibilidade dos solos e a declividade das encostas como fatores determinantes na definição das classes de susceptibilidade. Os fatores erosividade e comprimento das encostas devem ser utilizados em complementação à avaliação final das classes de susceptibilidade.”*

Segundo a metodologia proposta por Salomão (1999) os dados de declividade e erodibilidade devem ser integrados, originando um mapa de susceptibilidade à erosão laminar, refletindo as características intrínsecas dos terrenos em face do desenvolvimento dos processos erosivos. Porém devido à forte influência da ocupação e das formas de uso do solo sobre a erosão, os dados obtidos devem ser posteriormente integrados a esse tipo de informações originando um mapa de potencial de erosão laminar. Na figura 9 é possível observar as etapas da metodologia aplicada a esse estudo.

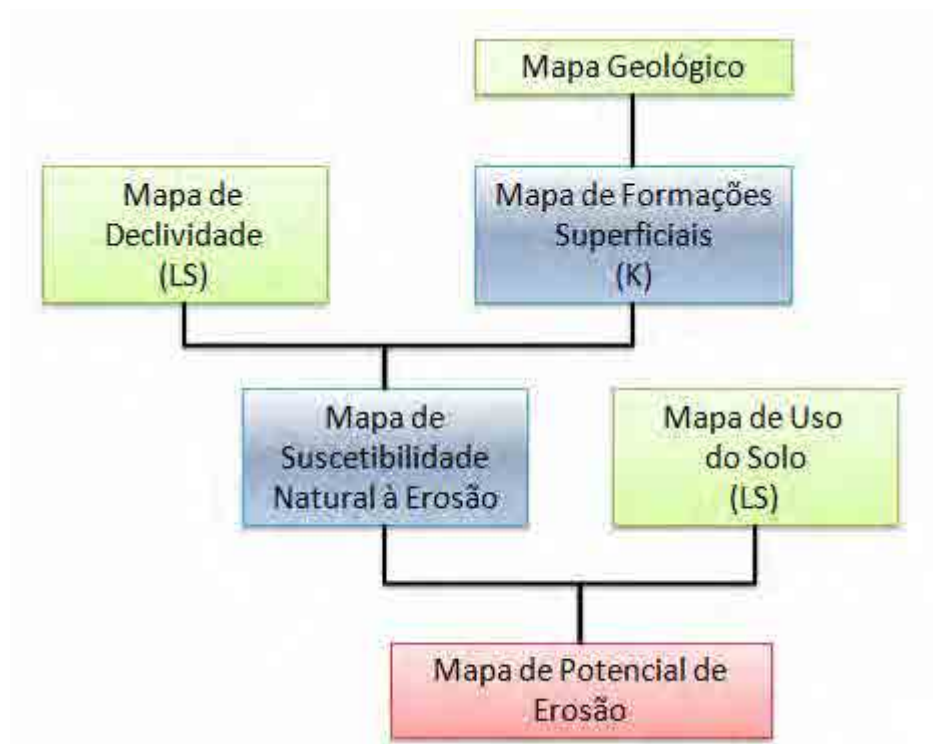
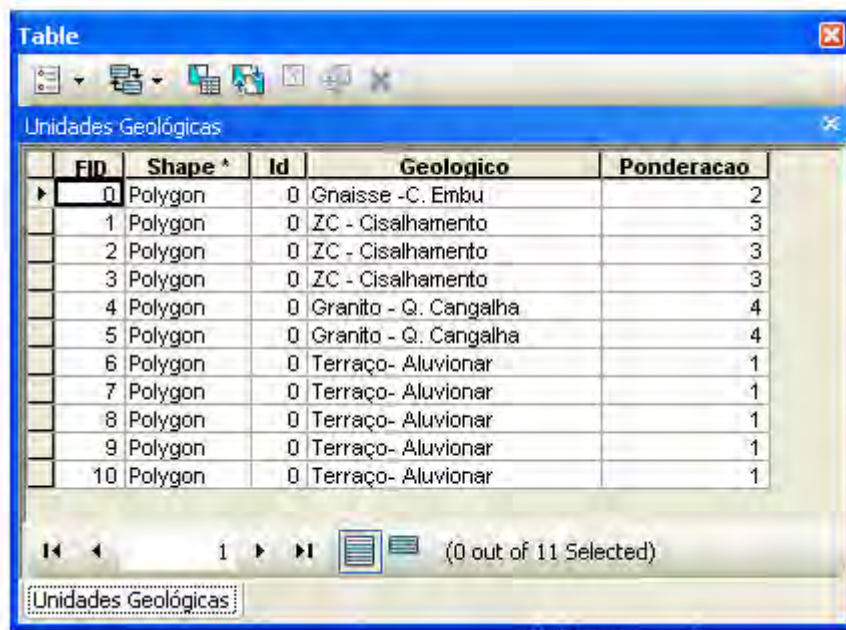


FIGURA 9 – Esquema ilustrativo da metodologia aplicada à criação do Mapa de Potencial de Erosão da Fazenda Santa Edwirges em Lorena (SP).

#### 3.2.2.1 ÁLGEBRA DE MAPAS

A manipulação dos dados conforme a metodologia definida, deve ser realizada no ambiente SIG do ArcGIS. Para tanto é preciso ter disponível todos os mapas espacializados em mesma escala e projeção, com os atributos referentes às suas informações.

Tendo em mãos esses mapas, na manipulação no software ArcGIS é necessária a criação de uma coluna extra para adicionar a ponderação definida para cada um dos atributos de cada mapa como exemplifica a figura 10.



| FID | Shape * | Id | Geologico             | Ponderacao |
|-----|---------|----|-----------------------|------------|
| 0   | Polygon | 0  | Gnaiss - C. Embu      | 2          |
| 1   | Polygon | 0  | ZC - Cisalhamento     | 3          |
| 2   | Polygon | 0  | ZC - Cisalhamento     | 3          |
| 3   | Polygon | 0  | ZC - Cisalhamento     | 3          |
| 4   | Polygon | 0  | Granito - Q. Cangalha | 4          |
| 5   | Polygon | 0  | Granito - Q. Cangalha | 4          |
| 6   | Polygon | 0  | Terraço- Aluvionar    | 1          |
| 7   | Polygon | 0  | Terraço- Aluvionar    | 1          |
| 8   | Polygon | 0  | Terraço- Aluvionar    | 1          |
| 9   | Polygon | 0  | Terraço- Aluvionar    | 1          |
| 10  | Polygon | 0  | Terraço- Aluvionar    | 1          |

FIGURA 10 – Tabela de Atributos – Ponderação : Mapa Geológico

Para que seja possível somar mapas é preciso que eles estejam em formato matricial (ou raster). Portanto, todos os mapas foram convertidos para esse formato, baseados no atributo de ponderação criado.

Os mapas obtidos podem então ser somados utilizando a ferramenta *Raster Calculator* sem fornecer peso para os mapas nessa soma.

### 3.2.3 COMPARAÇÃO ENTRE MAPAS GERADOS E JÁ EXISTENTES

Na comparação e busca de relações entre os mapas de potencial de erosão gerados nesse trabalho e aqueles produzidos por Santos (2006) foi realizada a sobreposição dos mapas para uma análise espacial meramente visual.

A busca de correlação entre os resultados obtidos se deu na intenção de validar as metodologias aplicadas certificando-se, que elas se aproximam da situação real de campo.

### 3.3 SOFTWARES UTILIZADOS

Como ferramenta para análise gráfica e estatística foi utilizado o programa ARCGIS<sup>®</sup>, versão 9.2 e suas extensões ArcMap, ArcView e ArcToolbox.

Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) como ArcGIS permitem captar, modelar, manipular, recuperar, consultar, analisar e apresentar soluções com dados geograficamente referenciados, dados estes que estão armazenados em um banco de dados. As facilidades e possibilidades oferecidas por esse software foram exploradas e aplicadas conforme necessidade e conveniência ao longo desse trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 MAPA DE FORMAÇÕES SUPERFICIAIS

A criação do mapa de formações superficiais baseou-se na releitura no mapa geológico conforme discutido na metodologia proposta. Para tanto foi elaborada uma tabela identificando todas as informações disponíveis para cada uma das porções da fazenda afim que essas características pudessem definir a formação superficial identificada. A tabela 1 apresenta essas informações.

TABELA 1 – Relação entre Unidades Geológicas e Formações Superficiais

| UNIDADE GEOLÓGICA               | CARACTERÍSTICAS CONFERIDAS AO SOLO    |                                  |                                                         |                          | FORMAÇÃO SUPERFICIAL                   |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|
|                                 | ROCHAS ORIGINÁRIAS                    | MINERALOGIA                      | TEXTURA                                                 | MAPA PEDOLÓGICO          |                                        |
| <b>Complexo Embu</b>            | Metamórficas                          | Gnaisses, xistos e migmatitos    | Predomínio de solos finos e homogêneos                  | Latossolos e Cambissolos | Residual argiloso de média espessura   |
| <b>Complexo Quebra-Cangalha</b> | Graníticas leucocráticas              | Granitos                         | Predomínio de solos grosseiros com estruturas reliquias | Cambissolos              | Residual arenoso de pequena espessura  |
| <b>Zonas de Cisalhamento</b>    | Rochas Alteradas - Planos de Foliação | Mica, Clorita                    | Predomínio de solos finos com estruturas reliquias      | Cambissolos e Argissolos | Residual argiloso de pequena espessura |
| <b>Terraços Aluvionares</b>     | Sedimentos                            | Silte, argila e matéria orgânica | Predomínio de solos argilosos e orgânicos               | Neossolo e Gleissolo     | Aluvionar argiloso                     |

A partir dessas informações obteve-se o Mapa de Formações Superficiais que pode ser observado na figura 11.

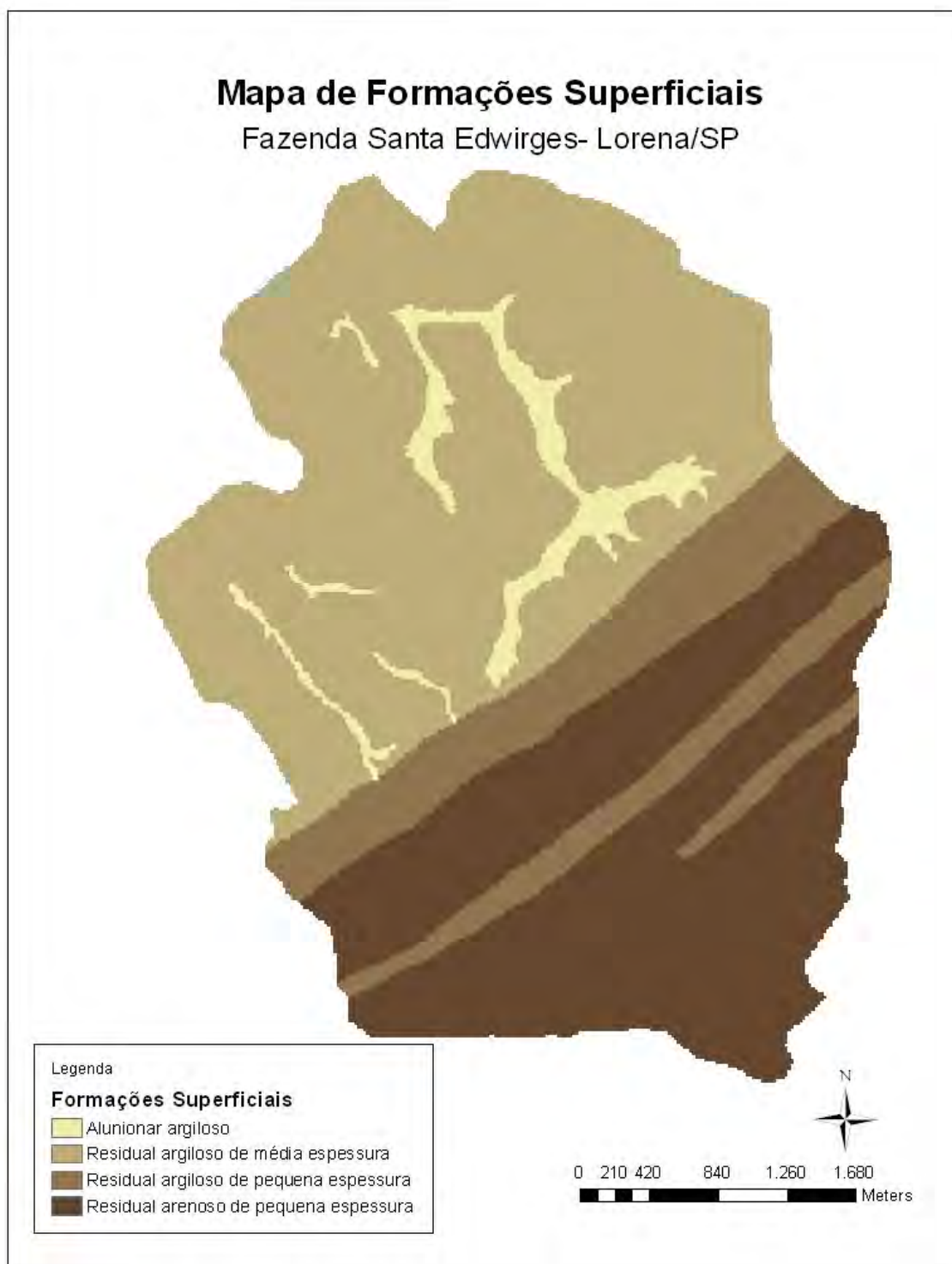


FIGURA 11 – Mapa de Formações Superficiais para a Fazenda Santa Edwirges, em Lorena-SP

## 4.2 MAPA DE POTENCIAL DE EROSÃO

### 4.2.1 PONDERAÇÃO DE CLASSES

Como definido na metodologia a foram utilizados os mapas de formações superficiais , de declividade e uso de solo da Fazenda Santa Edwirges para aplicar a álgebra de mapas, e assim gerar um mapa de potencial de erosão para essa área.

Segundo o modelo adotado, os mapas selecionados correspondem às variáveis da Equação EUPS, conforme descrito a seguir:

Mapa Geológico → Mapa de Formações Superficiais → K- Erodibilidade do Solo

Mapa de Declividade → LS- Declividade e Comprimento de Rampa

Mapa de Uso do Solo → CP - Cobertura de solo e Práticas de conservação

#### 4.2.1.1 MAPA DE FORMAÇÕES SUPERFICIAIS

A distribuição espacial das diferentes formações superficiais da Fazenda Santa Edwirges definidas anteriormente nesse trabalho pode ser novamente observada no mapa da figura 12.

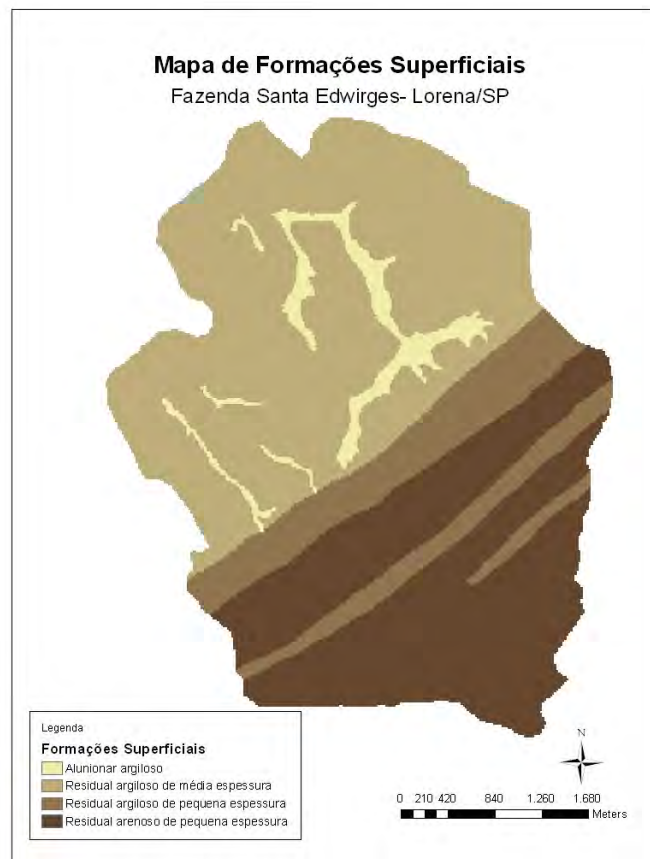


FIGURA 12- Mapa de Formações Superficiais da Fazenda Santa Edwirges, Município de Lorena-SP

Na análise das ponderações que seriam atribuídas à cada uma das formações, foram novamente estudadas suas características e a influência que estas características geravam no processo erosivo, de forma que elas pudessem representar a erodibilidade do solo em análise.

Dessa forma identificou-se que a formação superficial residual argiloso de média espessura apresenta solos mais impermeáveis e mais homogêneos e, portanto, menos suscetíveis a processos erosivos acelerados. É originária das rochas metamórficas do Complexo Embu altamente deformadas e composta principalmente por xistos, gnaisses e migmatitos. O Complexo Quebra-Cangalha, composto predominantemente, por rochas graníticas leucocráticas (claras) influencia as características dos solos da formação superficial residual arenoso de pequena espessura caracterizando-se pela textura grossa e apresentando as maiores elevações topográficas presentes na região, condições favoráveis para a ocorrência de processos erosivos. As zonas com formação superficial residual argiloso de pequena espessura apresentam uma foliação bastante desenvolvida e a presença de minerais finos com estrutura em camadas devido a zona de cisalhamento da qual se origina. Os Terraços Fluviais apresentam grande quantidade de sedimentos inconsolidados,

compostos de silte e argila e localizados no leito do curso dos rios. Apesar de, no aspecto geotécnico, serem solos de baixa resistência, não se encontram em áreas cuja erosão pode ser significativa, caracterizando-se mais como zona e depósito de sedimentos já erodidos.

Portanto, baseando-se nas características das formações superficiais identificadas foi possível ponderar as classes, conforme apresentadas na tabela 2. As zonas com maior suscetibilidade à erosão receberam a maior ponderação, e as de médio, ponderação intermediária e assim sucessivamente, recebendo o menor peso e, portanto menor importância na álgebra realizada a formação aluvionar argilosa.

TABELA 2- Ponderação de classes para o Mapa de Formações Superficiais

| <b>Formação Superficial</b>                   | <b>Ponderação</b> |
|-----------------------------------------------|-------------------|
| <b>Aluvionar Argilosa</b>                     | 1                 |
| <b>Residual argilosa de média espessura</b>   | 2                 |
| <b>Residual argilosa de pequena espessura</b> | 3                 |
| <b>Residual arenosa de pequena espessura</b>  | 4                 |

#### 4.2.1.2 MAPA DE DECLIVIDADE

O mapa de declividade para zona de estudo apresenta-se na figura 13.

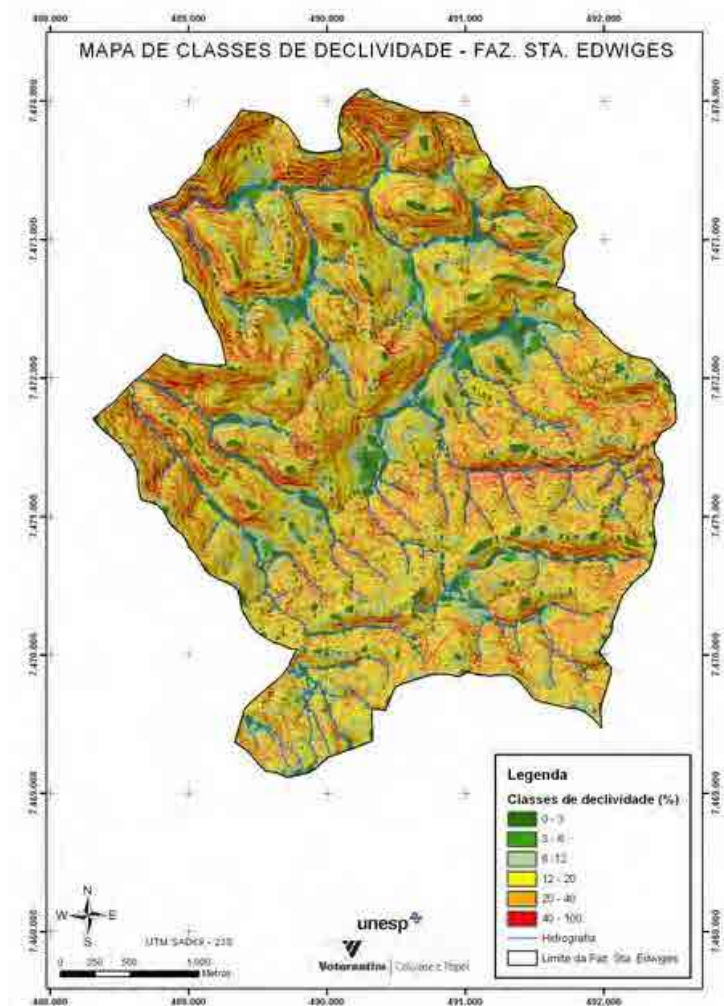


FIGURA 13- Mapa de Declividade da Fazenda Santa Edwiges (SANTOS, 2006).

Baseando-se na relação declividade-erosão, quanto maior a declividade, maior a velocidade de escoamento, maior volume de sedimentos carregados e, portanto, maior erosão, foram definidas as classes de ponderação apresentadas na tabela 3.

As maiores declividades, que favorecem o processo erosivo, receberam os maiores pesos na ponderação realizada (máximo=peso 4), e as declividades mais amenas devido sua menor suscetibilidade à erosão, os menores (mínimo=peso 1), possuindo portanto menor importância na álgebra realizada.

TABELA 3- Ponderação de classes para o Mapa de Declividade

| Declividade | Ponderação |
|-------------|------------|
| < 05 %      | 1          |
| 05 - 15%    | 2          |
| 15 - 30%    | 3          |
| >30%        | 4          |

#### 4.2.1.3 MAPA DE USO DO SOLO

Os diferentes usos do solo da área de estudo podem ser visualizados na figura 14, na qual é possível identificar as classes de uso do solo predominantes que são: mata, ou áreas de preservação permanente (APP), campos ou pastagens, várzea, e plantio de eucalipto.

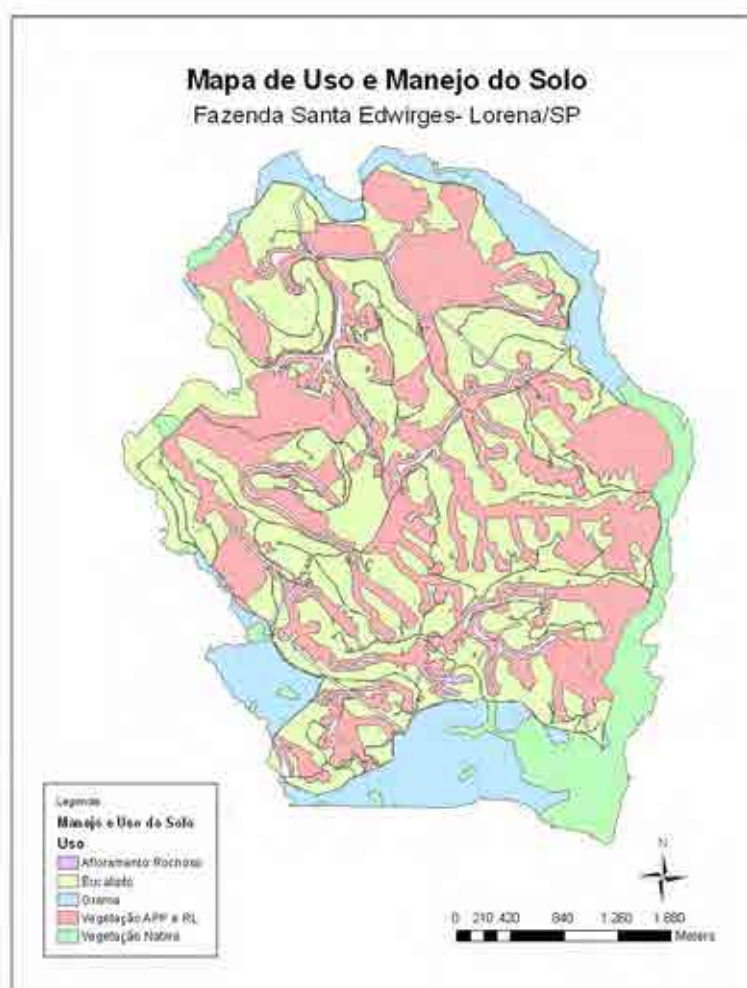


FIGURA 14- Mapa de Uso do Solo da Fazenda Santa Edwirges no Município de Lorena – SP (SANTOS, 2006).

Considerando que o uso de solo que mais favorece o processo erosivo recebeu o maior dos pesos na álgebra proposta e o uso que mais protege ou pouco interfere na erosão o

menor, os diferentes usos de solo da fazenda foram ponderados com classes de 1 a 4 de acordo com esse critério.

Por se tratar de uma fazenda de plantação de eucalipto a maior área é utilizada para esse fim. As regiões de mata nativa e várzea apresentam menor potencial de erosão devido à proteção que o uso do solo oferece e por esse motivo receberam menor peso. Já a região de campos e pastagem corresponde a zonas com potencial de médio a alta, devido à concentração de fluxo pelo tipo de manejo e pela exposição do solo feita por essas práticas. As áreas de várzea localizadas às margens dos rios, são zonas úmidas que não possuem grande potencial de erosão e, portanto receberam a menor das ponderações. Dessa maneira, adotaram-se os seguintes padrões de ponderação (tabela 4).

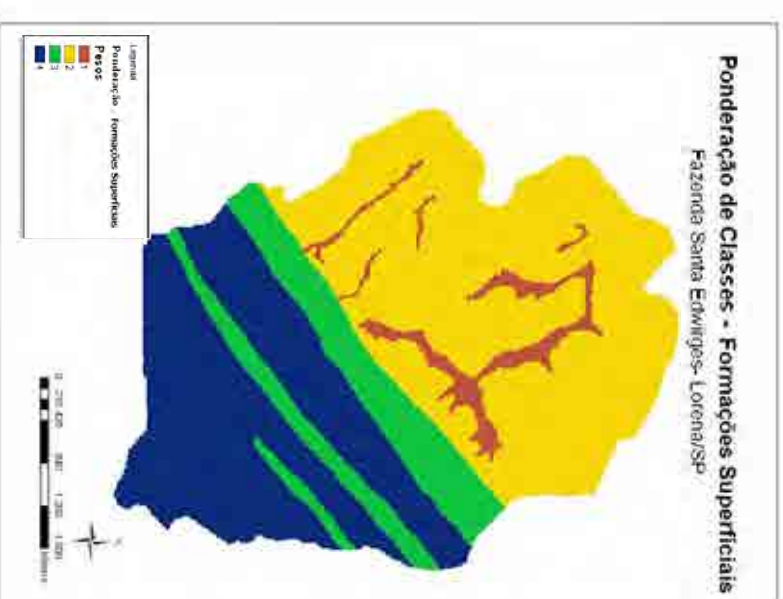
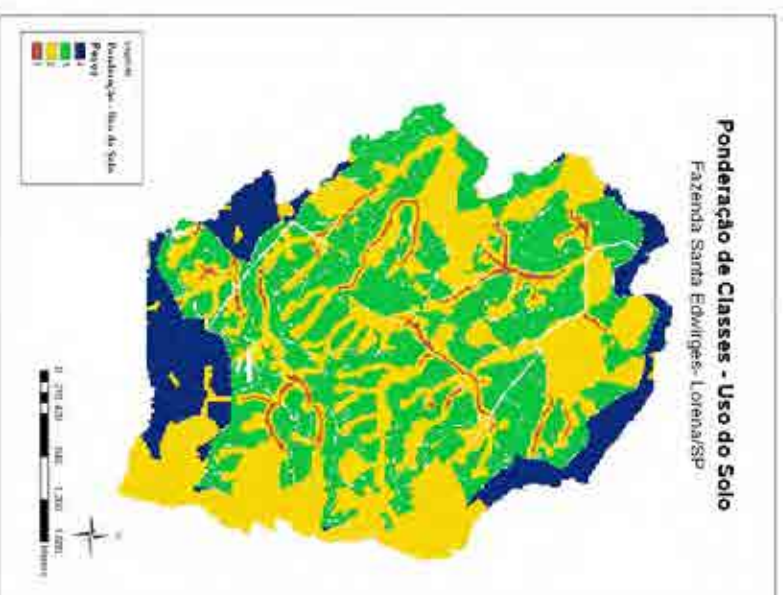
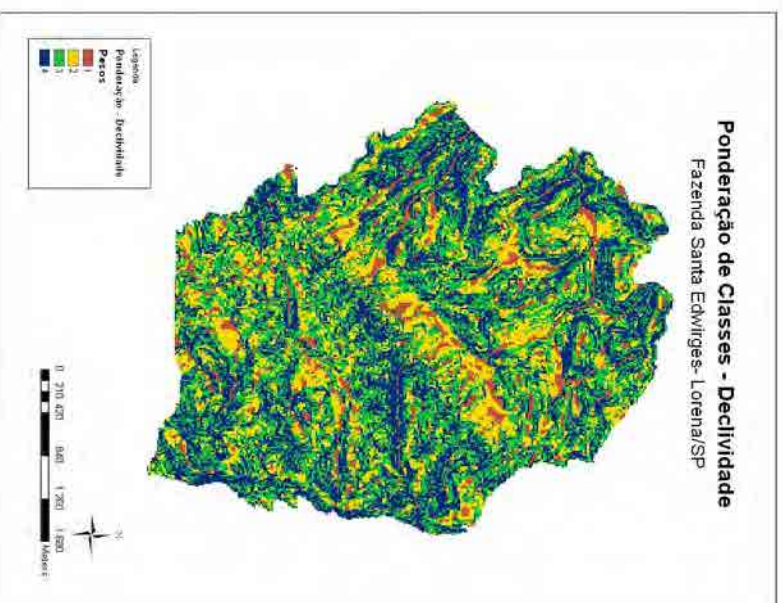
TABELA 4- Ponderação de classes para o Mapa de Uso do Solo

| <b>Uso do Solo</b>                 | <b>Ponderação</b> |
|------------------------------------|-------------------|
| <b>Várzea</b>                      | 1                 |
| <b>Mata / APP</b>                  | 2                 |
| <b>Eucalipto - Reflorestamento</b> | 3                 |
| <b>Campo – Pastagem</b>            | 4                 |

#### 4.2.1.4 MAPAS DE PONDERAÇÃO DE CLASSES

Baseando-se nas ponderações apresentadas nos itens anteriores e utilizando as ferramentas de álgebra de mapas do ArcGIS descritas no capítulo 3.2.2.1, foram obtidos três mapas, com quatro diferentes classes, variando de 1 a 4, de acordo com a sua influência no processo erosivo (figura 15).

É importante notar que alguns dos mapas apresentados para a fazenda Santa Edwirges possuem diferentes limites físicos. Isso ocorre, pois os estudos nesta área se iniciaram por volta do ano de 2004, e a propriedade da Fibria possuía área maior, portanto mapas anteriores a essa data possuem uma área maior. Porém na álgebra dos mapas definiu-se como área padrão, a menor área referente à bacia hidrográfica da fazenda.



(a)

(b)

(c)

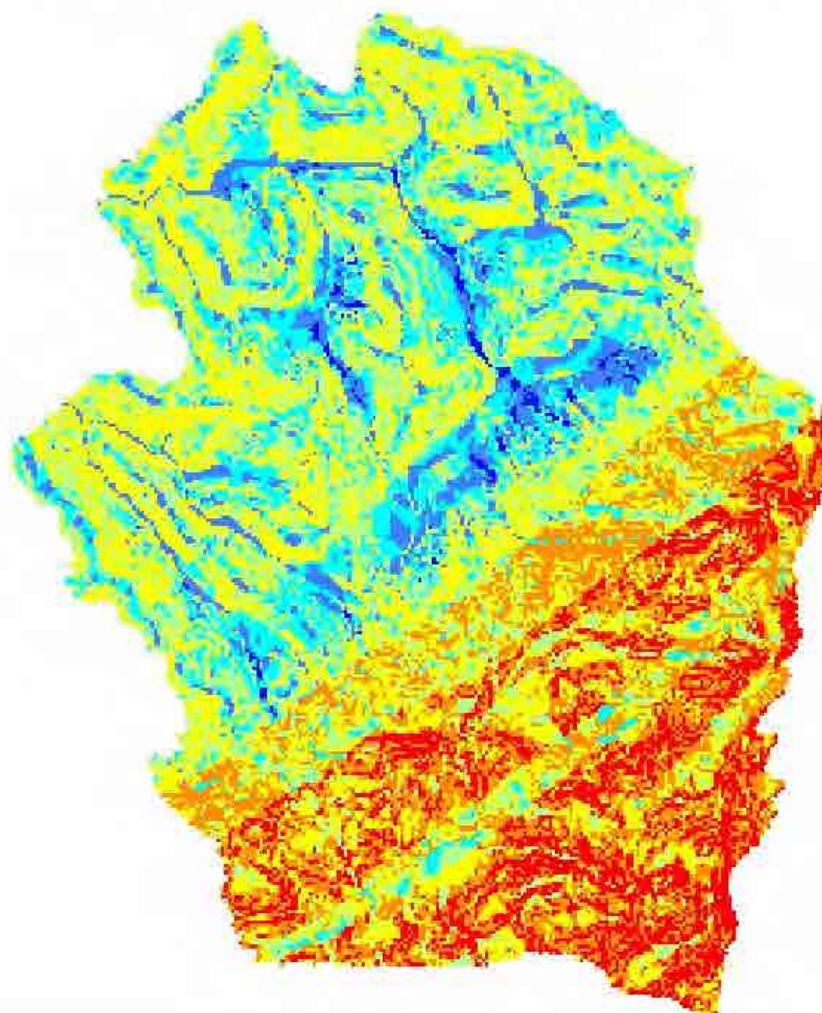
FIGURA 15 – Mapas no formato Raster, baseados na ponderação das classes. (a) Mapa de Declividade, (b) Mapa de Uso do Solo e (c) Mapa Formações Superficiais da Fazenda Santa Edwírges, Lorena - SP

#### 4.2.2 MAPAS DE POTENCIAL DE EROSÃO

Conforme proposto na metodologia, primeiramente foram somados os mapas de declividade e formações superficiais, gerando um Mapa de Suscetibilidade a Erosão Natural. Em seguida, unindo esse mapa Erosão Natural ao de Uso do Solo foi obtido um novo Mapa Qualitativo de Potencial de Erosão, baseado nas ponderações adotadas (figuras 16 e 17).

## Mapa de Suscetibilidade à Erosão

Fazenda Santa Edwirges- Lorena/SP



Legenda:  
**Suscetibilidade à erosão**  
**Variabilidade**  
Alta suscetibilidade : 8  
Baixa suscetibilidade : 2

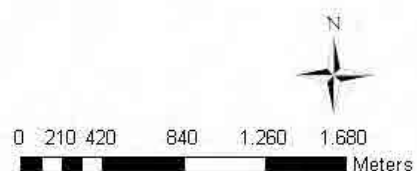


FIGURA 16 – Mapas de Suscetibilidade Natural à Erosão para a Fazenda Santa Edwirges, em Lorena (SP).

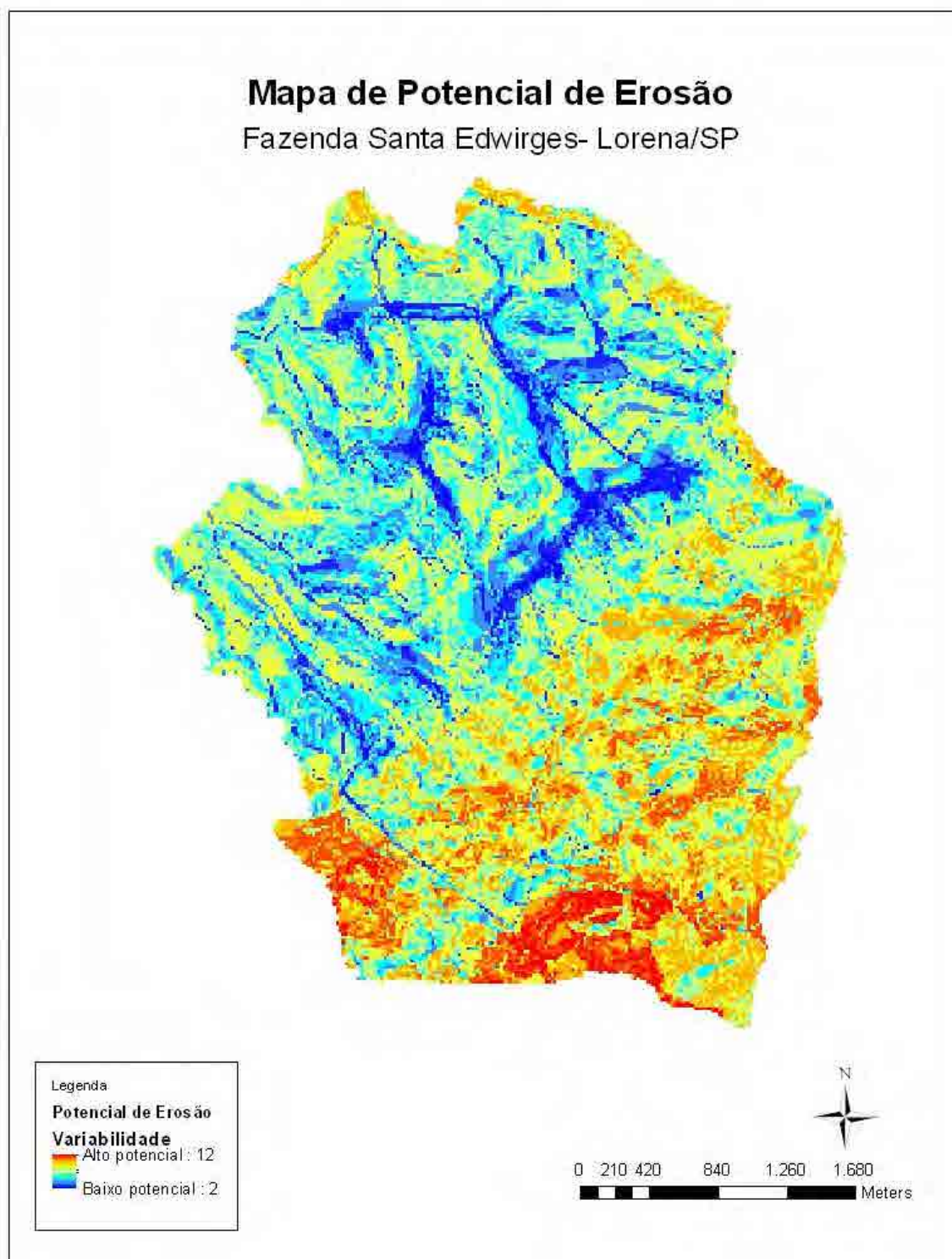


FIGURA 17 – Mapas de Potencial de Erosão para a Fazenda Santa Edwirges, em Lorena(SP).

Na geração dos mapas foram definidas quatro classes de índices de erosão. A adoção dessas classes se baseou no trabalho de Santos (2006) para que, posteriormente, pudesse ser feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelos dois estudos, porém buscou-se refinar um pouco mais os resultados utilizando maior número de índices.

Os pesos adotados para cada classe no trabalho de Santos variaram de 1 a 6, enquanto neste trabalho, as ponderações foram de 1 a 4. Portanto as faixas de valores máximos e mínimos dos resultados apresentados foram distintas. Os qualificadores dos índices de erosão adotados para este estudo são apresentados na tabela 5.

TABELA 5- Qualificadores dos índices de erosão e intervalos de pesos propostos

| <b>Índices de erosão</b> | <b>Intervalo de pesos desse estudo</b> |
|--------------------------|----------------------------------------|
| <b>Baixo</b>             | 1,0 – 4,0                              |
| <b>Moderado</b>          | 4,1 – 7,5                              |
| <b>Alto</b>              | 7,6 – 9,5                              |
| <b>Muito Alto</b>        | 9,6 – 12                               |

O mapa obtido utilizando essa classificação de intervalo de pesos pode ser visto na figura 18.

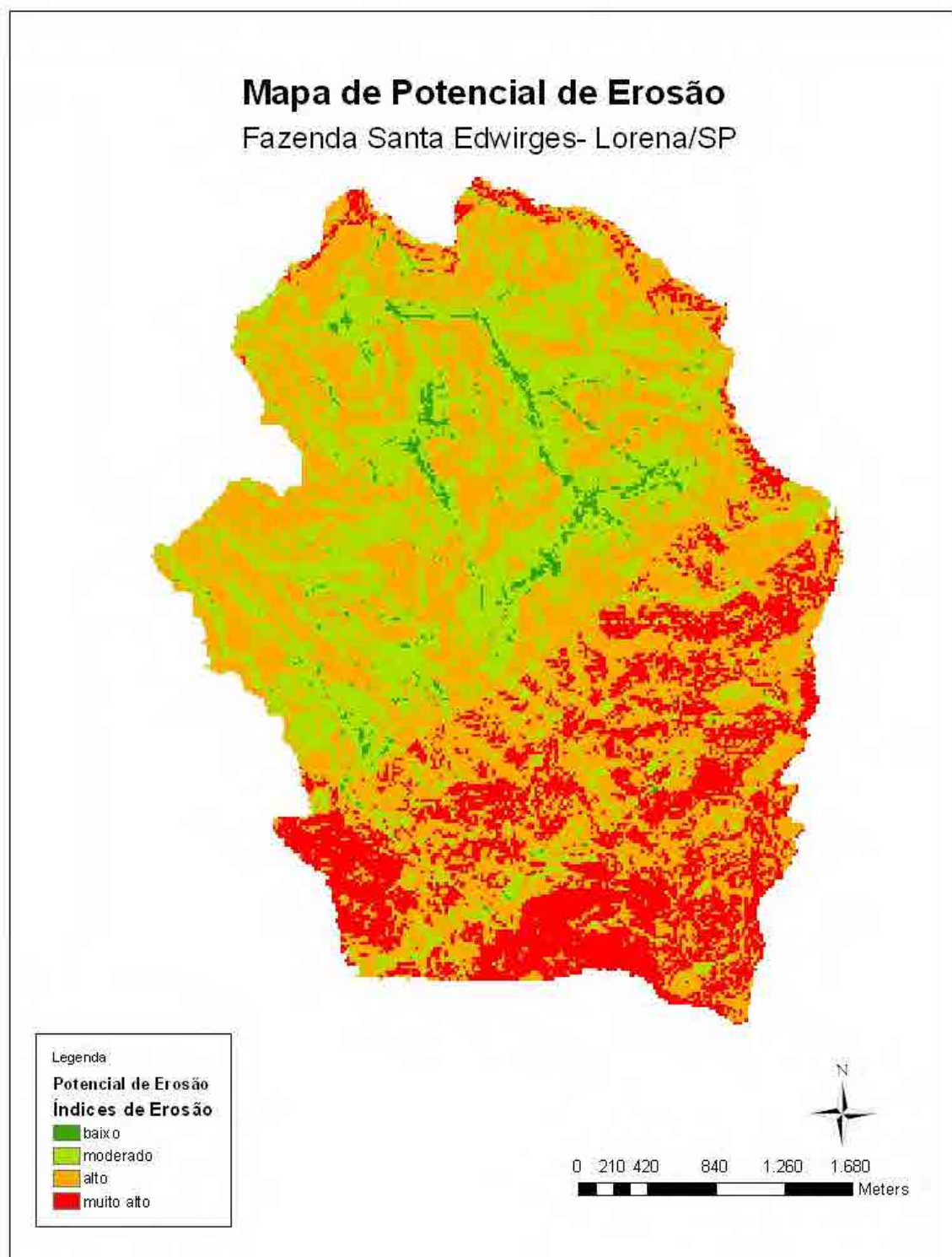


FIGURA 18 – Mapa do Potencial de Erosão para a Fazenda Santa Edwirges , Classificação em Índices de Erosão da Fazenda Santa Edwirges, Lorena (SP).

Nos mapas obtidos as regiões com maior risco de erosão estão localizadas na porção sudoeste da fazenda onde se localizam as maiores declividades e a formação superficial residual arenosa de pequena espessura, mais suscetível à erosão. Zona influenciada pelo *Complexo Quebra Cangalha*, composta de rochas graníticas e caracterizada por solos, predominantemente, arenosos e de textura grossa, favorecendo o processo erosivo.

Dentre as zonas com alto potencial erosivo encontram-se também as áreas orientadas pelas zonas de cisalhamento, com direção SO-NE, que apesar de terem seu risco de erosão menos intenso que a região de formação graníticas da fazenda e apresentarem declividades mais amenas, também apresentam grau elevado de erosão, devido aos seus muitos planos de foliação que as tornam vulneráveis aos processos de alteração de superfície.

As regiões com menor risco estão próximas às zonas aluvionares que são usadas para diversos fins, principalmente plantio de eucalipto e mata nativa e são caracterizadas pela baixa declividade.

No mapa de suscetibilidade natural, as formações superficiais ficam, ainda, bem delimitadas sendo possível identificar claramente a zona granítica, fato que se dá pela baixa variabilidade espacial desses dados na fazenda, estando eles bem definidos nas quatro porções de cada formação superficial.

Como a maior parte da fazenda é composta de zonas de reflorestamento de eucalipto e de mata, na comparação entre o mapa de suscetibilidade (Figura 16) e de potencial de erosão (Figura 17) observa-se uma queda no risco de erosão de diversas áreas da fazenda devido ao uso do solo, o que ressalta a importância de um planejamento da ocupação do solo como medida preventiva de processos erosivos.

Quando são comparados os resultados obtidos, com a situação observada em campo é possível identificar alguns focos de desenvolvimento de processos erosivos nas regiões indicadas nos mapas como sendo as mais críticas, o que valida os resultados obtidos.

#### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MAPAS

Outro objetivo deste trabalho foi comparar os mapas aqui produzidos com aqueles gerados por Santos (2006) para a mesma área de estudo. O estudo realizado por Santos (2006) utilizou como metodologia a criação de um mapa de potencial de erosão também a partir da álgebra de mapas, considerando, para isso, o mapa de declividade, o mapa de uso do solo e dados geotécnicos. Para esse último parâmetro, Santos (2006), elaborou diferentes mapas

baseados na distribuição espacial de características do solo como granulometria, plasticidade peneira #40 e peneira de #200, resistência à tração ( $\omega < 30\%$ ) e resistência à tração ( $\omega > 30\%$ ). Os mapas gerados por este autor podem ser observados nas figuras 20, 21 e 22.

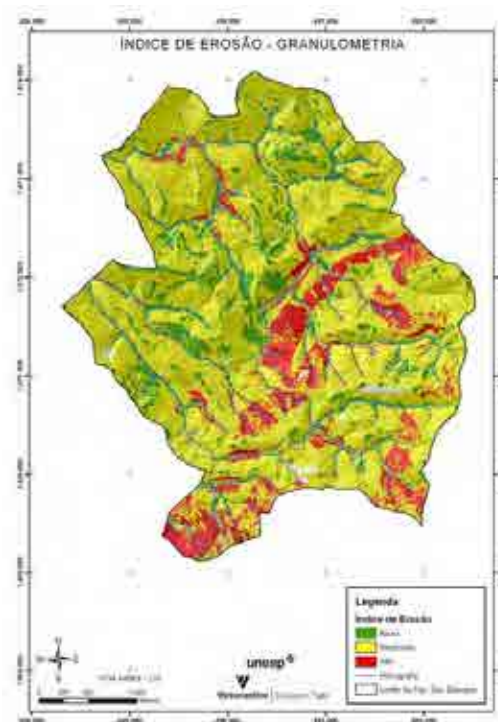
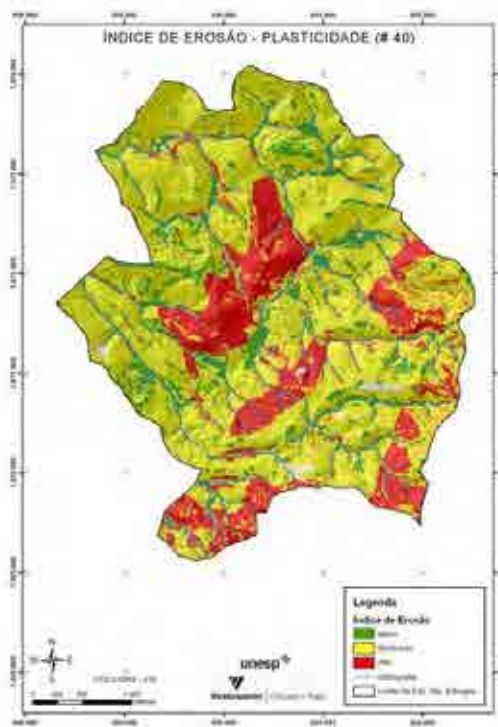
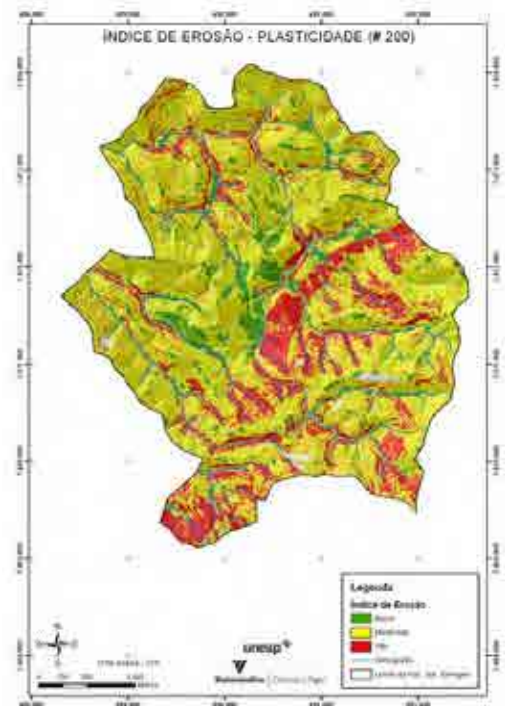


FIGURA 20 - Mapa do Potencial de Erosão, definido pelo índice de dispersão (granulometria) (SANTOS, 2006).

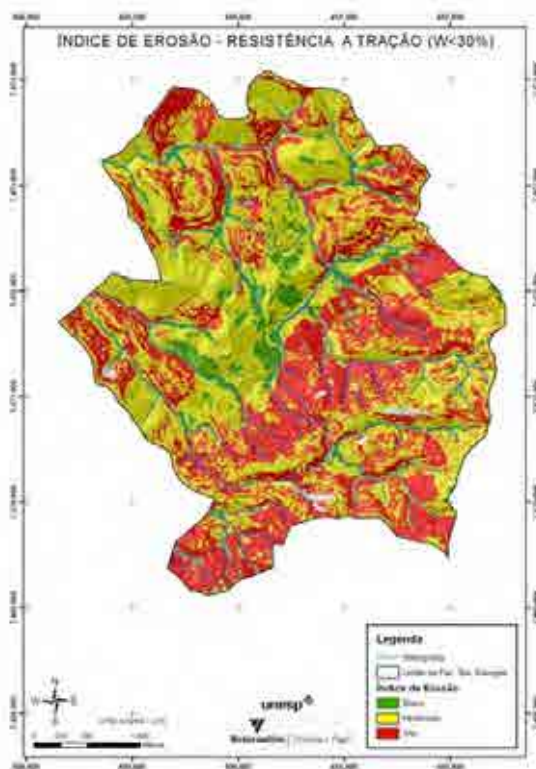


(a)

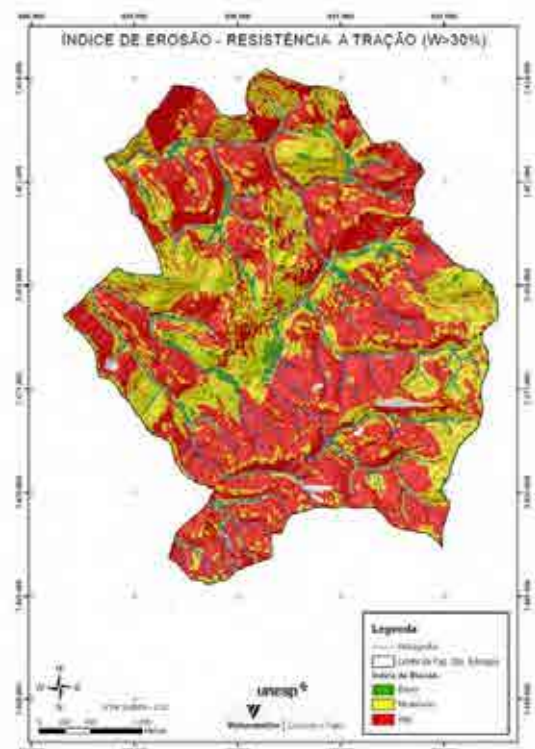


(b)

FIGURA 21 - Mapas de Potencial de Erosão definidos pela plasticidade: (a) #40; (b) #200 (SANTOS, 2006).



(a)



(b)

FIGURA 22 - Mapas de Potencial de Erosão definidos pela resistência à tração: (a)  $\omega < 30\%$ ; (b)  $\omega > 30\%$ , (SANTOS, 2006).

Para as diferentes características de solo consideradas Santos (2006) obteve resultados distintos entre si. Para os parâmetros de granulometria e plasticidade do solo, principalmente peneira #200, os resultados ainda podem ser considerados próximos entre si. Para esses mapas identifica-se como zona crítica, com maior potencial de erosão, a região central da fazenda numa faixa que segue a mesma orientação das zonas de cisalhamento milonitizadas e alguns pontos na zona sul da propriedade. Em geral, a área apresenta potencial moderado à erosão apresentando zonas de baixo potencial nas regiões mais planas e próximas aos rios.

Quando comparados esses mapas nos quais se considerou a granulometria e plasticidade do solo produzidos por Santos (2006) e aqueles resultantes deste trabalho é possível visualizar alguma semelhança na porção norte e noroeste da fazenda, onde foi estimado um potencial moderado à erosão, com exceção do extremo norte, onde se identificou uma zona de alto potencial de erosão para este estudo. Nas regiões às margens dos rios, para ambos os trabalhos, observou-se os menores potenciais de erosão, devido às baixas declividades, características de inundação e depósito de sedimentos. Para os mapas de Santos (2006), observa-se ainda uma faixa no sentido SO-NE de alto potencial erosivo, que coincide com a zona de cisalhamento existente na área de estudo e que também é considerada de alto potencial neste trabalho. Apesar disso, nos mapas das figuras 16 e 17, onde o potencial é apresentado em escala gradual essas zonas mostram-se menos críticas, quando comparadas ao extremo sul de rochas granilíticas. Por fim, a porção sul da propriedade, onde já existem processos erosivos em desenvolvimento observados em campo e que é definida nos mapas das figuras 16, 17 e 18, como zonas de maior potencial erosivo, são classificadas nos mapas de Santos (2006) como de moderado potencial, com alguns pontos identificados como de alto potencial de erosão.

Em contrapartida, os mapas produzidos por Santos (2006) utilizando dados de resistência à tração do solo indicaram altos índices de erosão para a maior parte da fazenda, com algumas poucas áreas, com potencial médio e baixo de erosão. Mais uma vez, se assemelha a este estudo as áreas de menor potencial erosivo às margens dos rios, a faixa de orientação guiada pela zona de cisalhamento e para esses mapas a região sul da fazenda, que também é identificada como de alto potencial de erosão. Dentre os parâmetros geotécnicos, o de resistência à tração do solo utilizado por Santos (2006) são os que mais se assemelha aos parâmetros utilizados nesse trabalho, podendo, portanto, serem mais objetivamente comparados.

Os estudos e manipulações realizadas por Santos (2006) analisaram parâmetros geotécnicos dos solos e os consideraram, isoladamente na soma dos mapas. Dessa maneira, em cada um dos mapas, a erosividade do solo foi representada por uma das características daquele solo em questão. Por outro lado, na representação indireta da erodibilidade do solo pelas formações superficiais influenciadas pelas unidades geológicas, foi possível considerar, ainda que superficialmente, diversas características para um mesmo solo. Portanto, na definição do tipo de formação superficial e no peso que ela receberia na ponderação foi analisado o tipo de rocha formadora, as características dos minerais que a compõe, a textura do solo e outras informações disponíveis.

Ao considerar um único parâmetro do solo, Santos (2006) obteve mapas distintos entre si, e talvez uma integração entre os diferentes parâmetros representando a relação existente entre eles no mesmo solo e, posteriormente, um cruzamento desses dados com os mapas de uso do solo e declividade tivessem fornecido resultados mais próximos à realidade encontrada em campo.

Para esse estudo em questão, a proposta de uma representação e avaliação simples da fazenda Santa Edwirges, utilizando o mapa de formações superficiais tornou o trabalho mais abrangente, uma vez que considera mais características do solo em questão, mas também mais generalista por não propor uma análise mais detalhada e refinada e de maior variabilidade espacial.

## 5 CONCLUSÕES

Como já desenvolvido em diversos outros trabalhos, a aplicação qualitativa da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) associada à tecnologia SIG pode fornecer resultados bem interessantes no estudo do potencial de erosão laminar para uma determinada área de estudo.

A metodologia desenvolvida neste trabalho, representando os fatores que compõem a Equação (EUPS) de maneira simplificada, realizando uma releitura do mapa geológico para gerar um mapa de formações superficiais e utiliza-lo na definição das características de erodibilidade do solo; o mapa de declividade para representar o fator topográfico (LS) e o mapa de uso de solo para o índice CP de Cobertura de solo e Práticas de conservação, e ainda desprezando a erosividade das chuvas como fator espacial, devido ao tamanho reduzido da área de estudo e sua baixa variabilidade para área; produziu-se resultados interessantes e próximos à situação real encontrada em campo.

A Fazenda Santa Edwirges embora seja de pequena extensão apresenta grande variedade geológica, pedológica e também topográfica sendo possível obter resultados com grande variabilidade pela integração dos diferentes mapas. Para pequenas áreas de características mais homogêneas será necessário um estudo complementar para determinar a aplicabilidade da metodologia proposta.

Na comparação dos mapas obtidos com aqueles produzidos por Santos (2006) foram identificados resultados semelhantes, principalmente nas zonas de alto potencial erosivo, como a faixa de orientação NO-SE, influenciada pela zona de cisalhamento, e nas regiões de baixo potencial erosivo, nas áreas de menor declividade e nas regiões aluvionares. A metodologia utilizada por Santos (2006) aplicando diferentes parâmetros geotécnicos produziu mapas distintos entre si, possibilitando comparações também distintas.

A utilização para diferentes manipulações e tratamentos de outros mapas de informações representativas no processo erosivo, como mapa de textura de solo, potencial de infiltração, dinâmica de escoamento superficial, porosidade, comprimento de rampa, alguns deles já existentes para a fazenda; poderão ser fontes de novos estudos complementares para o desenvolvimento de diferentes metodologias e como fonte de comparação e validação dos resultados obtidos nesse estudo.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, R.C. Estudo da Erodibilidade de um solo da Formação Barreiras. 2000. 147p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- BAPTISTA, G.M.M. (1997). Diagnóstico ambiental da Perda Laminar de solos por meio do geoprocessamento. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 112p.
- BARBOSA, C. C. F. Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento.
- BERRY, J.K.; "Catographic Modeling: The Analytical Capabilities of GIS". In: Goodchild, M.; Parks, B.O., Steyaert, L.T., Environmental Modeling with GIS. Oxford, Oxford University Press, 1993, pp. 58-74
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. 3a Edição. Ícone Editora, SãoPaulo. 1993.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. Piracicaba, Livroceres, 1985. 392p.
- CÂMARA, G. Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.
- 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.
- CASSANELAS, P.J., REGUERIN, L.A.M. & ROQUERO, L.C.(1994). Edafologia: para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Presa, Madrid.
- CATANEO, A.; CASTRO FILHO, C. & ACQUAROLE, R.M. Programa para cálculo de índices de erosividade das chuvas. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto – IN PE, São José dos Campos, 1997.
- CHAVES, H. M. L. Estimativa da erosão atual e potencial no Vale do São Francisco. Relatório final de Consultoria. CODEVASF/FAO, Brasília.1994.
- D'AGOSTINI, L. R. (1999) Erosão: o problema mais que o processo. Florianópolis: Ed. UFSC.
- ELLISON, W.D. (1947) Soil erosion. Soil Sc. Soc. Am. Proceeding, (12). pp. 479-488.
- FARINASSO, M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da eups – equação universal de perdas de solos utilizando novas metodologias em sig para os cálculos dos seus fatores na região do alto parnaíba – PI-MA- Revista Brasileira de Geomorfologia - Ano 7, nº 2 (2006)
- FORNELOS, L.F., NEVES, S.M.A.S. uso de Modelos digitais de elevação (MDE) gerados a partir de imagens de radar interferométrico (SRTM) na Estimativa de Perdas de Solo.Artigo Emprapa/INPE p.182 -191,2006
- FREIRE, O.; GODOY, M. C. T. F.; CARVALHO, W. A. Erodibilidade de alguns solos do oeste do Estado de São Paulo. Revista de Geografia, São Paulo, n. 11, p. 77-87, 1992.

- GUERRA, A. J. T. Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005
- GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.
- GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas Encostas. In: Guerra, A. J, T. & Cunha, S. B. Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.
- LAL, R.(ed) – Soil erosion. Research Methods. Delray beach, Soil and Water Conservation Society, 340p, 1994.
- LAL, R.(1990). Soil Erosion in the Tropics: principles and management. Mc Graw-Hill, Inc.
- LIM, K.J. SAGONG, M. ENGEL, B.A. TANG, Z.; CHOI,J.;KIM,K-S - GIS based sediment assessment tool. Catena, v.64, n.1, p.61-80, 2005.
- 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.
- MACEDO, MARIZA ALVES DE (2000). Estimativa de perda de solo por erosão laminar na bacia do rio São Bartolomeu-DF usando técnicas de geoprocessamento. SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCION REMOTA, 9. Puerto Iguazú, AR.
- MAFRA, N.M.C.(1997) Esquema metodológico para la planificación de usos del suelo em zonas tropicales húmedas: aplicación a la REGIÓN Norte del Estado de Rio de Janeiro, Brasil. Valência, España

- 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.
- MILANESI, B. & RODRIGUES, A. – Mapeamento lito-estrutural da Fazenda Santa Edwiges, escala 1:10.000. FEG/UNESP, Votorantim Celulose e Papel/Relatório de Iniciação Científica, 2005.
- MOLDENHAUER, W.C.; WISCHMEIER, W.H. & PARKER, D.T. The influence of crop management on runoff, erosion and soil properties of a Marshall silty clay loam. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31:541-546, 1967.
- OLIVEIRA, J. B. Solos do estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas, Instituto Agrônômico, 1999.
- PAES, F. S. Áreas de preservação permanente em Bacias hidrográficas e sua importância na Prevenção da perda de solo por erosão . Dissertação (Pós-graduação em meio ambiente e recursos hídrico) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 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. Escala 1:500.000, São Paulo: IPT, 1981.
- RAMSAY, J. G. Shear zones geometry: a review. *Journal of Structural Geology*, Mainz, v. 2, p 83-99, 1980.
- RESENDE, M. Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação de solos. *Inf. Agropec.*, 11:3-18, 1985.
- RICHART, A.; et al. Compactação do solo: causas e efeitos. *Seminário: Ciências Agrárias, Londrina*, v. 26, n. 3, p. 321-344, 200
- RODRIGUES, J.E. Estudos de fenômenos erosivos acelerados- Boçorocas. Tese\_ (Doutorado em Engenharia dos Transportes)EESC-USP, São Carlos, SP, 1982.

- ROUSSEVA, S. Ideas for physical interpretation of the USLE. N. Poushkarov Research Institute for Soil Science and Agroecology, Lecture given at the College on Soil Physics Trieste, 3-21, Sofia, Bulgaria. March 2003, p. 310-319
- SALOMÃO, F.X.T.(1994). Processos erosivos lineares em Bauru(SP): regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano e rural. São Paulo, 200p.(Tese de Doutorado FFLCH-USP. Departamento de Geografia).
- SANTOS, C. M. Proposta Metodológica para a caracterização de áreas com potencial de erosão. Guaratinguetá. UNESP, 2006. 16p (Artigo)
- SANTOS, C. M. Z. Estudo da erodibilidade dos solos da bacia do ribeirão Taboão, SP, como subsídio ao estudo da disponibilidade hídrica da bacia. 2005. 86p. Relatório Final de Iniciação Científica – Fapesp
- SCHAEFER, C.E.R.; et al. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.37, n.5, p.669-678, 2002
- SILVA, A. B. Sistemas de informações geo-referenciadas: conceitos e fundamentos. Campinas: Ed.Unicamp,1999. Cap.6 – Funções dos SIGs. P. 161-233
- SILVA, J.U.L. (1999) A dinâmica atmosférica e a distribuição das chuvas na região “lesnordeste” paulista. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas.Rio Claro, Universidade Estadual Paulista. 230p.
- SILVA, A.M.; SCHULTZ, H.E. e CAMARGO, P.B. (2007). Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas, 2ª edição– revista e ampliada. Editora Rima, São Carlos – SP, Brasil
- SILVA, A.M.; SCHULYS, H.E. e CAMARGO, P.B. (2007). Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas, 2ª edição – revista e ampliada. Editora Rima, São Carlos – SP, Brasil, 153 p.

- SILVA, C.G. Perdas de solo e de água e características de infiltração em sistemas de plantio direto e convencional. Dourados, MS: UFMS, 2003.42p. (Tese de Mestrado).
- SILVEIRA, L.L.L. Elaboração de Carta de Suscetibilidade à Erosão das Bacias dos Rios Araraquara e Cubatão – SP, Escala 1:50000. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.
- SIMÕES, S.J.C. Variabilidade Espacial do Potencial de Erosão e seus efeitos na sedimentação de um pequeno reservatório – A bacia dos Mottas, Sudeste do Brasil. Guaratinguetá, 2007.
- SPOHR, R. B. Influência das características físicas do solo nas perdas de água por escoamento superficial no sul do Brasil e Uruguai. Dissertação de Doutorado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), 2007.
- TEIXEIRA; GUERRA, A., J., & CUNHA, S. B. Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos. 7ª Ed. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 2007. 472p.
- TOMLIN, D. Geographic Information Systems and Cartographic Modeling. Prentice Hall, New York, 1990
- USDA (1996). *WEPP project. Internet*, Purdue University, 3p.
- VILAR, O.M. & PRANDI, E.C. Erosão dos solos. p 177-206. In: CINTRA J.C. & ALBIERO, J.H. Solos do Interior de São Paulo. ABMS/ Depto de Geotecnia – EESC/USP, São Carlos, SP, 399p, 1993.
- WARD, A.D. & ELLIOT, W.J. Environmental hydrology. Lewis Publishers, USA, 1995.
- WILLIAMS, J.R., and H.D. Berndt. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Trans. Of the ASAE. pp 1100-1104.

- WISCHMEIER, W.H. e SMITH, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide planning. *Agr. Handbook*, n.537, 58p.
- ZHANG, Y. et al. Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk. *Land Degradation & Development*, Iowa City, v.20, n.1, p. 84-91, 2009.